

BETON MODYFIKOWANY PYŁAMI KRZEMIONKOWYMI

Gabriela Rutkowska, Mateusz Sobczak

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Beton jest materiałem o podstawowym znaczeniu w budownictwie. Odgrywa również istotną rolę w technice rolniczej i w przemyśle spożywczym. Celem badań były wybrane właściwości mieszanki betonowej i dojrzałego betonu, w zależności od udziału dodatku pyłu krzemionkowego (mikrokrzemionki). Największe możliwości ponownego zagospodarowania takiego pyłu ma sektor produkcji materiałów budowlanych. Zaprojektowano skład betonu klasy C20/25 bez udziału pyłu krzemionkowego oraz trzy składy zawierające odpowiednio 5, 10, 15% pyłu. Mieszanki betonowe zostały poddane badaniom opadu stożka i zawartości powietrza, natomiast beton – wytrzymałości na ściskanie i zginanie, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, nasiąkliwości i mrozoodporności. Przedstawiono analizę wyników badań mieszanek betonowych i stwardniałych betonów. Badania wykazały przydatność pyłu krzemionkowego, jako surowca do produkcji betonu.

Słowa kluczowe: mieszanka betonowa, beton, pył krzemionkowy

WPROWADZENIE

Perspektywa wyczerpywania się paliw kopalnianych i dbałość o środowisko wpłynęły na określenie wyzwań stawianych państwom należącym do UE na najbliższe lata w ramach strategii „Europa 2020”. Gospodarka w ogóle, jak i przemysł materiałów budowlanych, od lat są dziedzinami racjonalnego użytkowania odpadów przemysłowych, które są źródłem wielu surowców oraz półfabrykatów i pozwalają na osiągnięcie znacznych efektów ekonomicznych. Już w czasach nowożytnych pojawił się problem z utylizacją odpadów hutniczych oraz energetycznych, których w wyniku spalania powstawały duże ilości (m.in. pyłu krzemionkowego, żużla paleniskowego czy popiołu lotnego).

Największym zapotrzebowaniem wśród wszystkich materiałów budowlanych i konstrukcyjnych cieszy się beton. Jest to najbardziej uniwersalny budulec. Według szacunków, rocznie na całym świecie zużywa się ok. 3,5 mld m³ tego materiału. Przemysł betonowy, aby wytworzyć tak dużą ilość mieszanki betonowej, potrzebuje 20 mld ton

Adres do korespondencji – Corresponding author: Gabriela Rutkowska, Katedra Inżynierii Budowlanej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: gabriela_rutkowska@sggw.pl

kruszywa, 800 mln m³ wody (ok. 5% zużycia ogółem), 500 mld MJ energii i wytwarza przy tym ok. 7% światowej emisji CO₂. Znaczna większość, to jest 60–70% powstających budowli, to konstrukcje betonowe.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat dokonano olbrzymiego postępu technologicznego przy produkcji betonu, co wiąże się z rozwojem urządzeń i maszyn budowlanych oraz wymaganiami poszczególnych branż przemysłu. Współczesna gospodarka i rynek stawiają wysokie wymagania dotyczące bezpieczeństwa, opłacalności, oddziaływania na środowisko, wytrzymałości oraz trwałości konstrukcji. Każde z tych wymagań może być spełnione, jeśli mieszanka betonowa jest odpowiednio zaprojektowana i wykonana, co wbrew pozorom jest skomplikowanym zagadnieniem.

Przez ostatnie lata udało się znacznie poprawić szereg właściwości projektowanych betonów, w tym wytrzymałość na ściskanie. Istotne znaczenie odgrywa w tym obszarze mikrokrzemionka, która, oprócz pozytywnego oddziaływania na wytrzymałość na ściskanie, może równie korzystnie wpływać na wodoszczelność betonu.

Celem badań było określenie wpływu udziału pyłu krzemionkowego dodanego do mieszanki betonowej na wybrane właściwości techniczne mieszanek i uzyskiwanych z nich betonów.

MATERIAŁY I METODY

Procedury projektowe oraz badawcze zostały zapewnione na podstawie wytycznych zawartych w aktualnie obowiązujących normach budowlanych. Próbki betonowe zastosowane w badaniach spełniają kryterium betonu zwykłego zgodnie z normą PN-EN-206-1:2003. Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe klasy C20/25 o konsystencji F2 – konsystencja gęstoplastyczna, wykorzystując metodę trzech równań wg Bukowskiego. Do przygotowania próbek betonowych wykorzystano kruszywo normalne o uziarnieniu 0,125–16mm oraz cement portlandzki 42,5 bez domieszek.

Konsystencja mieszanek betonowych została zbadana metodą stożka opadowego zgodnie z normą PN-EN 12350-2:2011. Do badania wytrzymałości na ściskanie użyto próbek o wymiarach 150 × 150 × 150 mm. Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 12390-3:2011. Próbki poddano badaniom po upływie 28-dniowego okresu pielęgnacji betonu. Do badania wytrzymałości na zginanie użyto próbek o wymiarach 10 × 10 × 50 cm. Doświadczenie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 12390-5:2011. Badania głębokości penetracji wody przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-88/B-0650. Mrozoodporność badano na próbkach 10 × 10 × 10 cm w 150 cyklach zamrażania-rozmrażania w komorze ToRoPoL.

Pył krzemionkowy – mikrokrzemionka – jako dodatek do betonu

Dodatek według normy PN-EN 206-1:2003 to „drobnoziarnisty składnik stosowany do betonu w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania specjalnych właściwości. Dodatek może w znaczący sposób modyfikować właściwości, zarówno mieszanki

betonowej, jak i stwardniałego betonu [PN-EN 206-1:2003: Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność].

Pył krzemionkowy (tak zwana mikrokrzemionka), to produkt uboczny w produkcji stopów żelazokrzemowych i krzemu metalicznego w piecach łukowych. Mikrokrzemionka składa się z bardzo drobnych sferycznych cząsteczek o powierzchni właściwej ok. $20 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, gęstości ok. $2,2 \text{ g cm}^{-3}$, które można przyjąć za średnio 100-krotnie mniejsze od średniego wymiaru ziarna cementu [Dondelowski 2008]. Stanowi ona jeden z ważniejszych komponentów betonu z bardzo wysokimi parametrami eksploatacji, co pozwala na pozytywne kształtowanie właściwości betonu. Po raz pierwszy mikrokrzemionki jako składnika betonu użyto w latach 80. ubiegłego wieku w Kanadzie i Stanach Zjednoczonych. Betony zawierające pył krzemionkowy charakteryzują się zwiększoną trwałością i wytrzymałością na ściskanie oraz mniejszą nasiąkliwością i spadkiem konsystencji – aby zapobiegać temu zjawisku, należy dodać superplastyfikatora [Katzer 1996].

Mikrokrzemionka zawiera 75–98% SiO_2 . W Polsce taki pył powstaje tylko w hucie Łaziska i zawiera 85–95% SiO_2 . W normie EN-13263-1 + A1:2010 zawarto wymagania odnośnie chemicznego i fizycznego składu pyłu krzemionkowego. W tabelach 1 i 2 przedstawiono wymagania, jakie musi spełniać mikrokrzemionka przeznaczona na dodatek do produkcji betonów.

Tabela 1. Skład chemiczny i wymagania (PN-EN-13263-1 + A1:2010) dla pyłu krzemionkowego
Table 1. Silica dust, chemical composition and requirements (PN-EN-13263-1 + A1:2010)

Składnik pyłu krzemionkowego Component of silica dust	Dopuszczalna zawartość składnika w pyłe (% mas) Allowable contents component in dust
SiO_2	≥ 85
Krzem pierwiastkowy – Primary silicon	$\leq 0,4$
CaO wolny	$\leq 1,0$
Siarka, jako SO_3 – Sulfur as SO_3	$\leq 2,0$
Całkowita zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na_2O Total content of alcalis based on Na_2O	wartość deklarowana declared value
Chlorki – Chlorides	$\leq 0,3$
Straty prażenia – Loss on ignition	$\leq 4,0$

Tabela 2. Pył krzemionkowy, wymagania fizyczne (PN-EN-13263-1 + A1:2010)
Table 2. Silica dust, physical requirements (PN-EN-13263-1 + A1:2010)

Właściwość – Property	Wymagania – Requirements
Powierzchnia właściwa – Specific surface	$35,0 \text{ m}^2/\text{g} > x > 15,0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$
Zawartość składnika w zawiesinie Component content in suspension	$\pm 2\%$ wartości deklarowanej przez producenta the value declared by producer
Wskaźnik aktywności – Activity index	100% w terminie 28 dni – 100% up to 28 days

Badania polskiej mikrokrzemionki z huty Łaziska wykazały, że nie stanowi ona zagrożenia radiologicznego. Zawiera śladowe ilości radu i toru, a stężenie potasu K-40 jest na poziomie typowej zawartości w naturalnych kruszywach.

Przedmiotem badań był wpływ dodania pyłu krzemionkowego na właściwości betonów zwykłych. Określono możliwości wykonania dobrej jakości betonu bez dodatków oraz betonów z dodatkiem pyłu krzemionkowego. Próbkę wykonano z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R o gęstości 3,1 [kg dm⁻³] oraz pyłu krzemionkowego z huty Łaziska o gęstości 2,2 [g cm⁻³]. Pył krzemionkowy spełniał wymagania określone w normie PN-EN-13263 + A1:2010 i nie stanowił zagrożenia radiologicznego.

Badania polegały na porównaniu właściwości betonów zwykłych wytworzonych w tradycyjny sposób oraz betonów zawierających w swoim składzie odpad przemysłu hutniczego – pył krzemionkowy. Przygotowano dwa rodzaje próbek betonu: bez żadnych dodatków i z dodatkiem 5, 10 i 15% pyłu krzemionkowego.

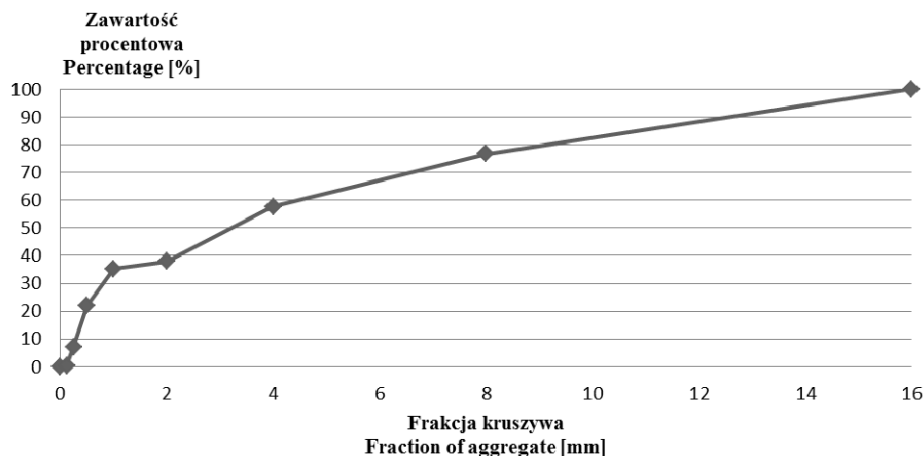
Badania wykonano w Laboratorium Budowlanym Katedry Inżynierii Budowlanej oraz Pracowni Procesów Fizycznych w Budownictwie Centrum Wodnego Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Zgodnie z normą PN-EN-206-1:2003 badano następujące właściwości: gęstości mieszanki betonowej, konsystencję mieszanki betonowej metodą stożka opadowego, zawartości powietrza w mieszance betonowej, wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach, wytrzymałość betonu na zginanie po 28 dniach, nasiąkliwość, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, mrozoodporność.

WYNIKI BADAŃ

Zarówno w próbkach niezawierających dodatków, jak i w próbkach z dodatkiem pyłu krzemionkowego zachowano stały skład granulometryczny kruszywa i procentową zawartość poszczególnych frakcji dobraną metodą iteracji (tab. 3).

Tabela 3. Zestawienie wyników doboru kruszywa metodą iteracji
Table 3. Summary results of aggregate selection by iteration method

Fracja kruszywa Fraction of aggregate	Procentowy stosunek zmieszania frakcji Percentage of the mixing fraction			Skład ziarnowy piasku Composition of sand	Procentowy skład kruszywa f_i Percentile composition of the aggregate f_i	Wskaźniki wodne w_k Water indexes	Wodożądność kruszywa Water demand of aggregate
	I etap I stage	II etap II stage	III etap III stage				
0–0,125				0,99	0,4	0,240	0,096
0,125–0,250				17,82	6,8	0,106	0,721
0,250–0,5			38	39,59	15,0	0,072	1,080
0,5–1,0				34,31	13,0	0,052	0,676
1,0–2,0				7,31	2,7	0,038	0,103
2,0–4,0		32			19,8	0,029	0,574
4,0–8,0	45	68	62		19,0	0,023	0,437
8,0–16,0	55				23,3	0,018	0,419
Suma							0,0411



Rys. 1. Krzywa uziarnienia
Fig. 1. Granulation curve

Założenia do projektowania mieszanki betonowej

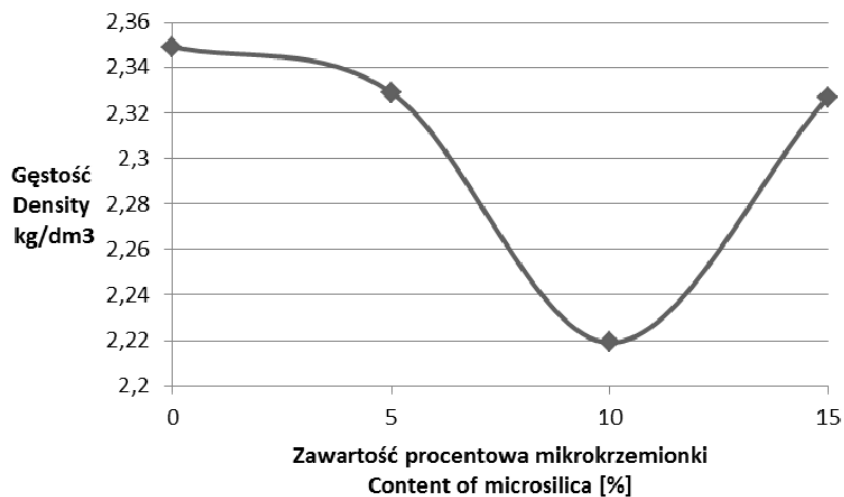
Dobór składników betonu. Receptury mieszanek betonowych betonu zwykłego bez dodatków i z dodatkiem pyłu krzemionkowego (tab. 4) ustalono na podstawie metody obliczeniowej opartej na trzech równaniach Bukowskiego [Jamróży 2005].

Tabela 4. Receptury mieszanek betonowych
Table 4. Formulas of the concrete mix

Skład mieszanki Composition of the concrete mix	Woda – Water (dm ³ m ⁻³)	Kruszywa – Aggregate (kg m ⁻³)	Cement – Cement (kg m ⁻³)	Mikrokrzemionka Microaggregate MK (kg m ⁻³)
Bez dodatków Without additives	174,73	1817,25	426,33	
5% MK	174,73	1817,25	402,65	21,20
10% MK	174,73	1817,25	373,95	41,55
15% MK	174,73	1817,25	346,38	61,13

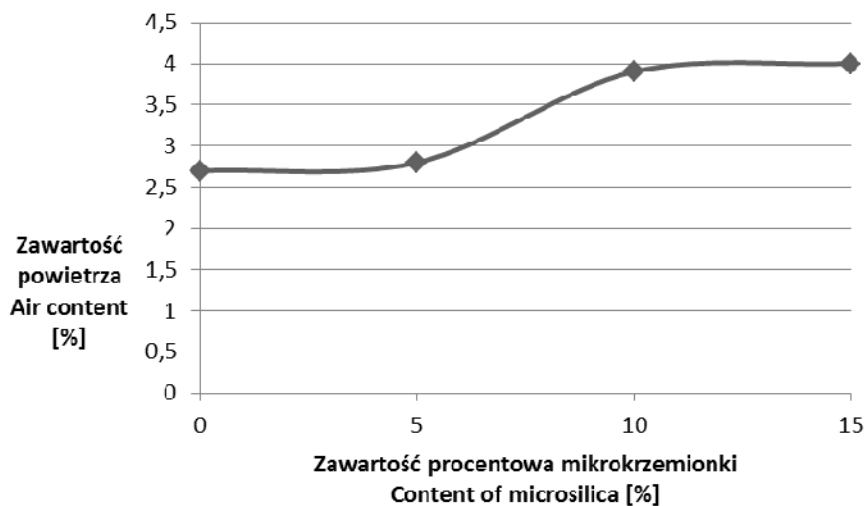
Badanie gęstości. Badanie gęstości mieszanki betonowej wykonano zgodnie z normą PN-EN 12350-6:2011. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.

Gęstość mieszanki betonowej bez dodatków wynosiła 2,349 kg dm⁻³ i była największą spośród badanych. Mieszanki z dodatkiem 5 i 15% mikrokrzemionki miały nieco mniejszą gęstość niż mieszanka bez dodatków (2,329 kg dm⁻³ i 2,327 kg dm⁻³), natomiast mieszanka zawierająca 10% pyłu krzemionkowego charakteryzowała się najmniejszą gęstością (2,219 kg dm⁻³).



Rys. 2. Gęstość mieszanki betonowej w zależności od zawartości mikrokrzemionki
Fig. 2. Density of the concrete mix depending to content of microsilica

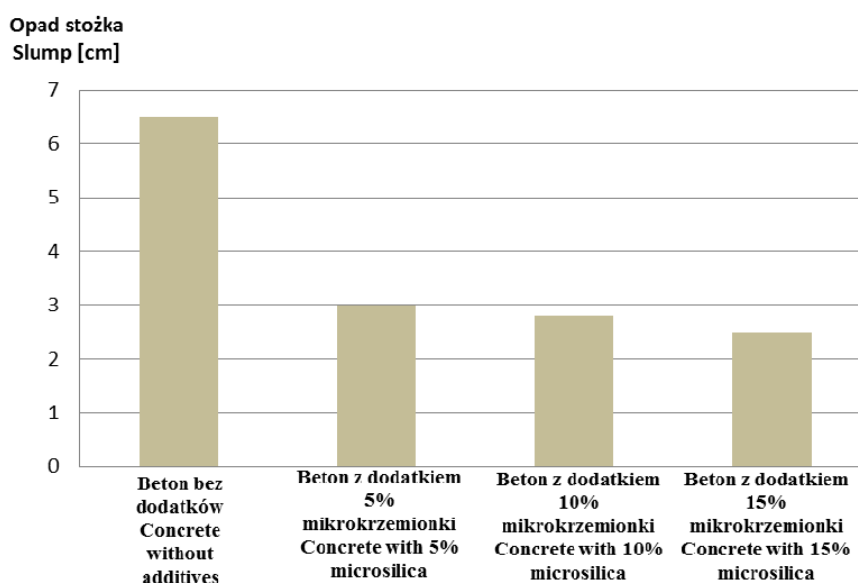
Badanie zawartości powietrza. Badanie zawartości powietrza przeprowadzono metodą ciśnieniową, wykorzystując zjawisko stałości iloczynu ciśnienia i objętości [PN-EN 12350-7:2001]. Nadciśnienie wywierane na mieszankę betonową powoduje zmianę objętości, co z kolei prowadzi do ewakuacji zawartego w niej powietrza. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zawartość powietrza w zależności od procentowej zawartości mikrokrzemionki
Fig. 3. Air content depending on percentage content of microsilica

Analizując wyniki badania zawartości powietrza, stwierdzono bardzo zbliżone wartości dla mieszanki bez dodatku i mieszanki z 5% dodatkiem mikrokrzemionki (2,7 i 2,8%). Zawartość powietrza w pozostałych mieszankach była znacznie wyższa. Mieszanka z 10% udziałem pyłu krzemionkowego zawierała 3,9% powietrza, a z 15% – aż 4% powietrza.

Badanie konsystencji mieszanki betonowej. Badanie konsystencji mieszanek betonowych wykonano zgodnie z normą PN-EN 12350-2:2011. Wyniki pomiarów uzyskane metodą stożka opadowego dla betonu bez domieszek oraz dla betonu z domieszką pyłu krzemionkowego przedstawiono na rysunku 4.



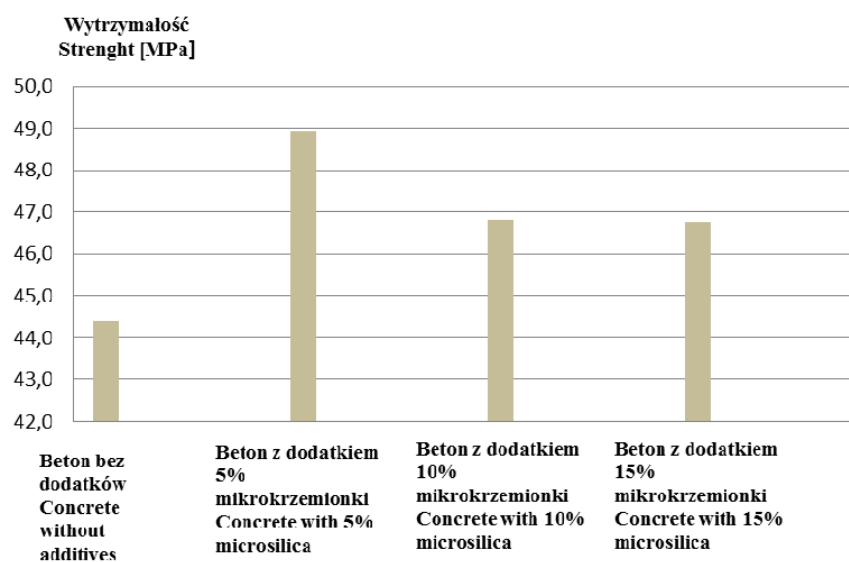
Rys. 4. Opad stożka w zależności od dodatku mikrokrzemionki
Fig. 4. Slump depending on addition of microsilica

Mieszanka bez dodatku charakteryzowała się opadem stożka równym 6,5 cm, co odpowiada klasie konsystencji S2. Mieszanki betonowe z dodatkiem mikrokrzemionki odznaczyły się zauważalnie mniejszym opadem stożka. Pięcioprocentowy dodatek pyłu krzemionkowego spowodował zmniejszenie opadu stożka do 3,0 cm, mieszanka z 10% dodatkiem – 2,8 cm, a mieszanka z 15% dodatkiem – 2,5 cm. Wszystkie mieszanki zawierające dodatek pyłu krzemionkowego uzyskały konsystencję S1.

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie. Badanie wytrzymałości próbek betonowych na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 w maszynie wytrzymałościowej. Badania przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania betonu na próbkach B-kostki sześciennie o boku 150 mm. Wyniki przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 5.

Tabela 5. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie
Table 5. Investigation results on concrete compressive strength

Wyszczególnienie	Nr	Masa Mass (g)	Wymiary Dimensions (mm)			Siła Force (kN)	Wytrż. Strength (MPa)	Średnia wytrż. Average strength (MPa)
Beton bez dodatków Concrete without additives	1	8069	150,5	150,37	150,8	1035,9	45,7	44,4
	2	8050	150,9	150,64	150,3	998,1	43,9	
	3	8123	151,5	151,01	150,9	999,0	43,6	
Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki Concrete with 5% micro- silica	1	8095	151	151,49	150,8	1098,9	48	48,9
	2	8025	149,9	151,22	151,1	1070,8	47,2	
	3	8070	150,2	151,98	150,6	1178,3	51,6	
Beton z dodatkiem 10% mikrokrzemionki Concrete with 10% microsilica	1	7691	150,8	150,32	150,4	994,4	43,8	46,8
	2	7812	150,7	151,08	150,7	1103,3	48,4	
	3	7770	149,8	150,61	150,7	1088,6	48,2	
Beton z dodatkiem 15% mikrokrzemionki Concrete with 15% microsilica	1	7943	150,6	149,19	150,2	1051,3	46,7	46,8
	2	7989	150,4	151,2	151,5	1129	49,6	
	3	7962	150,5	152,45	150,9	1009,7	44	



Rys. 5. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach
Fig. 5. Average of compressive strength concrete after 28 days

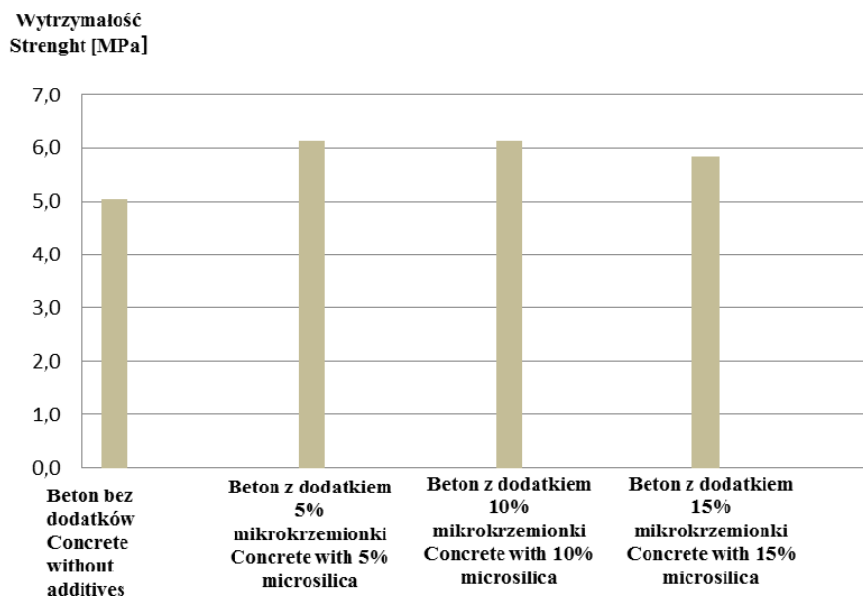
Wytrzymałość betonu na ściskanie znacznie przewyższyła klasę wytrzymałościową, która była przyjęta w założeniach (C20/25). Wytrzymałość na ściskanie betonu bez dodatków kształtowała się w granicach 43,6–45,7 MPa, co dało średnią 44,4 MPa. Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki odznaczał się największą wytrzymałością na ściskanie – 48,9 MPa; beton z dodatkiem 10% pyłu krzemionkowego – 43,8–48,4 MPa, co dało średnią 46,8 MPa. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek z zawartością 15% dodatku wyniosła tyle samo, co próbki z zawartością 10%, tzn. 46,8 MPa. Wytrzymałość pojedynczych próbek zawierała się w przedziale 44,0–49,6 MPa.

Badanie wytrzymałość betonu na zginanie. W tabeli 6 przedstawiono wyniki wytrzymałości na zginanie próbek betonowych w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $10 \times 10 \times 50$ cm.

Tabela 6. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie i odległość przełamania próbki
Table 6. Investigation results on flexural strength and break distance

Wyszczególnienie	Nr	Masa Mass [g]	Wymiary Dimensions [mm]		Siła Force [kN]	Wytr. Strength [MPa]	Średnia wytr. Average strength [MPa]	Odł. przełamania Break distance [cm]
Beton bez dodatków Concrete without additives	1	12042	101,6	500	100,52	13,4	3,9	25
	2	11942	100,4	500	100,53	18,0	5,3	22
	3	11979	100,9	500	100,72	20,2	5,9	23
Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki Concrete with 5% microsilica	1	11861	100,6	500	100,05	19,9	5,9	22
	2	11885	100,8	500	99,86	20,9	6,2	6,1
	3	11877	100,4	500	100,22	21	6,2	24
Beton z dodatkiem 10% mikrokrzemionki Concrete with 10% microsilica	1	11507	101,1	500	100,30	20,4	6,0	25
	2	11668	101,9	500	100,37	21,5	6,3	6,1
	3	11646	100,9	500	100,84	20,8	6,1	24
Beton z dodatkiem 15% mikrokrzemionki Concrete with 15% microsilica	1	11993	102	500	100,25	21,3	6,2	23
	2	11791	101,4	500	100,11	18,6	5,5	5,8
	3	11934	101,8	500	100,3	19,7	5,8	24

Wytrzymałość na zginanie betonu bez dodatku okazała się najmniejsza. Wartość wytrzymałości poszczególnych próbek kształtowała się w granicach 3,9–5,9 MPa, a średnia wyniosła 5,1 MPa. Odległość przełamania zmieniała się od 22 cm do 25 cm. Próbki z betonu z dodatkiem 5 i 10% mikrokrzemionki wykazały taką samą średnią wytrzymałości na zginanie, 6,1 MPa. Odległość przełamania zawierała się w przedziale 22–25 cm. Beton z dodatkiem 15% mikrokrzemionki odznaczał się nieco mniejszą wytrzymałością na zginanie niż próbki z dodatkiem 5 i 10% – wyniosła ona średnio 5,8 MPa, a odległość przełamania zmieniała się od 21 do 24 cm.



Rys. 6. Średnia wytrzymałość próbek betonu na zginanie
Fig. 6. Average flexural strength of concrete

Badanie nasiąkliwości betonu. Zjawiskiem niepożądanym dla betonów jest nasiąkliwość, ponieważ obniża odporność i może prowadzić do większej podatności na działanie mrozu. Nasiąkliwość dla betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych nie powinna być większa niż 5%, a dla betonów osłoniętych przed działaniem czynników atmosferycznych – 9% [Mizera 2000].

W celu sprawdzenia nasiąkliwości przygotowano po 5 próbek każdego rodzaju mieszanki. Pomiędzy 3 a 28 dniem twardnienia próbki przebywały całkowicie zanurzone w wodzie w temperaturze $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2001, badanie nasiąkliwości próbek rozpoczęto bezpośrednio po zakończeniu okresu ich pielęgnacji. Po 28 dniach twardnienia próbki wyjęto z wody, wytarto do sucha oraz zważono. Następnie próbki poddano suszeniu w komorze badań cieplnych KBC 125G w temperaturze 110°C , aż do otrzymania stałej masy. Po wysuszeniu próbki ponownie zważono. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 7.

Beton bez dodatków cechował się najwyższą nasiąkliwością. Procentowy ubytek masy kształtował w granicach 4,4–4,6%, co dało średnią 4,5%. Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki wykazał się średnią nasiąkliwością 3,4%. Próbki z zawartością 10% pyłu krzemionkowego odznaczały się średnią nasiąkliwością 2,4%. Najmniejszy procentowy ubytek masy wystąpił w betonie z 15% dodatkiem mikrokrzemionki i wyniósł 1,9–2,3% (średnio 2,1%).

Tabela 7. Wyniki badania nasiąkliwości betonu
Table 7. Investigation results on concrete water absorption

Wyszczególnienie	Próbka Sample	Masa próbki max nasyconej Mass of satu- rated sample (kg)	Masa próbki wysuszonej Mass of dried sample (kg)	Nasiąkliwość Absorption n _w (%)	Wartość średnia Average n _w (%)
Beton zwykły Concrete without additives	1	6,145	5,886	4,4	4,5
	2	5,662	5,419	4,5	
	3	5,175	4,949	4,6	
	4	5,242	5,011	4,6	
	5	5,529	5,291	4,5	
Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki Concrete with 5% microsilica	1	4,916	4,734	3,8	3,4
	2	5,306	5,137	3,3	
	3	5,612	5,421	3,5	
	4	5,224	5,056	3,3	
	5	5,453	5,298	2,9	
Beton z dodatkiem 10% mikrokrzemionki Concrete with 10% microsilica	1	5,748	5,62	2,3	2,4
	2	6,56	6,401	2,5	
	3	6,034	5,893	2,4	
	4	5,567	5,443	2,3	
	5	5,965	5,821	2,5	
Beton z dodatkiem 15% mikrokrzemionki Concrete with 15% microsilica	1	6,813	6,667	2,2	2,1
	2	6,19	6,049	2,3	
	3	5,872	5,756	2,0	
	4	6,126	6,011	1,9	
	5	5,798	5,680	2,1	

Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Badanie to sprawdza zdolność betonu do przeciwstawienia się przepływowi wody pod ciśnieniem (od tego zależy odporność korozyjna betonu). Badanie polega na oddziaływaniu strumienia wody pod ciśnieniem 0,5 MPa na oszlifowaną ścianę próbki przez 72 godz. Do badania użyto próbek sześciennych o krawędzi 150 mm, po 28 dniach dojrzewania.

Beton bez dodatków cechował się największą głębokością penetracji wody pod ciśnieniem – 6,4 oraz 6,5 cm w głąb próbki. Mniejszą głębokością odznaczył się beton z 5% dodatkiem mikrokrzemionki (6,2 cm i 5,3 cm). Próbki betonowe zawierające 10% pyłu krzemionkowego charakteryzowały się większą szczelnością od poprzednich, a głębokości penetracji wody wyniosły 4,9 i 4,7 cm. Najbardziej szczelne okazały się próbki z dodatkiem 15% mikrokrzemionki. Głębokości znacząco się zmniejszyły w porównaniu z poprzednimi próbkami i były równe 2,8 cm oraz 1,5 cm.



Fot. 1. Stanowisko do badań głębokości penetracji wody w betonie
Phot. 1. Device for investigation on water penetration depth in concrete

Badanie mrozoodporności. Badanie mrozoodporności przeprowadzono na 12 próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm po 28 dniach dojrzewania. Połowa próbek została umieszczona w komorze mrozowej na czas 150 cykli (3 cykle na dobę). Pojedynczy cykl składał się z zamrożenia próbki do temperatury -19°C i rozmrożenia w temperaturze 22°C . Pozostałe 6 próbek (świadki) umieszczono w pojemniku z wodą w celu dalszego dojrzewania. Po zakończeniu 150 cykli, próbki zostały poddane próbie wytrzymałości na ściskanie. Jeśli średnia wytrzymałość próbek poddanych zamrożeniu nie spada o więcej niż 20% w stosunku do świadków, to przyjmuje się, że beton jest mrozoodporny.



Fot. 2. Komora służąca do badania mrozoodporności materiałów budowlanych
Phot. 2. Chamber for frost resistance testing of building materials

Tabela 8. Wyniki badań mrozoodporności betonu
Table 8. Results of investigation on concrete frost resistance

Próbka Sample	Masa Mass G ₁ (kg)	Masa Mass G ₂ (kg)	Wymiary Dimensions (mm)			Siła Force (kN)	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength (MPa)		f _{cm} (MPa)		
							odczyt	*0,95			
Beton zwykły Concrete without additives	zmrożone frozen	1	2,388	2,390	99,37	100,37	100,16	645,2	64,7	61,5	57,3
		2	2,396	2,400	101,28	100,49	100,34	614,3	60,4	57,4	
		3	2,406	2,410	100,49	100,93	100,37	521,3	51,4	48,8	
		4	2,389	2,390	100,72	100,44	100,25	653,1	64,6	61,4	
		5	2,385	2,387	100,91	99,49	100,18	575,2	57,3	54,4	
		6	2,399	2,400	100,27	100,05	100,49	636,8	63,5	60,3	
	świadki	7	2,380	-	100,55	100,93	100,52	727,5	71,7	68,1	65,3
		8	2,372	-	100,98	100,38	100,12	657,7	64,9	61,7	
		9	2,343	-	100,94	100,16	100,70	703,7	69,6	66,1	
		10	2,376	-	100,13	100,95	100,60	721,5	71,4	67,8	
		11	2,365	-	100,38	99,86	100,34	687,8	68,6	65,2	
		12	2,354	-	100,51	99,11	100,68	661,5	66,4	63,1	
Dodatek 5% mikrokrzemionki Concrete with 5% microsilica	zmrożone frozen	1	2,385	2,387	100,97	101,21	100,84	623,1	61,0	58,0	55,0
		2	2,4	2,401	100,82	101,72	100,49	593,2	57,8	54,9	
		3	2,345	2,348	100,81	100,66	99,9	582,5	57,4	54,5	
		4	2,364	2,365	100,18	100,49	100,37	592,6	58,9	56,0	
		5	2,346	2,348	100,49	100,72	100,25	558,9	55,2	52,4	
		6	2,389	2,390	100,52	100,91	100,18	576,9	56,9	54,1	
	świadki	7	2,348	-	100,13	102,18	99,82	716,4	70,0	66,5	68,1
		8	2,369	-	100,54	100,68	100,62	734,6	72,6	69,0	
		9	2,355	-	100,43	100,18	100,32	723,8	71,9	68,3	
		10	2,349	-	100,70	100,27	100,93	715	70,8	67,3	
		11	2,361	-	100,60	100,55	100,38	722,3	71,4	67,8	
		12	2,363	-	100,34	100,98	100,16	740,7	73,1	69,4	
Dodatek 10% mikrokrzemionki Concrete with 10% microsilica	zmrożone frozen	1	2,282	2,283	100,79	100,2	100,52	608,3	60,2	57,2	52,9
		2	2,292	2,294	100,75	100,71	100,7	576,0	56,8	54,0	
		3	2,355	2,356	102,88	102,38	101,2	554,2	52,6	50,0	
		4	2,309	2,311	100,68	100,43	100,49	576,1	57,0	54,2	
		5	2,297	2,299	100,84	100,70	100,72	543,8	53,6	50,9	
		6	2,343	2,346	100,49	100,60	100,91	544,6	53,9	51,2	
	świadki	7	2,251	-	100,43	101,55	100,5	716,0	70,2	66,7	65,7
		8	2,293	-	100,9	101,18	100,15	705,7	69,1	65,6	
		9	2,277	-	100,78	100,45	100,09	697,3	68,9	65,5	
		10	2,283	-	100,52	100,13	100,79	701,6	69,7	66,2	
		11	2,279	-	100,12	100,54	100,75	698,3	69,4	65,9	
		12	2,261	-	100,70	100,43	102,88	687,1	67,9	64,5	
Dodatek 15% mikrokrzemionki Concrete with 15% microsilica	zmrożone frozen	1	2,391	2,396	100,39	103,26	100,6	586,7	56,6	53,8	52,8
		2	2,377	2,380	100,53	103,05	100,74	566,2	54,7	52,0	
		3	2,417	2,418	100,81	101,18	100,68	593,5	58,2	55,3	
		4	2,389	2,391	100,66	100,24	100,03	553,4	54,8	52,1	
		5	2,383	2,384	100,49	100,45	100,97	538,9	53,4	50,7	
		6	2,402	2,404	100,72	100,67	100,11	567,1	55,9	53,1	
	świadki	7	2,245	-	100,46	101,51	100,23	749,3	73,5	69,8	68,6
		8	2,358	-	101,3	100,77	100,25	724,1	70,9	67,4	
		9	2,34	-	100,47	99,47	100,49	741,9	74,2	70,5	
		10	2,331	-	100,56	100,64	100,62	735,5	72,7	69,1	
		11	2,289	-	100,36	99,96	100,21	715,3	71,3	67,7	
		12	2,276	-	100,90	101,53	99,89	720,7	70,4	66,9	

W tabeli 8 umieszczono wyniki badań mrozoodporności. Porównano masę próbek mrożonych przed włożeniem ich do komory mrozowej oraz po zakończeniu wszystkich cykli mrożenia. Badanie zostało przeprowadzone na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm, dlatego odczytany wynik został pomnożony przez współczynnik 0,95.

W żadnym z przypadków nie zaobserwowano pęknięć, zniszczonych krawędzi i narożników lub odprysków kruszywa. Masy próbek przed zamrożeniem i po przeprowadzeniu cyklu mrożenia nieznacznie się różniły lub były takie same. W żadnym przypadku nie wystąpiła obniżka masy.

Próbki betonowe bez dodatku po mrożeniu (28 dni dojrzewania i 50 dni w komorze mrozowej) osiągnęły wytrzymałość na ściskanie w granicach 48,8–61,5 MPa (średnia 57,3 MPa). Ich świadki, tj. próbki wykonane również bez dodatku mikrokrzemionki, ale niepoddane działaniu mrozu i o okresie dojrzewania 78 dni, uzyskały średnią wytrzymałość 65,3 MPa. Efekt mrożenia wyrażał się obniżeniem wytrzymałości na ściskanie o 12,2%

Beton z dodatkiem 5% pyłu krzemionkowego po mrożeniu cechował się wytrzymałością 52,4–58,0 MPa, natomiast średnia wytrzymałość tych próbek wyniosła 55,0 MPa. Próbki z zawartością 5% dodatku niepoddane działaniu mrozu osiągnęły wytrzymałość średnią 68,1 MPa. Zamrożenie spowodowało obniżenie wytrzymałości na ściskanie o 19,2%. Próbki mrożone, zawierające 10% pyłu krzemionkowego, odznaczały się wytrzymałością w granicach 50,0–57,2 MPa, co dało średnią 52,9 MPa. Próbki-świadki wykazały średnią wytrzymałość 65,7 MPa. Efekt mrożenia wyrażał się obniżeniem wytrzymałości na ściskanie o 19,4%. Próby po mrożeniu, zawierające największą ilość mikrokrzemionki, charakteryzowały się najniższą średnią wytrzymałością na ściskanie (52,8 MPa), natomiast próbki niepoddane mrożeniu osiągnęły najwyższą wytrzymałość średnią równą 68,6 MPa. Zaobserwowano obniżenie wytrzymałości na ściskanie o 23,0%.

PODSUMOWANIE

Oceny wpływu pyłu krzemionkowego na właściwości betonu dokonano na podstawie wyników badań mieszanek betonowych (gęstości, zawartości powietrza i konsystencji) i betonu (wytrzymałości na ściskanie i zginanie, nasiąkliwości, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem oraz wpływu mrozoodporności). Wykazano wyraźny wpływ zawartości mikrokrzemionki w mieszance na jej właściwości technologiczne, a także na wytrzymałość betonu i inne badane cechy fizyczne. Mikrokrzemionka znacznie wpłynęła na właściwości mieszanki betonowej. Dodatek 5 i 15% pyłu krzemionkowego zauważalnie obniżył gęstość mieszanki betonowej. Najmniejszą gęstość miała mieszanka zawierająca 10% mikrokrzemionki. Zawartość powietrza w dużym stopniu ulegała zmianom. Najmniej zawierała go mieszanka bez dodatków i niewiele więcej mieszanka zawierająca 5% pyłu krzemionkowego. Zawartość dodatku w wysokości 10 i 15% znacznie podniosła zawartość powietrza, osiągając wartości 3,9 i 4%. Dodatek mikrokrzemionki wpłynął na zmianę konsystencji. Mieszanka betonowa niezawierająca mikrokrzemionki, badana metodą opadu stożka, uzyskała konsystencję S2, natomiast już

5% obecność pyłu krzemionkowego spowodowała zmianę konsystencji mieszanki na S1.

Wytrzymałość na ściskanie betonu zawierającego mikrokrzemionkę okazała się po 28 dniach większa od wytrzymałości betonu bez dodatków. Największą wytrzymałość odnotowano dla betonu zawierającego 5% dodatku. Betony zawierające 10 i 15% mikrokrzemionki uzyskały taką samą wartość średnią wytrzymałości, większą od betonu bez dodatku i mniejszą od betonu z 5% dodatkiem pyłu krzemionkowego.

Wytrzymałość na zginanie również jest większa dla próbek z dodatkiem mikrokrzemionki. Zawartość 5 i 10% dodatku odznaczała się największą wartością średnią wytrzymałości równą 6,1 MPa. Beton zawierający 15% pyłu krzemionkowego osiągnął wytrzymałość nieco mniejszą niż beton z dodatkiem 5 i 10%, ale nadal znacznie większą od betonu bez dodatków.

Nasiąkliwość betonu bez dodatku wyniosła 4,5%, czyli może on być bezpośrednio narażony na działanie czynników atmosferycznych. Wraz ze zwiększającą się zawartością mikrokrzemionki nasiąkliwość betonu maleje. Dla betonu z 15% dodatkiem nasiąkliwość wynosi tylko 2,1%, czyli ponad dwa razy mniej niż betonu bez dodatku.

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w betonie bez dodatku jest największa i wynosi 6,4 i 6,5 cm. Beton z dodatkiem 5% mikrokrzemionki miał nieco mniejszą głębokość penetracji wody. Betonu bez dodatków i betonu z dodatkiem 5% mikrokrzemionki nie można zakwalifikować do betonów wodoszczelnych (beton za wodoszczelny uznaje się, gdy głębokość penetracji wody pod ciśnieniem dla każdej próbki jest mniejsza niż 5 cm). Do tej grupy możemy zaliczyć betony z 10 i 15% zawartością mikrokrzemionki. Im większa zawartość dodatku pyłu krzemionkowego, tym mniejsza głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

Wymagana mrozoodporność betonu osiągnana jest po spełnieniu następujących warunków: brak pęknięć, łączna masa ubytków nie przekracza 5% próbek betonowych niepoddanych mrożeniu, spadek wytrzymałości na ściskanie do 20% w stosunku do niezamrażanych próbek. Mikrokrzemionka jako dodatek obniżyła znacznie wytrzymałość na ściskanie po cyklu mrożenia próbek. Beton zawierający 15% pyłu krzemionkowego nie osiągnął stopnia mrozoodporności, gdyż spadek wytrzymałości przekroczył 20%. Reszta projektowanych betonów osiągnęła wymagany stopień mrozoodporności. Najmniejszy ubytek wytrzymałości na ściskanie miały próbki bez zawartości dodatku mikrokrzemionki.

PIŚMIENNICTWO

- Dondelewski, H., Januszewski, M. (2008). *Betony cementowe*. Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa.
- Jamroży, Z. (2005). *Beton i jego technologie*. Wyd. Nauk. PWN, 175.
- Katzer, J. (1996). Szczelny beton z dodatkiem mikrokrzemionki modyfikowany superplastyfikatorem. *Mat. Bud.* 11(22) 291.
- Mizera, J., red. (2000). *Ćwiczenia laboratoryjne z materiałów budowlanych i technologii betonu*. Wyd. 2. Politechnika Opolska.
- PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- PN-EN 12390-2:2011: *Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*.

- PN-EN 12390-3:2011: Badanie betonu. Część 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- PN-EN 12390-5:2011: Badania betonu. Część 5. Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- PN-EN 12350-2:2011: Badania mieszanki betonowej. Część 2. Badania konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6:2011: Badanie mieszanki betonowej. Część 6. Gęstość.
- PN-EN 12350-7:2011: Badania mieszanki betonowej. Część 7. Badania zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- PN-88/B-06250: Beton zwykły (norma nieobowiązująca).
- PN-EN 13263-1+A1:2010: Pył krzemionkowy do betonu. Część 1. Definicje, wymagania i kryteria zgodności.

CONCRETE MODIFIED WITH SILICA DUST

Abstract. Concrete is the material of basic significance in building construction. It also plays essential role in agriculture and food industry. The aim of this study was to compare selected properties of a concrete mix and mature concrete, depending on the percentage of silica dust (microsilica). The greatest potential for reuse of waste has the building materials industry. There was designed a concrete with the composition as for the C20/25 concrete without any silica dust as well as three concrete types containing respectively 5, 10, 15% silica dust. The concrete mixes were subjected to the slump test and air content test, the matured concrete – compressive and bending strength test, the test of penetration depth of water under pressure, water absorption test and frost resistance test. The investigations showed the usefulness of silica dust as a material for the production of concrete.

Key words: concrete mix, concrete, silica dust