

mgr inż. Piotr Fudalej*
dr inż. Michał Wieczorek*

*Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

Alternatywne dodatki z recyklingu do betonu samozagęszczalnego

Alternative additives for recycled self-compacting concrete.

Streszczenie

Beton SCC musi zawierać w swoim składzie duże ilości frakcji pylastych, aby uzyskać odpowiednie właściwości reologiczne. Sposobem na uzupełnienie ich ilości w mieszance SCC jest użycie zwiększonej ilości cementu i/lub dodatków. Zwiększenie ilości cementu nie jest rozwiązaniem najlepszym z uwagi na dużą emisyjność CO₂ przy produkcji cementu oraz koszty produkcji betonu. Drugie rozwiązanie, tj. stosowanie odpowiednich dodatków do betonu jest rozwiązaniem lepszym, powszechnie stosowanym. Z uwagi na duże wykorzystanie żużli oraz popiołów do produkcji cementu, producenci betonu mają ograniczony dostęp do ww. dodatków. W związku z tym jednym ze składników betonu SCC jest mączka wapienna.

Mączka wapienna jest surowcem pochodzenia naturalnego, którego uzyskanie nie jest obojętne dla środowiska naturalnego. Istnieje tendencja do ograniczania stosowania surowców naturalnych. Jednym ze sposobów, aby uzyskać beton wpływając w jak najmniejszym stopniu na środowisko naturalne jest stosowanie dodatków pochodzących z recyklingu.

Celem projektu była ocena możliwości zagospodarowania odpadów powstających u przetwórców i producentów materiałów budowlanych do wykorzystania w betonie SCC, jako alternatywa dla typowych dodatków. Wykorzystane odpady pochodziły z produkcji materiałów budowlanych do produkcji, której używano naturalnych surowców.

Zostały wytypowane 2 surowce dla których zostały wykonane badania fizyczne i chemiczne zgodnie z przedmiotowymi normami a następnie wykonano betony SCC. Przeprowadzono badania w celu określenia wpływu nowych surowców na właściwości mieszanek i stwardniałego betonu. Zastosowane zostały pyły mineralne uzyskane z obróbki skał magmowych oraz osadowych.

Dokonano porównania betonów w których składzie były dodatki alternatywne z referencyjnym betonem SCC, który zawierał mączkę wapienną.

Pracę podjęto z uwagi na realizację założenia strategii zrównoważonego rozwoju. Działania te podejmowane są zgodnie z inicjatywą „Fit for 55”, która zakłada, że do 2030 roku Unia Europejska zredukuje emisję CO₂ o 55%.

W związku z powyższym istnieje zainteresowanie pozyskaniem surowca pochodzenia alternatywnego, w celu zastąpienia, naturalnych surowców. Jest to jeden ze sposobów obniżenia śladu węglowego w betonie.

Abstract

SCC concrete must contain large amounts of dust in its composition in order to obtain appropriate rheological properties. The way to supplement it in the SCC mixture is the use of increased amounts of cement or additives. Increasing the amount of cement is not the best solution due to the high CO₂ emissions during cement production and costs associated with it. The second solution, i.e. using appropriate additives for concrete is more commonly used solution. Because of the usage of slags and ashes for the production of cement, concrete producers have limited access to the above additives, therefore, one of the ingredients of SCC concrete is limestone flour.

Limestone flour is a raw material of natural origin, which is not neutral to the environment. There is a tendency to limit the use of natural raw materials. One way to get concrete impacting as little as possible the environment is the use of recycled additives.

The aim of the project was to assess the possibilities of managing the waste generated by processors and producers of building materials for use in self-compacting concrete, as an alternative to typical additives. Used waste came from the production of building materials, where natural materials were processed.

Two raw materials were selected for which physical and chemical tests were performed in accordance with the standards in question, also SCC concretes were made.

Tests were carried out on the SCC concretes, in order to determine the impact of the new raw materials on properties of SCC. The project's result allowed for preliminary specification of the suitability of waste additives for the production of SCC concrete. Mineral dust obtained from the processing of igneous and sedimentary rocks was used.

A comparison was made of concretes containing alternative additives with the reference of SCC concrete, which contained limestone powder. The work was undertaken due to the implementation of the sustainable development strategy. These activities are undertaken in line with the "Fit for 55" initiative, which assumes that by 2030, the European Union will reduce CO₂ emissions by 55%.

That is why, there is an interest in obtaining raw materials of alternative origin instead, hence reducing the carbon footprint of concrete.

1. Wprowadzenie

Beton samozagęszczalny jest stosowany w nowoczesnych konstrukcjach, zwłaszcza takich gdzie zastosowane jest bardzo gęste zbrojenie uniemożliwiające układanie betonu w sposób standardowy czyli przez mechaniczne zagęszczanie [1,2,4]. Po raz pierwszy został opracowany w Japonii pod koniec lat 80-tych przez H. Okamurę i był stosowany w konstrukcjach w Japonii [1,2]

Istotą betonu SCC są specyficzne właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Dzięki takim właściwościom mieszanka SCC ma zdolność całkowitego i szczelnego wypełnienia grawitacyjnego formy, nawet w obecności gęstego zbrojenia [1-4]. Posiada także zdolność do samodzielnego wydalenia niepożądanych pęcherzyków powietrza, z zachowaniem jednorodności struktury. Beton SCC musi charakteryzować się właściwą urabialnością.

Na urabialność mieszanki betonowej (zwłaszcza w betonie SCC) wpływają jej parametry reologiczne. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych zależą od

bardzo wielu czynników m.in. od rodzaju i ilości dodatku, wskaźnika W/S, domieszek – głównie superplastyfikatora oraz domieszki napowietrzającej, a także innych czynników np. temperatury [5,6].

Samorzutne wydalenie powietrza przez mieszanę, jako warunek jej samozagęszczania polega na wypływie pęcherzyków powietrza pod wpływem siły wyporu. Siła wyporu rośnie ze wzrostem objętości pęcherzyka. Wprowadzenie domieszki napowietrzającej dzięki bardzo małej średnicy pęcherzyków powietrza powoduje, że nie wydostają się one z zaczynu mieszanki SCC dzięki jej lepkości, kształtując strukturę stwardniałego betonu [5].

Właściwy dobór domieszek ma ogromne znaczenie przy uzyskaniu właściwej reologii mieszanek SCC, zwłaszcza na kompatybilność układu cement – superplastyfikator [5].

Dodatki mineralne mają bardzo duży wpływ na właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu [1-4,7]. W chwili obecnej trwają poszukiwania nowych, alternatywnych dodatków do betonu, zastępując surowce, których zaczyna brakować tj. popioły, żużle, pyły krzemionkowe. Istnieje także potrzeba zastąpienia dodatku jakim jest naturalna mączka wapienna surowcem alternatywnym z uwagi na ograniczenie redukcji CO₂, kosztu samej mączki wapiennej jak również po to, aby zasoby naturalne służyły jak najdłużej przyszłym pokoleniom.

Dorobek badawczy wg [8] określający wpływ dodatków i domieszek na właściwości reologiczne mieszanek nie jest jeszcze do końca poznany. Jego przegląd i podsumowanie zawarto w [9]. Prac, które opisywałyby zjawiska zachodzące wewnątrz układu cement – dodatek pyłów z przetwórstwa kruszyw – domieszka, w kontekście reologii, oraz zastosowań w betonie SCC jest niewiele.

W technologii betonu samozagęszczalnego dodatki mineralne są niezbędne z uwagi na wymaganą zawartość frakcji pyłowych, która wynosi od 380 do nawet 600 kg/m³ [1,4]. Pozwalają one uzyskać odpowiednią reologię mieszanki betonowej [1-4].

Według normy PN-EN 206+A2:2021-08 dodatki są to drobnoziarniste składniki stosowane w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania specjalnych cech betonu. Norma rozróżnia dwa typy dodatków nieorganicznych:

- Typ I – prawie obojętne: kruszywa wypełniające zgodne z PN-EN 12620 [7] lub PN-EN 13055 oraz barwniki zgodne z PN-EN 12878
- Typ II – o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych: popioły lotne zgodne z PN-EN 450-1, pyły krzemionkowe zgodne z PN-EN 13263-1 żużle wielkopieczowe zgodne z PN-EN 15167-1. Zaproponowane dodatki tj. pyły pochodzące ze skał magmowych oraz osadowych wskazują, że mogą być wykorzystane w betonach SCC.

Istnieją wyniki badań z wykorzystaniem mączki granitowej [10]. Wg autorów [10] dodatek mączki granitowej do betonu SCC zmniejsza „bleeding” i segregację. Autorzy [10] wykazali również optymalną ilość mączki granitowej jako zamiennik części cementu, która wynosi 10 %. Wg autorów [11,12] zastosowanie mączek kamiennych może być bardzo szerokie w technologii betonu, oraz uzasadnione ekonomicznie.

W Polsce beton SCC produkowany jest w niewielkim stopniu (ok 1-2%) z wykorzystaniem głównie w realizacji inwestycji, gdzie niemożliwe jest zastosowanie betonu zwykłego z przyczyn technicznych tj. prawidłowego zagęszczenia. Jednym z przykładów takiego wykorzystania betonu SCC w Polsce jest wykonanie mostu Zamkowego w Rzeszowie przez rzekę Wisłok, czy też budowa City Forum II Multiplex w Gdańsku oraz budowa tunelu Wisłostrady w Warszawie opisane w [13]. Obok

zastosowania betonu SCC w budownictwie kubaturowym beton SCC znajduje również zastosowanie w prefabrykacji betonowej [14].

Prefabrykacja betonowa umożliwia wykonanie prefabrykatów w bardzo wysokim reżimie technologicznym z uwagi na to że beton jest wykonywany na miejscu, w zakładzie. W związku z tym producent ma bardzo duży wpływ na m. in. proces dojrzewania, proces układania itd. Stąd prefabrykacja jest niezastąpiona przy produkcji takich elementów jak np. systemy wodno – kanalizacyjne, słupy, czy elementy drogowe. Stosowanie betonu SCC w tego typu produkcji jest coraz szersze [15,16,17]. Autorzy [16] wykazali, że zastosowanie betonu SCC w prefabrykacji jest uzasadnione ekonomicznie, a stosowanie pyłów z przetwórstwa kruszyw mogłoby tylko tą rentowność jeszcze poprawić. Nie bez znaczenia jest także to, że wykorzystując mączki kamienne inne niż mączki wapienne z przetwórstwa kruszyw ochraniaemy środowisko naturalne.

2. Metody badań

W ramach pracy wykonano badania surowców, mieszanek SCC czy też stwardniałego betonu przy wykorzystaniu polskich norm.

Dla cementu określono: czas wiązania, zmianę objętości, powierzchnię właściwą, wytrzymałość na ściskanie i zginanie, części nierozpuszczalne, straty prażenia, zawartość SO_3 , zawartość CL^- .

Dla dodatków stosowanych w betonie wykonano analizę XRF, wykonano zdjęcia przy pomocy mikroskopu skaningowego, określono gęstość właściwą wg PN-EN 196-6 oraz powierzchnię właściwą PN-EN 196-6.

Dla kruszyw określono skład ziarnowy oraz gęstość właściwą.

Badania SEM wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego z emisją polową firmy Thermo Scientific, model Quattro S.

Obrazowanie mikrostruktury wykonano w warunkach niskiej próżni, z zastosowaniem detektora LVD (obrazowanie elektronami wtórnymi SE – secondary electrons).

Koncepcja betonu SCC wskazuje na stosowanie dużych ilości frakcji pylistych. Z przeglądu literatury wynika [1-4,7], że dodatki mają przede wszystkim rolę lepkociotwórczą (reologia mieszanki) oraz doszczelniającą. Dla mieszanki SCC koniecznym jest wykonanie dodatkowych badań dedykowanych dla mieszanek SCC.

Dla wszystkich zarobów mieszanki betonowej wykonano następujące badania: zawartość powietrza wg PN-EN 12350-7; wskaźnik przepływalności (dla 2 prętów) metodą pojemnika L-box wg PN-EN 12350-10. Zastosowano wariant z 2 prętami. Mierzona objętość mieszanki przepływa poziomo pomiędzy pionowymi gładkimi prętami zbrojenia. Mierzy się wysokość mieszanki H1 w części pionowej i H2 w części poziomej i oblicza stosunek H2/H1.

Określono również średnicę rozplywu SF, czas T_{500} wg normy PN-EN 12350-8. Norma precyzuje procedurę określania maksymalnego rozplywu mieszanki SF i czasu rozplywu T_{500} do średnicy 500 mm. Maksymalna wielkość ziarna nie może przekraczać 40 mm. Określono także wskaźnik VSI wg ACI 237R-07.

Przy określaniu ilości dodatku stosowano skalę VSI do oceny stabilności mieszanki wg ACI 237R-07. Metoda ta polega na ocenie wizualnej mieszanki betonowej po jej badaniu testem rozplywu. Ocenę wg skali VSI przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skala VSI do oceny stabilności mieszanki.

Stopień	Ocena	Kryteria
0	bardzo stabilna	brak oznak segregacji i odsączania
1	stabilna	stabilna niewielkie odsączanie, brak otoczki zaprawy, brak skupiska kruszywa grubego
2	niestabilna	niestabilna niewielkie ślady otoczki zaprawy (<10 mm) lub zgromadzonego kruszywa, lub jednego i drugiego
3	bardzo niestabilna	bardzo niestabilna wyraźna segregacja, duża otoczka zaprawy (>10 mm) i skupisko kruszywa w centrum rozpluw

Zakres badań stwardniałego betonu obejmował następujące oznaczenia: wytrzymałość na ściskanie po 2, 7, 14, 28 i 56 dniach określono na kostkach o wymiarach (150×150×150) mm zgodnie z normą PN-EN 12390-3. Mrozoodporność betonu oznaczono metodą stopnia wewnętrznego zniszczenia betonu i zewnętrznej destrukcji, poprzez ocenę spadku wytrzymałości, ubytku masy i oceny wizualnej dla stopnia mrozoodporności betonu F150 wg normy PN-B-06265. Wykonano również badania nasiąkliwości wytworzonych betonów wg normy PN-88/B-06250. Badanie wodoszczelności wykonano 2 metodami, metodą wg PN-EN 12390-8, oraz wg PN-88/B-06250 – norma ta posiada status normy wycofanej z katalogu PKN. Założono stopień wodoszczelności W8. Badanie ścieralności wykonano metodą Böhmego wg PN-EN 13892-3. Badanie karbonatyzacji wykonano wg EN 12390-12, w którym to badaniu próbki przechowuje się przez okres 70 dni w atmosferze 3% CO₂.

Próbki pielęgnowano w warunkach normowych wg PN-EN 12390-2.

Przeprowadzone badania miały za zadanie wykazać ewentualną przydatność składników alternatywnych do zastosowań w betonie SCC. W przeprowadzonych badaniach zamieniano mączkę wapienną, która jest powszechnie stosowana do tego celu, pyłami pochodzącymi z przetwórstwa kruszyw. Zastosowano pyły mineralne uzyskane z obróbki skał magmowych oraz osadowych. W chwili obecnej firmy produkujące kruszywa borykają się z problemem zagospodarowania pyłów poprodukcyjnych. Z reguły jest to materiał czysty, o składzie chemicznym porównywalnym ze skałą macierzystą, natomiast z uwagi na duże rozdrobnienie nie znajduje zastosowania w betonie w odpowiednio dużej skali.

3. Zastosowane materiały do badań i ich charakterystyka

Cementy

Zastosowano cementy CEM II/B-S 42,5 R-NA oraz cement CEM II/B-M(V-LL)32,5 R gdzie oznaczono próbki jako B-S oraz V-LL.

Przy wyborze cementów do badań kierowano się zasadą, że musi być on szeroko wykorzystywany przez producentów betonu i produkowany przez większość

cementowni w kraju. W tabeli 1 oraz 2 przedstawiono wyniki badań wykorzystanych cementów.

Tabela 1. Właściwości cementu CEM II/B-M(V-LL)32,5R

CEM II/B-M(V-LL)32,5R												
H ₂ O [%]	Czas wiązania		Zmiana objętości [mm]	Pow. właściwa [cm ² /g]	Wytrzymałość na ściskanie		Wytrzymałość na zginanie		Części nierozp. [%]	Strata prażenia [%]	SO ₃ [%]	Cl ⁻ [%]
	Początek [min]	Koniec [min]			2 dni [MPa]	28 dni [MPa]	2 dni [MPa]	28 dni [MPa]				
28,1	195	220	0	4486	20,9	46,9	4,1	7,5	4,82	13,04	2,78	0,035
wg PN-EN 196-3				wg PN-EN 196-6	wg PN-EN 196-1				wg PN-EN 196-2			

Tabela 2. Właściwości cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA

CEM II/B-S 42,5R-NA												
H2O [%]	Czas wiązania		Zmiana objętości [mm]	Pow. właściwa [cm²/g]	Wytrzymałość na ściskanie		Wytrzymałość na zginanie		Części nierozp [%]	Strata prażenia [%]	SO ₃ [%]	Cl ⁻ [%]
	Początek [min]	Koniec [min]			2 dni [MPa]	28 dni [MPa]	2 dni [MPa]	28 dni [MPa]				
30,5	215	245	0	4499	22,9	60,2	4,5	8,3	0,36	1,54	2,33	0,03
wg PN-EN 196-3				wg PN-EN 196-6	wg PN-EN 196-1				wg PN-EN 196-2			

Dodatki

Zastosowano dodatki tj. pyły pochodzące z przetwórstwa kruszyw ze skał osadowych (dodatek A), pyły pochodzące z przetwórstwa kruszyw ze skał magmowych (dodatek C), mączkę wapienną (oznaczono jako „0”)

Zastosowano typową mączkę wapienną stosowaną przez producentów betonu

Produkt powstający na bazie surowca wapiennego, zawierający:

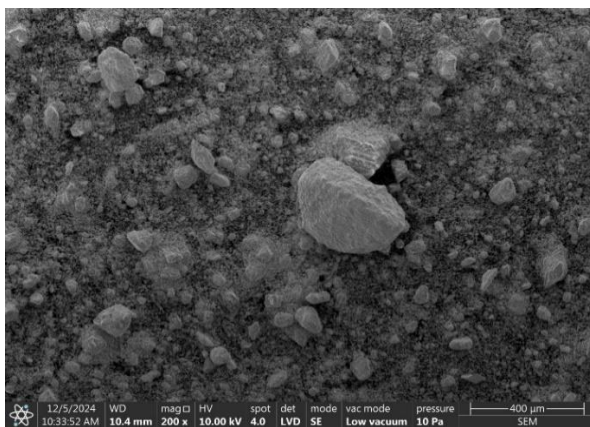
- > 95% węglanu wapnia
- < 1,5% krzemionki
- < 2,0% węglanu magnezu

W tabeli 3 przedstawiono analizę XRF zastosowanych dodatków.

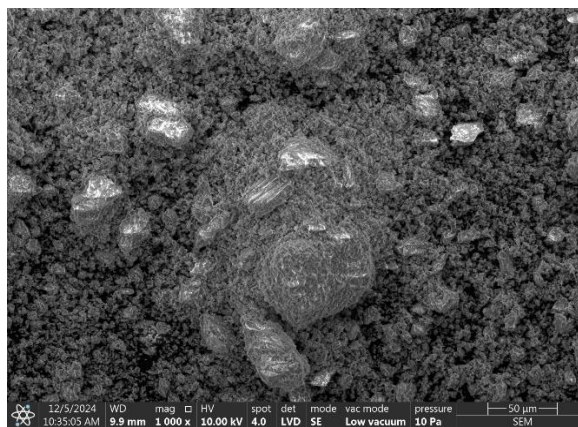
Tabela 3. Analiza XRF pyłów pochodzących z obróbki skał osadowych (dodatek A), magmowych (dodatek C) oraz mączki wapiennej (dodatek „0”)

Badana cecha		Identyfikacja metody badawczej	Wyniki badania		
			Mączka wapienna	Dodatek A pyły osadowe	Dodatek C pyły magmowe
Strata prażenia [%]		PN-EN 196-2:2013-11	43,72	1,97	0,34
Analiza chemiczna spektralna metodą XRF [%]	SiO ₂	PN-EN ISO 12677:2011 PN-EN 196-2:2013-11, p.5	0,491	89,231	73,532
	Al ₂ O ₃		0,115	5,875	13,228
	Fe ₂ O ₃		0,067	0,936	2,160
	CaO		54,991	0,054	1,688
	MgO		0,468	0,125	0,442
	SO ₃		0,014	0,001	0,004
	Na ₂ O		0,051	0,00	3,425
	K ₂ O		0,027	1,155	4,690
	P ₂ O ₅		0,003	0,086	0,117
	TiO ₂		0,007	0,482	0,268
	Mn ₂ O ₃		0,009	0,007	0,057
	SrO		0,026	0,013	0,020
	ZnO		0,013	0,090	0,028

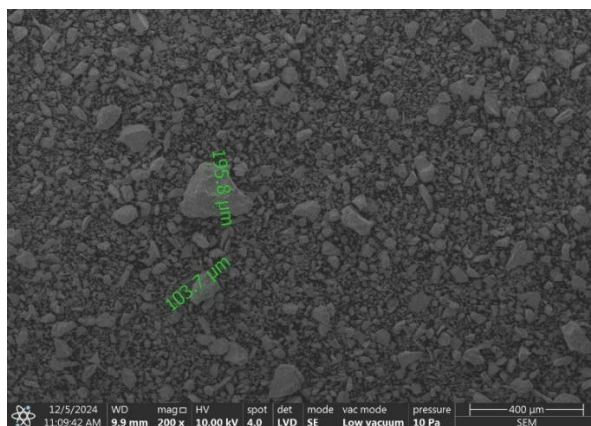
Na rysunkach 1-6 przedstawiono mikrostrukturę próbek mączki wapiennej, pyłów pochodzących z przeróbki skał osadowych oraz pyłów pochodzących ze skał magmowych



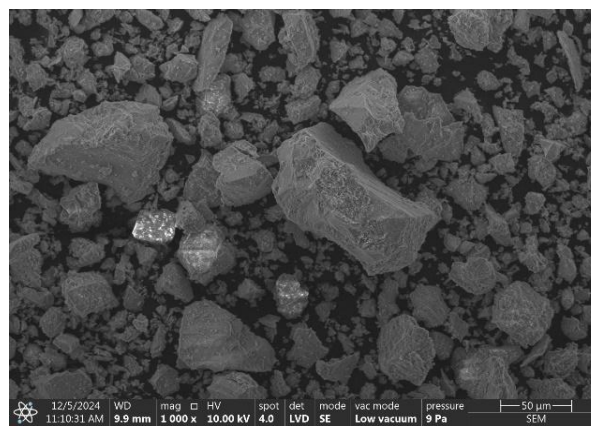
Rys. 1. Mączka wapienna 200 x



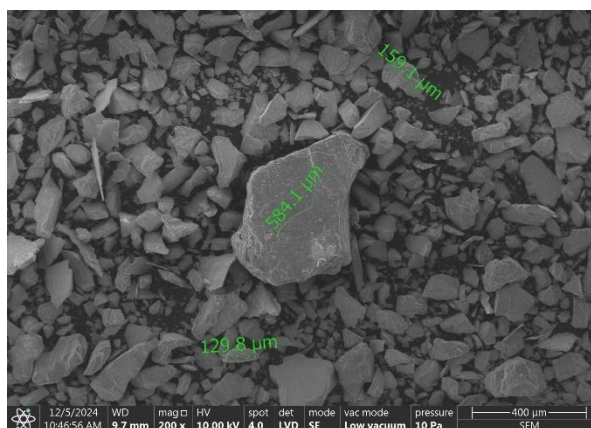
Rys. 2. Mączka wapienna 1000 x



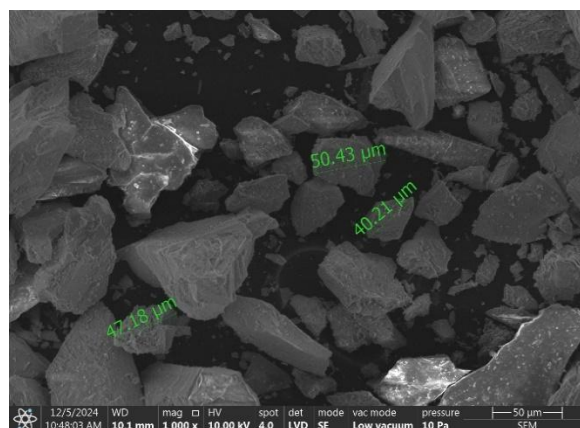
Rys. 3. Pyły osadowe 200x (dodatek A)



Rys. 4. Pyły osadowe 1000 x (dodatek A)



Rys.5. Pyły magmowe 200x (dodatek C)



Rys.6. Pyły magmowe 1000 x (dodatek C)

Określono gęstość właściwą oraz powierzchnię właściwą zastosowanych pyłów mineralnych do betonu. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie gęstości właściwej oraz powierzchni wg Bleine'a zastosowanych pyłów mineralnych

LP	Surowiec	Gęstość właściwa [kg/dm ³]	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]
		wg PN-EN 196-6:2019-01	
1	Mączka wapienna	2,72	5190
2	Pyły pochodzenia osadowego (dodatek A)	2,67	2960
3	Pyły pochodzenia magmowego (dodatek C)	2,67	1020

Kruszywa

Do przygotowania próbek betonowych zastosowano kruszywa zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12620 +A1:2010: piasek płukany 0/2 oraz żwir 2/8 i 8/16.

Skład ziarnowy zastosowanych kruszyw przedstawiono w tabeli 5.

Gęstość właściwa zastosowanych kruszyw wynosiła: piasek = 2,65 [kg/dm³]; żwir 2/8 = 2,64 [kg/dm³]; żwir 8/16 = 2,64 [kg/dm³].

Tabela 5. Skład ziarnowy kruszyw wg PN-EN 933-1:2012.

Sito	Udział [%]		
	Piasek płukany 0/2	Żwir 2/8	Żwir 8/16
0,063	0,9	0,0	0,0
0,125	10,3	0,0	0,0
0,25	62,0	0,0	0,0
0,5	22,5	0,0	0,0
1,0	4,0	5,1	0,0
2,0	0,3	22,9	0,2
4,0	0,0	65,2	2,9
8,0	0,0	6,8	86,6
16,0	0,0	0,0	10,4
32,0	0,0	0,0	0,0

Woda

Zastosowano wodę wodociągową zgodną z normą PN-EN 1008.

Domieszka chemiczna

Zastosowano domieszkę chemiczną upłynniającą na bazie eterów polikarboksylowych spełniającą wymagania PN-EN 934-2.

4. Wyniki badań

W celu wykonania badań zaprojektowano 2 mieszanki referencyjne, w których składzie zastosowano mączkę wapienną, oznaczone jako V-LL „0” oraz B-S „0”, różniące się zastosowanym cementem oraz ilością dodatku mączki wapiennej. Do tak zaprojektowanych mieszanek betonowych dodawano pyły pochodzące z przetwórstwa skał magmowych oraz osadowych. Pozostałe surowce oraz skład pozostawały bez zmian. Dobór ilości dodatku do betonu prowadzony był metodą doświadczalną, zwiększając udział pyłów w składzie mieszanki betonowej do momentu, uzyskania jej jednorodności i stabilności. Robocze składy receptur, w których zwiększano udziały dodatków przedstawiono w tabelach 6-7. Ten sposób postępowania pozwolił określić wpływ ilości oraz rodzaju dodatku na reologię mieszanek, co w rezultacie pozwoliło określić docelowy skład mieszanek, z których wykonano próbki do badań stwardniałego betonu.

Tabela 6. Receptury mieszanek betonowych z cementem CEM II/B-M(V-LL)32,5R

Oznaczenie próbki:		V-LL "0"	V-LL A	V-LL C
Lp	Skład mieszanki betonowej	Skład [kg/m ³]		
1	CEM II/B-M(V-LL)32,5R	350		
2	Mączka wapienna	117		
3	Pyły pochodzące z obróbki skał osadowych (dodatek A)		83,3	
4	Pyły pochodzące z obróbki skał magmowych (dodatek C)			100
5	Piasek 0/2	762		
6	Żwir 2/8	487		
7	Żwir 8/16	487		
8	Domieszka chemiczna	5,25		
9	Woda	168		
SUMA		2376,3	2342,6	2359,3

Tabela 7. Receptury mieszanek betonowych z cementem CEM II/B-S 42,5R-NA

Oznaczenie próbki:		B-S "0"	B-S A	B-S C
Lp.	Skład mieszanki betonowej	Skład [kg/m ³]		
1	CEM II/B-S 42,5 R-NA	350		
2	Mączka wapienna	183,3		
3	Pyły pochodzące z obróbki skał osadowych (dodatek A)		117	
4	Pyły pochodzące z obróbki skał magmowych (dodatek C)			200
5	Piasek 0/2	762		
6	Żwir 2/8	487		
7	Żwir 8/16	487		
8	Domieszka chemiczna	5,25		
9	Woda	168		
SUMA		2442,3	2376,3	2459,3

Badania otrzymanych w ten sposób mieszanek betonowych tj. średnicy rozpląwu SF, czasu T_{500} wg PN-EN 12350-8, wykazały że powyższe parametry są na poziomie zbliżonym do mieszanek referencyjnych, zawierającej w swoim składzie mączkę wapienną [tabela 8]. Zależność ta występuje w podobnym stopniu dla obydwóch zastosowanych cementów oraz wykorzystanych dodatków. We wszystkich przypadkach uzyskano czas $T_{500} > 2$ s określając w ten sposób mieszankę betonową jako spełniającą klasę lepkości VS2. Średnica rozpląwu w większości przypadków mieściła się w przedziale 660-750 mm pozwalając na tej podstawie zakwalifikować mieszanki betonowej do klasy SF2.

W próbkach oznaczonych jako V-LL A jako V-LL C średnica rozpląwu po 30 minutach wynosiła 630 i 640 mm. Przedział wartości dla klasy SF1 wg PN-EN 206+A2:2021 wynosi od 550-650 mm. Wartość ta znajduje się w górnej granicy klasy SF1.

Wyniki badania świeżych mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 8.

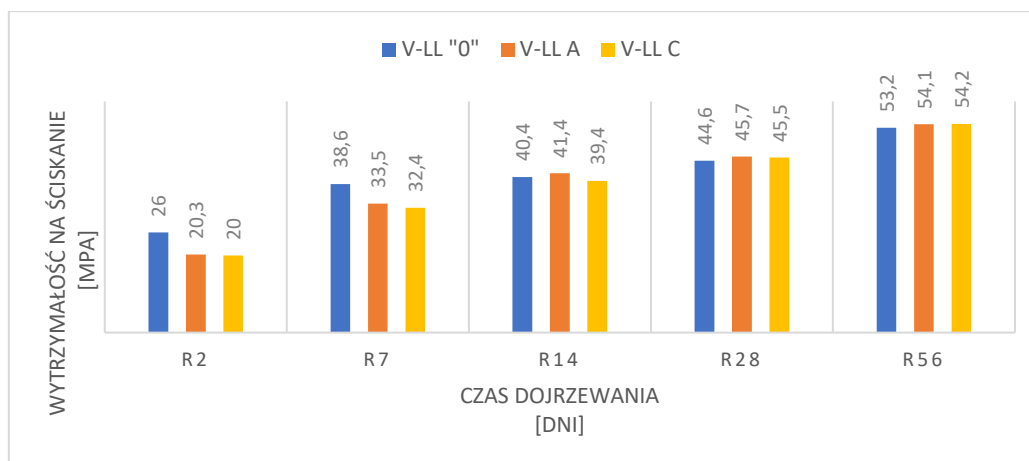
Tabela 8. Właściwości świeżych mieszanek betonowych z CEM II/B-M(V-LL)32,5R oraz zastosowanego dodatku.

Oznaczenie próbki			V-LL "0"	V-LL A	V-LL C	B-S "0"	B-S A	B-S C
1	wg PN-EN 12350- 8:2019	Średnica rozplywu SF [mm] po t = 0 min	680	650	670	720	690	710
		Czas t500 [s]	6	7	6	7	7	8
		Średnica rozplywu SF [mm] po t = 30 min	670	630	640	700	680	690
		Czas t500 [s]	8	9	9	9	9	11
2	wg PN-EN 12350- 10:2012	Metoda L-box (2 pręty)- wskaźnik przepływalności PL	0,9	0,9	0,88	0,90	0,90	0,85
3	wg PN-EN 12350- 7:2019	Zawartość powietrza [%]	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,4
4	wg ACI 237R17	Wskaźnik VSI	0	0	0	0	0	0

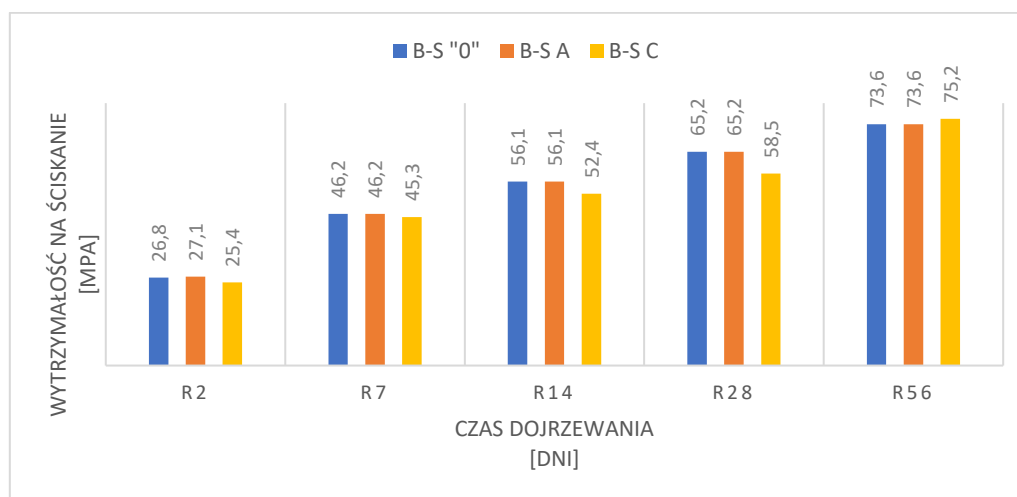
Dla wszystkich wykonanych mieszanek betonowych określono także wskaźnik przepływalności wg PN-EN 12350-10 oraz określono napowietrzenie mieszanki betonowej, wg PN-EN 12350-7. Współczynnik przepływalności dla wszystkich mieszanek wahał się w granicach od 0,85 do 0,90. Zastosowane dodatki nie wpływają na stopień napowietrzenia świeżych mieszanek betonowych. Zawartość powietrza wynosiła w granicach od 1,3% do 1,5 %.

Na rysunkach 7-8 przedstawiono przyrost wytrzymałości betonów oraz uzyskane wytrzymałości w czasie do 56 dni dojrzewania w warunkach normowych.

Zaobserwowano wpływ dodatków A, C oraz mączki wapiennej na przyrost wytrzymałości wczesnej. Być może jest to spowodowane tym, że występuje zarodkowanie produktów hydratacji na ziarnach zmielonego dodatku wapienia znajdującego się w cemencie. Dodatek wapienia do cementu może przyspieszyć reakcję fazy C_3S [7]. Betony z udziałem dodatków uzyskują poziom wytrzymałości betonu referencyjnego z udziałem mączki wapiennej po 56 dniach dojrzewania.



Rysunek 7. Przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu z wykorzystaniem CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R oraz zastosowanych dodatków.



Rysunek 8. Przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu z wykorzystaniem CEM II/B-S 42,5R-NA oraz zastosowanych dodatków.

W tabeli 9 przedstawiono wyniki badań mrozoodporności metodą zwykłą dla 150 cykli zamrażania/rozmarzania wg PN-B-06265.

Tabela 9. Mrozoodporność betonu dla stopnia F150

LP	Oznaczenie próbek	Mrozoodporność wg PN-88/B-06250 po 150 cyklach (F150)	
		Spadek wytrzymałości [%]	Ubytek masy [%]
1	B-S „0”	0,1	0,4
2	B-S „A”	1,7	0,1
3	B-S „C”	4,5	0,2
4	V-LL „0”	7,5	0,4
5	V-LL „A”	3,7	0,1
6	V-LL „C”	6,5	0,4

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wyniki spełniające wymagania normy PN-88/B-06250 a mianowicie max 20 [%] spadek wytrzymałości oraz max 5 [%] ubytek masy.

W tabeli 10 przedstawiono wyniki badań wodoszczelności wg norm PN-EN 12390-8, PN-88/B-06250 a także wyniki badań karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12 oraz nasiąkliwości wg PN-88/B-06250.

W wyniku przeprowadzenia badań stwierdzono, że zastosowane dodatki alternatywne (dodatki A i C) w porównaniu do mączki wapiennej nie wpłynęły na spadek odporności betonu na działanie CO₂. Nie zauważono także znaczących różnic w wynikach nasiąkliwości oraz wodoszczelności w porównaniu do próbek zawierających w swoim składzie mączkę wapienną.

Tabela 10. Wodoszczelność próbek betonu, karbonatyzacja oraz nasiąkliwość

LP	Oznaczenie próbek	Wodoszczelność wg. PN-88/B-06250 p.6.6. dla stopnia W8 [mm]	Wodoszczelność wg PN-EN 12390-8:2019 [mm]	Głębokość karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12 [mm]	Nasiąkliwość wg PN-88/B-06250 [%]
1	B-S „0”	11	7	2,0	5,2
2	B-S „A”	8	6	2,0	5,1
3	B-S „C”	10	8	4,0	5,1
4	V-LL „0”	26	12	10,0	5,1
5	V-LL „A”	25	12	7,0	5,3
6	V-LL „C”	27	15	9,0	5,6

W tabeli 11 przedstawiono wyniki badań próbek betonu na ścieranie wg normy PN-EN 13892-3.

Tabela 11. Odporność na ścieranie

Odporność na ścieranie wg Böhmego wg PN-EN 13892-			
LP	Oznaczenie próbek	Ubytek masy [g]	Odporność na ścieranie [cm ³ /50cm ²]
1	B-S „0”	18,7	8,3
2	B-S „A”	18,3	8,2
3	B-S „C”	14,9	6,7
4	V-LL „0”	22,5	10,2
5	V-LL „A”	18,2	8,2
6	V-LL „C”	21,2	9,7

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że odporność na ścieranie dla próbek ulega niewielkiej poprawie. Klasę odporności na ścieranie próbek zakwalifikowano jako A6 przy zastosowaniu CEM II/B-S 42,5 R-NA natomiast przy zastosowaniu CEM II/B-M(V-LL) 32,5R jako A9.

5. Podsumowanie

Wyniki badań mieszanek betonowych wykazały, że rodzaj dodatku pochodzącego z procesów przetwórstwa kruszyw ma wpływ na właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Nie zmieniają w sposób zasadniczy właściwości reologicznych mieszanek w porównaniu do mieszanki zawierającej w swoim składzie mączkę wapienną.

Stwierdzono, że za wyjątkiem mieszanki betonowej z udziałem CEM II/B-S 42,5R-NA z dodatkiem C (pyły pochodzące ze skał magmowych) we wszystkich pozostałych mieszankach betonowych nastąpiło zmniejszenie zapotrzebowania na ilość dodatku stosowanego do mieszanki betonowej w odniesieniu do mieszanki referencyjnej zawierającej w swoim składzie mączkę wapienną. Być może to wynika z wielkości oraz kształtu ziarn dodatku [3]. Dotyczy to zarówno mieszanek wykonanych z zastosowaniem CEM II/B-M(V-LL)32,5R oraz CEM II/B-S 42,5R-NA. Ocenę tę wykonano na podstawie oceny wizualnej mieszanek badanych przy zastosowaniu skali VSI wg ACI 237R-07.

Zastosowane alternatywne dodatki do betonu tj pyły pochodzące z przetwórstwa kruszyw mogą okazać się dodatkami perspektywicznymi, możliwymi do zagospodarowania w betonie SCC.

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość zastąpienie naturalnej mączki wapiennej w betonie pyłami odpadowymi pochodzącymi z przetwórstwa kruszyw. Wiążą się z tym korzyści nie tylko dla środowiska naturalnego ale również ekonomiczne. Beton SCC jest betonem znacząco droższym w porównaniu do betonu zwykłego czego skutkiem jest bardzo małe zainteresowanie tego typu produktem. Zastąpienie drogiej i naturalnej mączki wapiennej produktami odpadowymi może sprawić, że wykorzystanie betonu SCC będzie ekonomicznie uzasadnione oraz obniży ślad węglowy przy produkcji betonu. W technologii betonu w zdecydowanej większości wykorzystuje się kruszywa płukane lub odpylane. Zagospodarowanie powstających w ten sposób pyłów, które mają skład chemiczny zbliżony do skały macierzystej przyczyni się do pełnego wykorzystania złóż.

W wyniku przeprowadzonych prac, stwierdzono, że pyły pochodzące z przetwórstwa kruszyw naturalnych mogą się okazać przydatne do zastosowań w betonie SCC jako zamiennik obecnie stosowanej mączki wapiennej jako dodatku typu I.

6. Literatura:

- [1] H. Okamura, M. Ouchi. Self-compacting Concrete. J. Adv. Concr. Techn. 1(1) 5-15 (2003). <http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>.
- [2] Okamura H., Ozawa K., Ouchi M.: Self-Compacting Concrete, Structural Concrete, No. 1, s. 3-17, 2000.
- [3] Neville A.M. „Właściwości betonu”, Polski Cement, Kraków 2000.
- [4] Szwabowski J, Gołaszewski J.: „Technologia betonu samozagęszczalnego”, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
- [5] Szwabowski J. „Reologia samozagęszczalnych mieszanek betonowych”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [6] Gołaszewski J. „Wpływ cementu i supreplastyfikatora na właściwości zapraw”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [7] Król A., Giergiczny Z., Karasińska-Warwas J. “Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI”, Materials 2020,13, 2257

- [8] Gołaszewski J. "Komaptybilność cementu i superplastyfikatora w obecności dodatków mineralnych i domieszki napowietrzającej", Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [9] Szwabowski J. "Reologia mieszanek na spoiwach cementowych" Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [10] F.Rohmani, S.Kaci, M.Ould Ouali "Beton samozagęszczalny zawierający piasek pustynny i mączkę granitową" Cement Wapno Beton 29(3) 2024,s. 171-187.
- [11] Andriya Huts, rozprawa doktorska "Beton modyfikowany pyłem granitowym" Politechnika Rzeszowska, 2021.
- [12] P. Szaj "Zastosowanie w technologii betonu mączek mineralnych powstających przy produkcji kruszyw łamanych" Konferencja Dni Betonu Wisła, 13-15. 10.2014
- [13] Gajewski R., Gawlicki M. "Self Compacting Concrete – examples of applications" International Scientific Conference, Levoca, 22-24.10.2003
- [14] Jasiński W., Bartusiak W. "Beton samozagęszczalny SCC w prefabrykowanych elementach systemów kanalizacyjnych" Konferencja Dni Betonu, Wisła 2008.
- [15] Z. Giergiczny, T. Pużak, K. Kaczmarek, G. Śmietka "Zastosowanie betonu samozagęszczalnego w produkcji systemów wodno-kanalizacyjnych" Konferencja Dni Betonu, Wisła 2010.
- [16] A.Nowak, M.Piotrowicz, T.Latuszek "Doświadczenia z zastosowaniem betonu SCC w przemysłowej produkcji prefabrykatów w Konińskiej Wytwórni Prefabrykatów Kon-Bet", Konferencja Dni Betonu, Wisła 2010.
- [17] W. Jasiński, W.Bartosiaak "Beton samozagęszczalny w prefabrykowanych elementach systemów kanalizacyjnych", Konferencja Dni Betonu, Wisła 2008.