

Beton architektoniczny we współczesnej prefabrykacji betonowej

Promotor – dr inż. Małgorzata Lelusz, dyplomantka – inż. Natasza Organek, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Celem pracy dyplomowej była analiza zastosowania betonu architektonicznego ze szczególnym uwzględnieniem produkcji elementów prefabrykowanych oraz ocena wpływu barwników na wybrane właściwości betonu, jak również sprawdzenie wysokości kosztów wytwarzania elementów z betonu barwionego. W ramach pracy wykonano badania laboratoryjne wpływu rodzaju i ilości barwnika oraz współczynnika w/c na konsystencję mieszanki betonowej oraz na wytrzymałość, gęstość objętościową i nasiąkliwość betonu. Analizowano wpływ trzech barwników różniących się kolorem. Ilość barwnika oraz wartość w/c rozpatrywano na trzech poziomach zmienności. Przeprowadzono analizę wyników badań własnych. Ponadto przeprowadzono analizę ekonomiczną zastosowania betonu barwionego. Na zakończenie podsumowano wyniki analiz i sformułowano wnioski.

2. Beton architektoniczny

2.1. Zastosowanie betonu architektonicznego

Beton architektoniczny, zwany inaczej licowym, fasadowym lub elewacyjnym, jest to beton, którego zewnętrzna powierzchnia jest eksponowana, a wymagania co do powierzchni zostały specjalnie określone [1]. Coraz częściej beton, oprócz funkcji konstrukcyjnej, odgrywa ważną rolę w kształtowaniu walorów architektonicznych obiektów budowlanych.

Beton architektoniczny ma szerokie zastosowanie. Wykorzystywany jest do wytwarzania elementów konstrukcyjnych, elewacyjnych oraz wykonywane są z niego obiekty małej architektury. Zaletą takiego betonu jest możliwość łączenia go z innymi materiałami, co ułatwia nadanie indywidualnego charakteru każdemu projektowi [2]. Beton architektoniczny to nie tylko elementy o gładkim licu. Na jego powierzchni można wykonać fakturę za pomocą specjalnych matryc lub deskowania, wyeksponować kruszywo podczas płukania betonu oraz barwić. Pozostałe metody obróbki to szlifowanie, zakwaszanie oraz technologia fotobetonu.

Najczęściej spotykanymi konstrukcjami z betonu architektonicznego są słupy, rzadziej ściany. Mogą być one wykonane jako prefabrykowane lub monolityczne. Również obiekty małej architektury oraz galanteria ogrodowa coraz częściej wykonywane są z betonu architektonicznego. Najczęściej spotykane są: ławki, kosze na śmieci, schody i donice. Jednym z najpopularniejszych wyrobów prefabrykowanych z betonu

architektonicznego są elementy elewacyjne. Wykonywane są fasady kurtynowe, cokoły i okładziny ścian. W technologii monolitycznej prym wiodą ściany osłonowe: barwione, z fakturą lub z betonu transparentnego.

Coraz chętniej beton architektoniczny stosowany jest również do aranżacji wnętrz. Wykonywane są z niego stoły, blaty kuchenne, umywalki oraz elementy ozdobne.

2.2. Konstrukcje monolityczne z betonu architektonicznego

Na wygląd powierzchni betonu architektonicznego ma wpływ wiele czynników. Ważną rolę odgrywa rodzaj zastosowanego deskowania, konsystencja mieszanki, rodzaj cementu, rozmiar ziaren kruszywa, sposób pielęgnacji świeżego betonu oraz czynniki atmosferyczne [3]. Proces tworzenia betonu architektonicznego nie zaczyna się od układania mieszanki w deskowaniu. To już na etapie projektowania trzeba zaplanować, oprócz ustalenia wyglądu końcowego betonu, jakimi metodami należy go wykonać oraz jakie wymagania ma spełniać mieszanka betonowa [1]. Stosując różne typy deskowania, możemy uzyskiwać odmienne rodzaje faktury i kolorystyki betonu. Dostępne są matryce z tworzywa sztucznego lub wykonane z włókna szklanego oraz deskowanie filtracyjne (selektywne).

Przy wykonywaniu betonu licowego należy stosować nowe lub właściwie pielęgnowane blaty, ponieważ częstotliwość używania ich wpływa na wygląd i efekt końcowy [4]. Deskowanie systemowe powinno być szczelne. Należy zatem stosować uszczelki na łączeniach oraz na spodzie deskowania, a otwory po ściągach deskowania należy zamknąć. W celu odprowadzenia powietrza z powierzchni betonu stosuje się maty filtracyjne. Deskowanie pokrywa się tkaniną o włóknistej budowie, która jest nasiąkliwa. Warstwa powierzchniowa betonu zostaje uszczelniona dzięki cząsteczkom cementu, które są przemieszczane wraz z wodą do tkaniny [1]. Deskowanie takie sprawia, że beton jest prawie całkowicie pozbawiony porów powierzchniowych. Stosując deskowanie filtracyjne, nie wymaga się dodatkowego używania środków antyadhezyjnych. Gdy powierzchnia betonu ma mieć eksponowane kruszywo, zamiast środka antyadhezyjnego stosuje się środki opóźniające wiązanie cementu. Efekt końcowy i jakość wykonania w dużej mierze zależy od sposobu układania i zagęszczenia mieszanki betonowej w deskowaniu. Na uzyskany kolor elementu ma również wpływ czas pomiędzy układaniem kolejnych warstw. Ważne jest, aby przerwa nie przekroczyła

15 minut [3]. Podczas wbudowywania mieszanki górne, wewnętrzne części deskowania ulegają zabrudzeniu, co również może skutkować zmianą kolorystyki elementu.

2.3. Prefabrykowane elementy z betonu architektonicznego

Podstawowym elementem prefabrykowanym z betonu architektonicznego są okładziny elewacyjne. W Polsce fasady z prefabrykatów betonowych nie są jeszcze tak popularne jak w Finlandii, gdzie systemowe okładziny betonowe stanowią 97% wszystkich stosowanych w budownictwie wielorodzinnym [5].

Ze względu na konstrukcję, elewacyjne prefabrykaty betonowe można podzielić na cztery rodzaje: okładziny, drobne elementy betonowe, elementy elewacyjne oraz egzozskielety [5].

Okładziny – elementy jednowarstwowe, płytowe, mocowane do konstrukcji budynku za pomocą kotew lub na zaprawie klejowej. Za pomocą matryc można uzyskać różną fakturę (np. gładką, imitującą kamień) lub po dalszej obróbce wyeksponować kruszywo. Stosując pigmenty lub odpowiednie rodzaje kruszywa, można otrzymać prefabrykaty różnokolorowe. Dzięki stosowaniu opóźniaczy wiązania betonu na matrycy można uzyskać efekt fotobetonu na elemencie. Różne czasy wiązania powodują różne odcienie betonu.

Drobne elementy – betonowe o różnym przeznaczeniu, nie tylko konstrukcyjnym.

Elementy elewacyjne – warstwowe konstrukcyjne i samoniesne o dużych wymiarach. Ich pierwowzorem była „wielka płyta”. Składają się najczęściej z trzech warstw: zewnętrznej betonowej, izolacyjnej oraz wewnętrznej konstrukcyjnej.

Egzozskielety – żelbetowa, ażurowa konstrukcja nośna, za którą znajduje się szczelna ściana osłonowa (np. przeszklona). Do wykonywania takich elementów prefabrykowanych stosuje się beton samozagęszczalny, dodanie dodatkowo dwutlenku tytanu sprawia, że taka elewacja staje się samoczyszcząca.

Aby spełnić wymagania gładkości powierzchni, jednolitej barwy elementu, braku uszkodzeń i usterek, zakład prefabrykacji powinien posiadać [6]:

- nowoczesne technologie formowania (stoły metalowe, uchylne z możliwością nadbudowy burt i wykonywania elementów o zróżnicowanych, często skomplikowanych kształtach);
- właściwą technologię betonu (odpowiedni rodzaj i ilość cementu), mały współczynnik w/c , stosowanie domieszek chemicznych;
- nowoczesny system produkcji prefabrykatów (podawanie i układanie mieszanki, wibrowanie, środki antyadhezyjne).

Mieszanka betonowa używana do produkcji prefabrykatów powinna cechować się wysoką wytrzymałością wczesną [7].

Do produkcji można również zastosować technologie betonów SCC, czyli betonów samozagęszczalnych. Taka mieszanka charakteryzuje się niskim w/c , zwiększoną ilością superplastyfikatora oraz do jej wykonania używane są cementy wysokiej klasy. Szczelnie wypełnia formy i zagęszcza się pod własnym ciężarem. Dzięki temu można zrezygnować

ze stosowania stołów wibracyjnych, co usprawnia cykl pracy oraz pozwala obniżyć koszty produkcji. Brak konieczności mechanicznego zagęszczania pozwala na betonowanie elementów o skomplikowanych kształtach i znacznym stopniu zbrojenia [7].

Zbrojenie w prefabrykowanych elementach elewacyjnych najczęściej stanowi stal. Stosuje się ją w płytach o grubości od 8 cm. Elementy o mniejszych grubościach są zbrojone włóknem szklanym [8]. Taki wyrób betonowy jest trwały i bardziej wytrzymały od stosowanych dotąd betonów architektonicznych. W fazie produkcji do mieszanki dodaje się alkaloodporne włókna szklane, które ograniczają lub też eliminują liczbę spękań skurczowych. Taki beton architektoniczny ma wyższy poziom sprężystości, przez co jest wytrzymały, plastyczny, trwały i łatwiej można go formować w dowolne bryły. Cechuje go zwiększona odporność na czynniki zewnętrzne, w tym na korozję.

2.4. Wytyczne techniczne betonu architektonicznego

W Polsce nie ma jeszcze normy, która szczegółowo określałaby wytyczne, jakimi należy się kierować przy projektowaniu betonu architektonicznego. Podstawowe wymagania, jakie stawiane są betonowi, to odpowiednia wytrzymałość i właściwa trwałość [3]. Beton architektoniczny musi więc spełniać wymagania normy PN-EN 206-1 [11]. Aby określić, jakie wymagania trwałościowe ma spełniać projektowany beton, należy uwzględnić miejsce ekspozycji elementu.

Jednym z czynników wpływającym na jednaki wygląd wykonywanego betonu jest stosowanie materiałów o stabilnej jakości do sporządzenia mieszanki. Ze wszystkich składników największy wpływ na kolor betonu ma cement. Aby zachować jednolity odcień wykonywanych elementów, należy używać cementu tego samego typu, z tej samej partii produkcyjnej, od tego samego dostawcy. Istotne jest zachowanie stałego w/c , dlatego każdą dostawę świeżej mieszanki należy kontrolować zarówno w betonowni, jak również na budowie. Zaleca się, aby każda partia poddawana była badaniu konsystencji. Właściwy nadzór nad mieszanką pozwoli uniknąć przebarwień lub wykonania elementów o odmiennej kolorystyce. Maksymalny współczynnik w/c waha się między 0,55 a 0,50 [1]. Przy produkcji mieszanki do wykonania betonu architektonicznego istotne jest stosowanie domieszek. Obniżają one w/c oraz pozwalają uzyskać mieszankę o odpowiedniej konsystencji i urabialności. Zalecana konsystencja mieszanki to S3 lub S4 (półciekła i ciekła), dla których uzyskuje się łatwiejsze odpowietrzenie mieszanki [3]. Wykonując elementy o skomplikowanych przekrojach lub z gęstym zbrojeniem stosuje się mieszankę o konsystencji S5 lub beton samozagęszczalny SCC.

Do wykonania mieszanki betonu architektonicznego należy użyć większej ilości cementu niż do osiągnięcia wyspecyfikowanej klasy. Przyjmuje się, że minimalna wartość wynosi 350 kg/m³. Wymóg ten dotyczy betonów, w których powierzchnia ma być pozbawiona porów, przy wykonywaniu elementów z ekspozowanym kruszywem ilość cementu może być mniejsza. Zaleca się również stosowanie kruszywa o zwiększonej zawartości frakcji do 0,25 mm. Zezwala się zatem na stosowanie

dodatków takich jak popiół lotny. Jednak trzeba uwzględnić fakt, że ten składnik wpływa na kolorystykę cementu, powodując zmiany w wyglądzie betonu architektonicznego.

2.5. Sposoby barwienia betonu

Istnieje wiele sposobów wykonania kolorowych elementów elewacyjnych. Można użyć białego lub szarego cementu, dodać pigment koloryzujący do mieszanki betonowej, nakładać powłoki na powierzchnie stwardniałego betonu, a także stosować kolorowe kruszywo, gdy jest ono eksponowane na powierzchni. Przy elementach z eksponowanym kruszywem wpływ na kolor będzie miało kruszywo grube, zaś przy elementach o gładkim licu – frakcje drobne [3].

Zastosowanie pigmentów jest najczęściej stosowaną metodą barwienia betonu w całej jego objętości. Eliminuje to potrzebę pokrywania powierzchni powłokami. Pigmenty są dostępne w postaci proszków, granulatów oraz płynów. Ultra drobne cząsteczki pigmentu rozpraszają się w całej mieszance i są związane w betonie, zachowując się tak jak pozostałe jego składniki [2]. Większość barwników (czerwony, żółty, brązowy i czarny) są tlenkami żelaza. Mineralne lub nieorganiczne tlenki są trwałe i nie reagują na ultrafioletowe promienie słoneczne. Tlenki nieorganiczne są nierozpuszczalne (nie wyplukują się), chemicznie obojętne (nie wpływają na reakcje cementu), odporne na alkalia (nadają się do betonów o wysokiej zasadowości), nie blakną i są nieszkodliwe dla środowiska [9]. Po związaniu betonu kolor jest trwały. Niektóre barwniki (niebieskie i zielone) są dużo droższe niż naturalne żółcie, brązy czy czernie ze względu na proces produkcyjny wytwarzania specjalnych tlenków żelaza. Barwiony beton architektoniczny wykonany z białego cementu, jasnego kruszywa i pigmentu pozwala uzyskać jasne odcienie danego koloru.

Przy stosowaniu pigmentu należy uwzględnić jego stężenie, kolor cementu, wytrzymałość betonu, możliwość powstawania wykwitów, kolor kruszywa, powłoki wykończeniowe oraz stosowanie plam chemicznych [9].

Stężenie pigmentu zależy od ilości barwnika w stosunku do masy cementu. Ilość barwnika może się zmieniać w zależności od wymaganego koloru bądź od zdolności barwienia. Stosowanie zalecanej przez producenta ilości zazwyczaj zapewnia dobrą jakość i intensywność koloru. Gdy barwnika zastosuje się mniej, uzyskany kolor może być niezadowalający. Dodanie większej niż zalecana ilości barwnika może narazić na dodatkowe koszty.

Trzeba pamiętać, że zwiększenie wytrzymałości betonu zazwyczaj oznacza również zwiększenie ilości cementu, co powoduje zużycie większej ilości pigmentu na 1 m³ betonu w celu zachowania jednakowego odcienia. Wiele czynników ma wpływ na końcowy kolor elementu.

Kolor cementu. Szary cement zawsze będzie „przebijal się” przez każdy kolor, dlatego też do betonów barwionych stosuje się biały lub białawy cement, który jest jaśniejszy. Jednak wiele zależy również od pożądanego efektu oraz użytego pigmentu. Niektóre kolory można uzyskać za pomocą szarego cementu. Nie będzie różnicy przy stosowaniu czarnych pigmentów, mała różnica przy ciemnych czerwieniach i brązach. Znacząca różnica będzie widoczna przy żółciach i błękitach.

W celu uzyskania jasnych kolorów korzystniejsze jest użycie białawego cementu, niż stosowanie droższego białego cementu. Kolor każdego rodzaju cementu może również wpływać na ostateczny kolor barwionego betonu.

Wytrzymałość betonu. Pigmenty barwiące, które dodaje się w ilości 5% masy cementu, nie mają istotnego wpływu na wytrzymałość betonu. Jednak wprowadzenie do mieszanki nadmiernej ilości drobnego materiału (pigmentu) poza zwiększeniem nasycenia pigmentu zwiększa również wodożądność. Zmiana w/c może mieć wpływ na wytrzymałość betonu [10].

Wykwity. Powstawanie wykwitów (biała powłoka na powierzchni elementów) może sprawić, że kolor się rozjaśni, będzie sprawiać wrażenie wyblakniętego. Na jaśniejszych powierzchniach biała powłoka spowodowana wykwitami nie będzie mocno widoczna.

Kolor kruszywa. Kruszywo jest zazwyczaj okryte cienką warstwą barwnego zaczynu cementowego. Jednak jeżeli występują ziarna kruszywa, które nie zostały w pełni pokryte lub zostały odsłonięte przez warunki atmosferyczne, na kolor finalny będzie miał wpływ również kolor użytego kruszywa.

Powłoki wykończeniowe. Elementy barwione pigmentami mają powierzchnię, która nie wymaga już wykańczania. Z drugiej strony – powłoki zapewniają jednolity kolor na całej powierzchni i są stosowane tam, gdzie różnice kolorystyczne nie są dopuszczalne. Ponadto powłoki tworzą chemiczną barierę, co wydłuża żywotność konstrukcji.

Plamy chemiczne. Jest to metoda, w której na wybrane obszary nanosi się plamy chemiczne, które wsiąkając w głąb betonu, zmieniają jego kolor.

3. Badania własne

3.1. Program badań

Celem badań była ocena wpływu rodzaju i ilości barwnika oraz współczynnika w/c na konsystencję mieszanki betonowej oraz na wytrzymałość, gęstość objętościową, nasiąkliwość betonu.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie ustalono sposób mieszania składników. Przeanalizowano dwa sposoby mieszania. **Mieszanie 1** polegało na wstępnym wymieszaniu cementu, wody i barwnika, a następnie dodaniu kruszywa. W **mieszaniu 2** składniki wymieszano na sucho: kruszywo z barwnikiem, dodano cement, a na koniec wodę. W etapie 1 obie mieszanki charakteryzowały się stałym współczynnikiem wodno-cementowym w/c=0,5, a ilość barwnika wynosiła 3% w stosunku do masy cementu. Dla każdego sposobu mieszania wykonano po 3 serie próbek z zastosowaniem barwnika żółtego, czarnego oraz czerwonego. Po uzyskaniu wstępnych wyników zdecydowano, aby wykonywać dalsze badania, przygotowując mieszankę sposobem drugim (mieszanie 2), ze względu na uzyskanie wyższych wytrzymałości na ściskanie. Różnica wyniosła od 3 do 8 MPa. Sposób mieszania składników nie wpłynął na końcową barwę próbek.

W etapie drugim wybrane właściwości próbek, takie jak: wytrzymałość na ściskanie i zginanie, nasiąkliwość, gęstość objętościowa oraz konsystencja zbadano w zależności od następujących czynników zmiennych: ilości barwnika (X1) oraz

współczynnika w/c (X_2). Do barwienia tych próbek zastosowano czerwony barwnik w postaci proszku. Wartość w/c i ilość barwnika rozpatrywano na trzech poziomach zmienności. Poziomy czynników oraz zakresy ich zmienności przedstawiono w tabeli 1, a plan eksperymentu przedstawiono w tabeli 2.

3.2. Charakterystyka materiałów użytych do badań

Do wykonania próbek użyty został cement portlandzki biały CEM I 52,5R, piasek naturalny o średnicy ziaren do 2 mm oraz domieszka uplastyczniająca nowej generacji przeznaczona do elementów prefabrykowanych, która znacznie redukuje ilość wody. Umożliwiła ona uzyskanie mieszanki betonowej o bardzo dobrej urabialności. Domieszka ma postać cieczy jednorodnej o jednolitej mleczno-żółtej barwie. Zawartość jonów Cl^- wynosi mniej niż 0,1%, a zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na_2O to mniej niż 1,5%. Domieszka była lekko zasadowa, jej pH wynosi 8. Stosowano również wodociągową bez zanieczyszczeń.

3.3. Przygotowanie i pielęgnacja próbek oraz metody badawcze

Jako skład wyjściowy przyjęto skład zaprawy normowej [12]: cement – 450 g, piasek – 1350 g, woda – 225 g. Powyższa receptura odpowiada $w/c=0,5$. Dla $w/c=0,4$ ilość wody wyniosła 180 g, a dla $w/c=0,6$ – 270 g. Barwnik dozowano do mieszanki w ilości 1%, 3% oraz 5% masy cementu, zgodnie z planem eksperymentu (tabela 2.). W związku z tym, że przy $w/c = 0,4$ konsystencja mieszanki nie spełniała wymagań dla betonu architektonicznego, przy wykonywaniu próbek N1, N2, N3 zastosowano domieszki uplastyczniającą w ilości 0,8% masy cementu.

Po wymieszaniu składników w mieszarce do zapraw mieszanek układano w formach pokrytych środkiem antyadhezyjnym

Tabela 1. Zakres i poziom zmienności rozpatrywanych czynników zmiennych

Czynniki zmienne	Oznaczenie	Jednostka	Poziom zmienności		
			-1	0	+1
Ilość barwnika	X1	% masy cementu	1	3	5
Współczynnik w/c	X2	-	0,4	0,5	0,6

Tabela 2. Plan eksperymentu

Numer serii	X_1 (ilość barwnika)	X_2 (w/c)
N1	-1 (1% mc)	-1 (0,4)
N2	0 (3% mc)	-1 (0,4)
N3	+1 (5% mc)	-1 (0,4)
N4	-1 (1% mc)	0 (0,5)
N5	0 (3% mc)	0 (0,5)
N6	+1 (5% mc)	0 (0,5)
N7	-1 (1% mc)	+1 (0,6)
N8	0 (3% mc)	+1 (0,6)
N9	+1 (5% mc)	+1 (0,6)

i zagęszczono na wstrząsarce zgodnie z PN-EN 169-1:2005 [12]. Powierzchnię form przykryto folią i pozostawiono na 24 h. Następnie rozformowano próbki i umieszczono je w komorze klimatycznej na kolejnych 27 dni (rys. 1). W komorze panowała temperatura $20^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ i wilgotność powyżej 90%. Z każdej partii trzy próbki przeznaczono do wykonania na nich badań wytrzymałościowych po 28 dniach dojrzewania. Na pozostałych trzech wykonano oznaczenia nasiąkliwości i gęstości objętościowej. Każdorazowo wykonywano badanie konsystencji mieszanki betonowej metodą stolika rozpyłowego. Badanie konsystencji, gęstości objętościowej oraz nasiąkliwości przeprowadzono zgodnie z normą PN-85/B-04500 [13]. Badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie przeprowadzono wg normy PN-EN 196-1:2006 [12].

4. Analiza wyników badań

Wytrzymałość na ściskanie. W celu określenia istotności wpływu ilości barwnika (czynnik A) oraz współczynnika w/c (czynnik B) na wytrzymałość na ściskanie wykorzystano dwuczynnikową analizę wariancji. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 3.

Po sprawdzeniu kryterium Fishera okazało się, że F_{obl} nie zawsze było większe od F_{tab} . Taki wynik oznacza, że dany czynnik nie wpływa w sposób istotny na wyniki badania.

Analiza wariancji (tabela 3) wykazała, że na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej tylko czynnik B (współczynnik w/c) miał istotny wpływ.

Wartości wytrzymałości na ściskanie próbek przy różnych ilościach barwnika dla rozpatrywanych w/c były bardzo zbliżone (rys. 2). Potwierdza to wyniki z analizy wariancji, że stosowanie pigmentu nie wpływało istotnie na zmianę wytrzymałości próbek na ściskanie.



Rys. 1. Próbkę dojrzewające w komorze klimatycznej

Gęstość objętościowa. Po wykonaniu oznaczenia gęstości objętościowej próbek w stanie suchym i wilgotnym nie zauważono zależności między ilością użytego barwnika i zmiennym współczynnikiem w/c, a zmianą gęstości objętościowej próbki (rys. 3).

Nasiąkliwość. Przy badaniu nasiąkliwości również barwnik nie wpłynął na wynik badania. Pod względem ilości w/c, nasiąkliwość pod względem masy próbki oraz jej objętości była wyższa u próbek z w/c=0,5. Mieszanka o w/c=0,4 wykazała mniejszą nasiąkliwość (rys. 4). Nasiąkliwość betonu architektonicznego jest wysoka ze względu na stosowanie piasku jako kruszywa, który absorbuje wodę.

Konsystencja. Badanie konsystencji przeprowadzono metodą stolika rozplływowego. Konsystencja dla każdego z w/c zależna była od ilości barwnika (rys. 5). wraz ze wzrostem ilości pigmentu w mieszance średnica rozplwyu zmniejszała się. Dla w/c=0,5 oraz 0,4 wielkości średnic są zbliżone ze względu na zastosowanie domieszki uplastyczniającej w mieszance o w/c=0,4.

Ocena wizualna. Pod względem wizualnym wszystkie próbki miały gładkie lico. Kolor beleczek był jednolity na całej powierzchni. Zauważono, że przy jednakowym w/c, a różnej ilości barwnika, na powierzchni występują pory powietrzne z różną

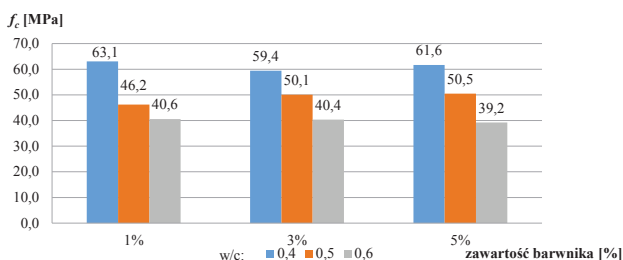
intensywnością (rys. 6). Możliwe, że było to spowodowane zagęszczaniem lub środkiem antyadhezyjnym. Po przetłamaniu próbki na dwie części wewnątrz beleczki pory powietrzne były niewielkie (rys. 7). Na rysunku 8 pokazano, jak różniły się używane kolory próbek w zależności od ilości stosowanego barwnika. W przypadku pigmentu czerwonego przy zawartości 3% oraz 5% odcienie były do siebie bardzo zbliżone.

5. Analiza ekonomiczna zastosowania betonu barwionego

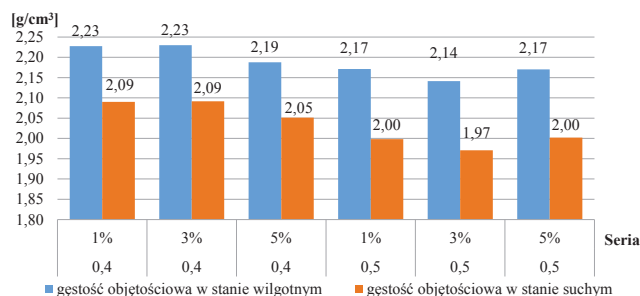
Wykonano analizę kosztów materiału do wykonania 1 m³ betonu dla receptur, z których wykonywano mieszanki do badań (tabela 4). Ceny za 1 kilogram poszczególnych składników były następujące: kruszywo – 0,03 zł, cement – 1,28 zł, barwnik czerwony – 24,91 zł, barwnik czarny 19,93 zł, barwnik żółty – 31,88 zł, domieszka uplastyczniająca – 4,70 zł [14]. Składnikiem o najwyższej cenie okazały się barwniki, głównie żółty, który objętościowo jest lżejszy od pozostałych pigmentów. Za żółty barwnik do 1 m³ betonu o stężeniu w mieszance 5% trzeba zapłacić ok. 715 złotych. Cement również nie jest tani. Przy ilości 450 kg w mieszance, na 1 m³ betonu należy wydać 576 zł.

Tabela 3. Wyniki analizy wariancji dwuczynnikowej dla f_c

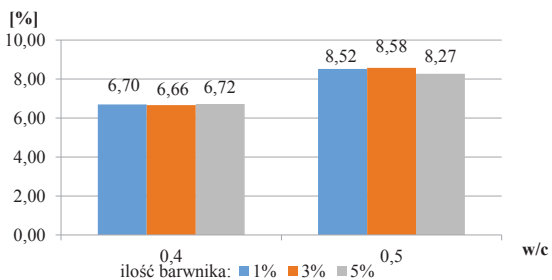
Źródło wariancji	Suma kwadratów odchyłeń	Liczba stopni swobody	Wariancja	F _{obl}	F _{tab}
Czynnik A	13,064	2	6,5321	0,2018	3,2043
Czynnik B	2953,331	2	1476,6664	45,6176	3,2043
Czynniki A i B	153,4939	4	38,3735	1,1854	2,5787
Błąd pomiaru	1456,673	45	32,3705	-	-
Razem	4576,563	53	-	-	-



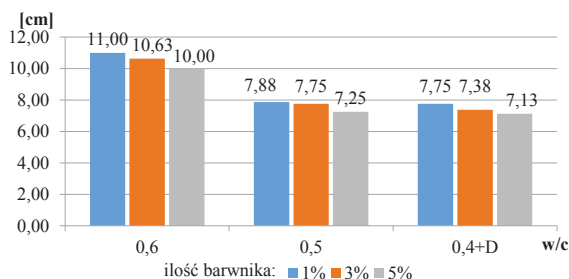
Rys. 2. Wyniki wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od współczynnika w/c oraz od ilości barwnika



Rys. 3. Porównanie średnich gęstości objętościowych próbek w stanie wilgotnym i suchym



Rys. 4. Nasiąkliwość próbek w stosunku do ich masy



Rys. 5. Wpływ ilości barwnika na średnice rozplwyu mieszanki przy różnym w/c



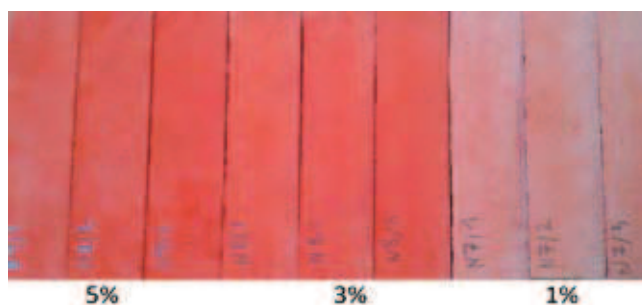
Rys. 6. Powierzchnie beleczek o różnej zawartości barwnika



Rys. 7. Pęcherze powietrza wewnątrz próbki

Elementy prefabrykowane lub monolityczne elewacyjne mają grubość ok 8–10 cm. 1 m³ kolorowej mieszanki betonowej do wykonania konstrukcji takiej grubości wystarcza na wykonanie 10 m² powierzchni. Jest to bardzo mało, zwłaszcza że koszt kolorowego betonu waha się od 700 zł do 1300 zł za 1 m³. Ze względu na tak duże koszty produkcji w elementach wydziela się dwie warstwy. Jedna ubarwiona (o grubości ok 2 cm), a druga konstrukcyjna, wykonana z szarego betonu (o grubości ok 6–8 cm). Dzięki takiej technologii kolorowy beton architektoniczny wystarcza na wykonanie pięciokrotnie większej powierzchni, niż podczas stosowania tylko betonu barwionego. Koszt 50 m² warstwowego elementu wynosi od 1600 zł do 2200 zł (1 m³ zwykłego betonu ok. 230 zł), gdzie przy elemencie jednolitym z betonu barwionego najniższy koszt wyniósłby 3500 zł. Innym sposobem zaoszczędzenia kosztów jest wykonywanie elewacji z cienkich prefabrykowanych płyt z betonu barwionego o grubości 2 cm zbrojonych włóknem szklanym.

Kolejny sposób na tańsze uzyskanie barwionego betonu to stosowanie szarego cementu zamiast białego. Różnica w kolorystyce nie jest widoczna przy stosowaniu czarnego barwnika, lekko ciemniejsze kolory uzyskuje się przy stosowaniu czerwonych i brązowych barwników, a niezalecane jest wykonywanie kolorowych betonów tym sposobem z jasnymi barwnikami, takimi jak żółty czy niebieski. Tabela 5 przedstawia koszt 1 m³ betonu kolorowego z zastosowaniem szarego cementu. Jest to najtańszy sposób na wykonanie barwionego betonu architektonicznego, jednak należy pamiętać że barwa, jaką uzyskamy nie zawsze może spełnić nasze oczekiwania. Rysunek 9 pokazuje różnicę między betonem architektonicznym wykonanym z betonu szarego oraz z białego. Zastosowanie szarego cementu do barwionego betonu nie



Rys. 8. Kolory próbek o różnych stężeniach barwnika

Tabela 4. Cena materiału na 1 m³ barwionego betonu architektonicznego z białym cementem

Ilość barwnika (% mc)	w/c	Domieszka (% mc)	Cena materiału na 1 m ³ betonu (zł) [14]		
			czarny	czerwony	żółty
1	0,4	0,8	714,10	736,51	767,88
1	0,5	0	700,16	722,57	753,94
1	0,6	0	700,31	722,72	754,08
3	0,4	0,8	893,47	960,70	1054,80
3	0,5	0	879,53	946,76	1040,86
3	0,6	0	879,68	946,91	1041,00
5	0,4	0,8	1072,84	1184,89	1341,72
5	0,5	0	1058,90	1170,95	1327,78
5	0,6	0	1059,05	1171,10	1327,92

zawsze może się okazać ekonomiczne. Aby uzyskać bardziej wyrazisty kolor powierzchni, zaleca się stosowanie białego cementu. Produkując mieszankę z szarego cementu, w celu uzyskania wymaganego koloru betonu, należy zwiększyć ilość barwnika. Cena pigmentu za 1 kg jest wysoka, a przy zwiększeniu jego stężenia w mieszance, koszty produkcji szybko wzrastają. Może się okazać, że o wiele lepszy efekt kolorystyczny uzyska się, stosując biały cement i mniejszą ilość barwnika, niż gdy stosuje się szary cement i trzy lub pięciokrotnie większe stężenie pigmentu. Przykładowo wykonując mieszankę koloru żółtego o stężeniu barwnika 1% przy użyciu białego cementu, wydamy jedynie o około 100 zł więcej na 1 m³ betonu, niż za mieszankę z szarym cementem, o ilości tego samego barwnika 3%. Odpowiedni kolor powierzchni w przypadku betonu architektonicznego jest jednym z najważniejszych wymagań, jakie stawiane są dla wykonawcy. Przy mieszankach o w/c=0,4 można dostrzec niewielki wzrost ceny, co spowodowane jest użyciem domieszki uplastyczniającej podczas produkcji.

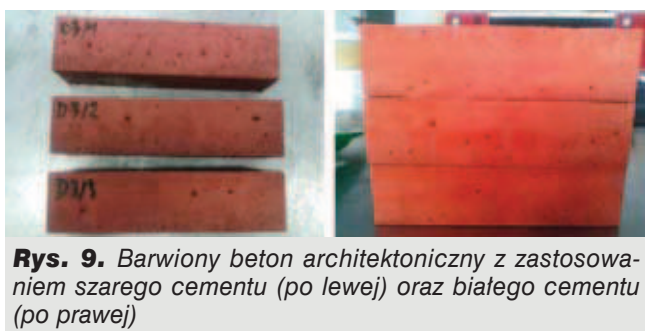
Wykonywanie barwionego betonu architektonicznego jest dość kosztowne. Jednak gdy dobierze się odpowiedni sposób wykonania, można uzyskać ten sam efekt znacznie taniej.

5. Podsumowanie

Beton architektoniczny, ze względu na wysokie wymagania technologiczne, coraz częściej podlega prefabrykacji. Elementy prefabrykowane pozwalają zaoszczędzić czas oraz pieniądze

Tabela 5. Cena materiału na 1 m³ barwionego betonu architektonicznego z szarym cementem

Ilość barwnika (% mc)	w/c	Domieszka (% mc)	Cena materiału na 1 m ³ betonu (zł) [14]		
			czarny	czerwony	żółty
1	0,4	0,80	318,10	340,51	371,88
1	0,5	0	304,16	326,57	357,94
1	0,6	0	304,31	326,72	358,08
3	0,4	0,80	497,47	564,70	658,80
3	0,5	0	483,53	550,76	644,86
3	0,6	0	483,68	550,91	645,00
5	0,4	0,80	676,84	788,89	945,72
5	0,5	0	662,90	774,95	931,78
5	0,6	0	663,05	775,10	931,92

**Rys. 9.** Barwiony beton architektoniczny z zastosowaniem szarego cementu (po lewej) oraz białego cementu (po prawej)

podczas realizacji inwestycji, jednak wymaga to od zakładu prefabrykacji posiadania nowoczesnego parku maszynowego, który umożliwi produkcję betonu architektonicznego. Elewacje wykonane z płyt betonowych powinny cechować się wysoką trwałością i wytrzymałością. Pełnią rolę dekoracyjną budynku oraz osłonową dla izolacji termicznej. Elementy elewacyjne zbrojone włóknem szklanym pozwalają na wykonanie elementów o grubości zaledwie 1,5 cm. Wytwarzanie tak cienkich płyt pozwala na zaoszczędzenie materiału, co przy stosowaniu betonów barwionych znacznie zmniejsza koszty. Obecnie dostępnych jest wiele barwników, którymi można barwić mieszankę. Do barwienia stosuje się: kruszywo, rudę żelaza, barwniki w proszku, granulaty lub w płynie. Należy pamiętać, że stosowanie pigmentów w proszku zwiększa wodożądność, co trzeba uwzględnić w fazie projektowania składu mieszanki. Powinno się stosować domieszki uplastyczniające i upłynniające, pozwalające obniżyć współczynnik w/c. Domieszki intensyfikujące kolor poprawiają barwę elementów. Optymalne stężenie pigmentu w mieszance to 5% masy cementu. Stosowanie większej ilości barwników nie wpływa na zwiększenie intensywności koloru betonu architektonicznego. Nie ma również wpływu na wytrzymałość betonu.

Wykorzystywanie barwionych elementów prefabrykowanych pozwala nadać indywidualny charakter dla każdego budynku. Analiza ekonomiczna wytwarzania betonów barwionych umożliwia znaczące zmniejszanie kosztów ich produkcji. Przeprowadzone badania własne wykazały, że:

- stosowanie barwników nieorganicznych w proszku nie wpływa na wytrzymałość betonu architektonicznego – w przypadku

wytrzymałości na ściskanie różnica wyników w zależności od ilości barwnika nie przekroczyła 4 MPa;

- kolejność mieszania składników zaprawy oraz współczynnik w/c powodowały istotne zmiany wytrzymałości na ściskanie badanych betonów. Wytrzymałości zaprawy na ściskanie różniły się nawet o 8 MPa w zależności od sposobu mieszania;
- dozowanie pigmentu w różnych ilościach zwiększa intensywność koloru, jednak przy stężeniu od 3% do 5% różnica w odcieniu była niemal niezauważalna;
- w celu uzyskania wymaganej powierzchni betonu architektonicznego ważną okazała się odpowiednia konsystencja mieszanki.

Podsumowując pracę, należy zaznaczyć, że beton architektoniczny jest coraz częściej stosowany do wznoszenia różnego rodzaju obiektów. Rozmaitość kolorów i faktur oraz możliwość formowania dowolnych kształtów pozwala zaprojektować każdy obiekt w dowolnym stylu. Wznoszenie budynków i wykonywanie elewacji z elementów prefabrykowanych z betonu architektonicznego znacznie przyspiesza realizację inwestycji. Po wielu latach nieobecności i odrzucenia ze strony architektów od czasu wznoszenia budynków wielkopłytowych, prefabrykaty (tym razem wykonywane z betonu architektonicznego) przeżywają na nowo swój okres świetności.

Dalsze badania nad barwieniem betonu architektonicznego można przeprowadzić, używając barwników o innych kolorach lub barwniki w innej postaci oraz ocenić wpływ domieszki intensyfikującej kolor na wyrazistość barwy betonu, co prawdopodobnie obniżyłoby koszty produkcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kuniczuk K., Beton architektoniczny – uwagi praktyczne, Materiały konferencyjne Dni betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008
- [2] Hodor K., Sawicka M., Kształtowanie przestrzeni betonem architektonicznym, Budownictwo Technologia Architektura 2/2014, str. 32–34
- [3] Kuniczuk K., Beton architektoniczny – wytyczne techniczne, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2011
- [4] Stawiński P., Technologia betonów architektonicznych, Przegląd Budowlany 6/2007, str. 22–29
- [5] Mika P., Klasyfikacja prefabrykowanych betonowych rozwiązań fasadowych oraz przyczyny ich marginalnego znaczenia na polskim rynku budowlanym, Architektura 11/2011
- [6] Grabarczyk P., Technologia prefabrykowanych elementów z betonu architektonicznego (cz. I), Przegląd Budowlany 11/2002, str. 44–45
- [7] Grabarczyk P., Technologia prefabrykowanych elementów z betonu architektonicznego (cz. II), Przegląd Budowlany 12/2002, str. 33–34
- [8] Co to jest beton zbrojony włóknem szklanym GRC (GRFC). <http://grcbeton.pl/centrum-wiedzy-grc/co-to-jest-beton-zbrojony-wloknem-szklanym-grc-grfc/14.01.2015>
- [9] Guide to Off-form Concrete Finishes, Cement Concrete & Aggregates Australia, 2006
- [10] New Zealand Guide to Specifications for Concrete Production and Concrete Construction, Cement & Concrete Association of New Zealand, 2009

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [11] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [12] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu, Część 1: Oznaczenie wytrzymałości
- [13] PN-85/B-04500 Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych
- [14] http://www.leroymerlin.pl/materialy-budowlane_a132.html 22.01.2015