

technologie

Barwienie betonu

– techniczne aspekty stosowania pigmentów

Każdy pigment służący do barwienia betonu musi wykazywać wysoką odporność na silnie alkaliczne środowisko oraz odporność na działanie światła i czynników atmosferycznych, a jednocześnie zapewniać powtarzalność wybarwienia wyrobów gotowych. Artykuł stanowi przegląd technicznych aspektów barwienia betonu pigmentami firmy ATLAS oraz wpływu różnych czynników na końcowy efekt wybarwienia betonu.

Fot. 1. Składniki betonu – ich pochodzenie skutkuje zmiennością ich składu oraz wpływa na wybarwienie betonu

W dzisiejszych czasach beton coraz częściej, oprócz funkcji konstrukcyjnej, odgrywa rolę dekoracyjną. Architekci i wykonawcy, mając wybór z szerokiej palety materiałów i decydując się na beton, stawiają przed nim wysokie wymagania. Szczególnie rygorystyczne warunki stawiane są przed betonem architektonicznym, w tym betonem barwionym. Powtarzalna produkcja barwionego w masie betonu jest dużym wyzwaniem z uwagi na stosowanie surowców o zmiennej charakterystyce. Użytkownicy są świadomi różnic między



Fot. 2. Badania starzeniowe pigmentów – barwione elementy wystawione na ekspozycję południową – stelaż nachylony pod kątem 45 stopni



tworzywem sztucznym, które może mieć jednorodną i idealnie gładką strukturę, a na przykład kamieniem naturalnym, którego każdy fragment jest неповtarzalny. Niestety, beton często utożsamiany jest z materiałem o idealnej strukturze i wybarwieniu, pomimo tego że jego składniki są pochodzenia naturalnego. Artykuł stanowi przegląd technicznych aspektów barwienia betonu oraz wpływu różnych czynników na końcowy efekt wybarwienia betonu.

Każdy pigment służący do barwienia betonu musi wykazywać wysoką odporność na silnie alkaliczne środowisko oraz na działanie światła i czynników atmosferycznych, a jednocześnie zapewniać powtarzalność wybarwienia wyrobów gotowych. Jednym z badań, do którego zobowiązani są producenci pigmentów, jest badanie starzeniowe w warunkach naturalnych. W badaniu tym barwione elementy wystawione są na działanie warunków atmosferycznych, a ewentualna utrata koloru porównywana jest z elementami przechowywanymi w zaciemnionym suchym pomieszczeniu.

Pigmenty stosowane do barwienia betonu oraz innych materiałów na bazie cementu muszą spełniać wymagania normy zharmonizowanej *PN-EN 12878 Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie. Wymagania i metody badań*. Norma wyróżnia dwie podstawowe kategorie A i B – gdzie pigmenty do barwienia betonu zbrojonego stalą klasyfikowane są w kategorii B i spełniają następujące wymagania:

- wytrzymałość na ściskanie zaprawy po 28 dniach względem zaprawy wzorcowej nie powinna być mniejsza niż o 8%
- zawartość substancji rozpuszczalnych w wodzie nie powinna być większa niż 0,5%
- zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie nie większa niż 0,1%.

Na rynku dostępne są trzy podstawowe formy handlowe pigmentów, tj. pigment proszkowy, pigment granulowany/kompakt, pigment upłynniony. Każda z tych postaci pigmentu posiada zalety i wady. W przypadku pigmentu proszkowego dużym problemem jest pylenie w trakcie przechowywania i dozowania oraz brak precyzyjnych i ekono-

Fot. 3. Podstawowe formy handlowe pigmentów – proszek, granulata, wodna dyspersja



micznych systemów dozowania. Wady te zostały wyeliminowane przez pigmenty w postaci granulowanej – tutaj jednak należy pamiętać o bardzo dokładnym i intensywnym procesie mieszania, który zagwarantuje właściwe roztrzczenie pigmentu. Pigment w postaci wodnej zawiesiny pozwala na stosowanie precyzyjnych układów dozujących – zaletą tego pigmentu jest również dokładne zdypergowanie i zwilżenie ziaren pigmentu w trakcie procesu upłynniania. Aby zapobiegać sedymentacji pigmentu, producenci używają środków dyspergujących oraz stabilizujących.

Ze względu na wiele czynników zewnętrznych, jakim muszą sprostać pigmenty do barwienia betonu, wytypowana jest grupa związków odpowiednich do tego celu. Wieloletnie obserwacje kolorowych wyrobów betonowych wykazały, że wysoką trwałością cechują się przede wszystkim nieorganiczne pigmenty tlenkowe, ze względu na swoją strukturę oraz skład chemiczny. Głównym składnikiem większości kolorów są tlenki żelaza w rozmaitych proporcjach. Tlenki żelaza stosowane do barwienia betonu występują w różnych odmianach, powstających w zależności od warunków prowadzonego procesu technologicznego: Fe_3O_4 – pigment czarny, $FeO(OH)$ – pigment żółty, Fe_2O_3 – pigment czerwony. Są to trzy podstawowe barwy stanowiące bazę do pozyskiwania szerokiego spektrum odcieni kolorystycznych (fot. 4). Zatem jeśli mowa o kolorach pomarańczowych i brązowych, są one uzyskiwane poprzez połączenie z sobą co najmniej dwóch pigmentów, np. żółtego i czerwonego. Ilości, jakie zostaną użyte do wymieszania, są zależne od pożądanego odcienia danego koloru i mogą być one dowolne.

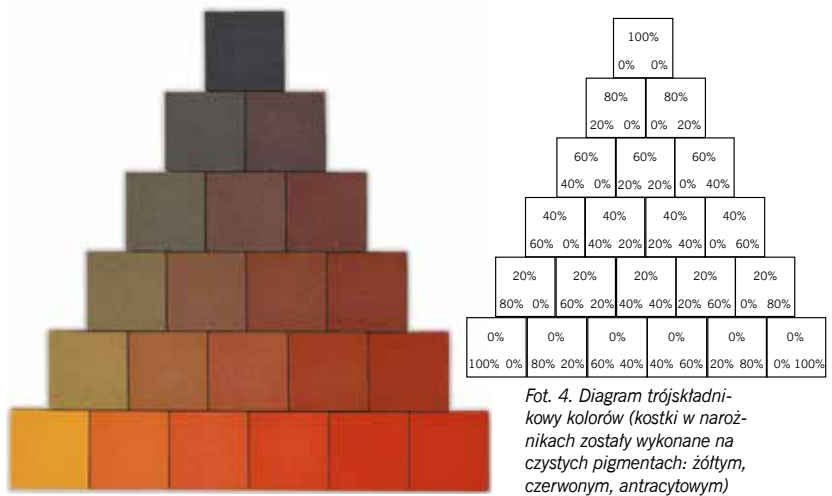
Dobór właściwego pigmentu gwarantuje odpowiednią jakość i wygląd finalnego produktu. Z uwagi na to, że kolor z fizycznego punktu widzenia nie jest cechą stałą, każdy postrzega go w inny sposób i ocena danego koloru przez obserwatora może być dość mocno subiektywna. Jednorodność koloru produktów gra kluczową rolę ze względu na oczekiwaną przez klientów powtarzalność poszczególnych elementów. Dzięki zaawansowanym technologiom możemy z powodzeniem projektować oraz dobrać kolory pigmentów bez większych ograniczeń. W tym celu wykorzystywany jest spektrofotometr stanowiący podstawę opracowań nowych wariantów kolorystycznych. Spektrofotometr w sposób precyzyjny ocenia barwę badanego obiektu, określając kolor liczbami. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru koloru jest system CIE $L^*a^*b^*$, wykorzystujący trójwymiarowy model przestrzeni barw (fot. 5). Przestrzeń barw CIE $L^*a^*b^*$ ma być możliwie jak najdokładniejszym odwzorowaniem widzenia człowieka. Opisuje barwy widzialne dla ludzkiego oka, czyli te z zakresu 400-800 nm.

System CIE $L^*a^*b^*$ składa się z 3 składowych: L, a, b, określających jasność oraz barwy chromatyczne. Współrzędne L, a, b oznaczają:

L – oś y określająca jasność, jej zakres wynosi od 0 do 100, gdzie L = 0 wskazuje na czerń, natomiast L = 100 oznacza biel

a – oś x określająca udział danej barwy w kolorze, dodatnie wartości współrzędnej a wskazują na barwę czerwoną, natomiast ujemne wartości a oznaczają barwę zieloną

b – oś z, która określa udział barw: niebieskiej bądź żółtej, w przypadku tej współrzędnej do-



Fot. 4. Diagram trójskładnikowy kolorów (kostki w narożnikach zostały wykonane na czystych pigmentach: żółtym, czerwonym, antracytowym)

Tablica 1. Pigmenty używane do barwienia betonu

Kolor	Związek chemiczny
Czerwony	Tlenek żelaza – Fe_2O_3
Żółty	Hydroksytlenek żelaza – $FeOOH$
Antracytowy	Tlenek żelaza i/lub modyfikowana sadza techniczna
Brązowy	Mieszanka tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza
Pomarańczowy	Mieszanka tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza
Biały	Tlenek tytanu – TiO_2
Zielony	Tlenek chromu
Niebieski	Tlenek kobaltu, pigmenty ultramarynowe

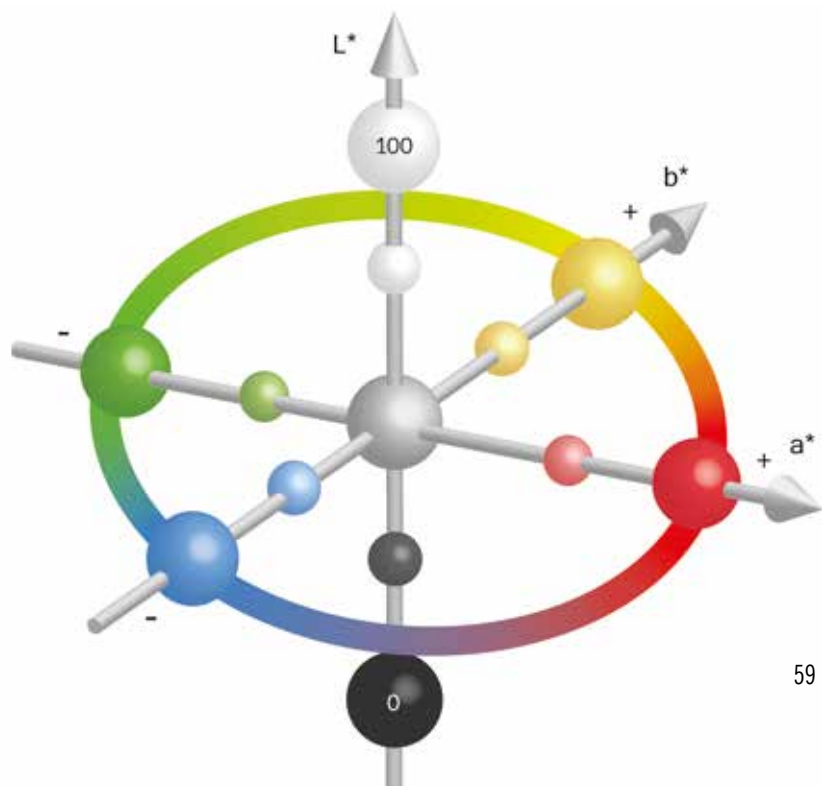
datnie wartości oznaczają barwę żółtą, a ujemne barwę niebieską.

Z wykorzystaniem systemu CIE Lab istnieje możliwość porównania 2 kolorów między sobą i określenia całkowitej różnicy barwy ΔE , która łączy różnice trzech zmiennych L, a, b. ΔE jest odległością pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni trójwymiarowej.

Dozowanie pigmentów i proces mieszania

Nawet najlepszy pigment niewłaściwie zhomogenizowany w mieszance betonowej nie da oczekiwanego efektu, dlatego tak istotne jest właściwe wprowadzenie i ujednorodnienie pigmentu w mieszance betonowej. Aby wybarwienie betonu było właściwe, ziarna pigmentu muszą otoczyć

Fot. 5. Model barw CIE Lab





Fot. 6. Wpływ koloru cementu na wybarwienie betonu. Rząd górny: próbki wzorcowe bez pigmentu. Rząd dolny od lewej: pigment żółty SY-020 6,0% m.c. CEM I 52,5R biały, CEM I 42,5R, CEM III/A 42,5N, CEM II A-V 42,5R

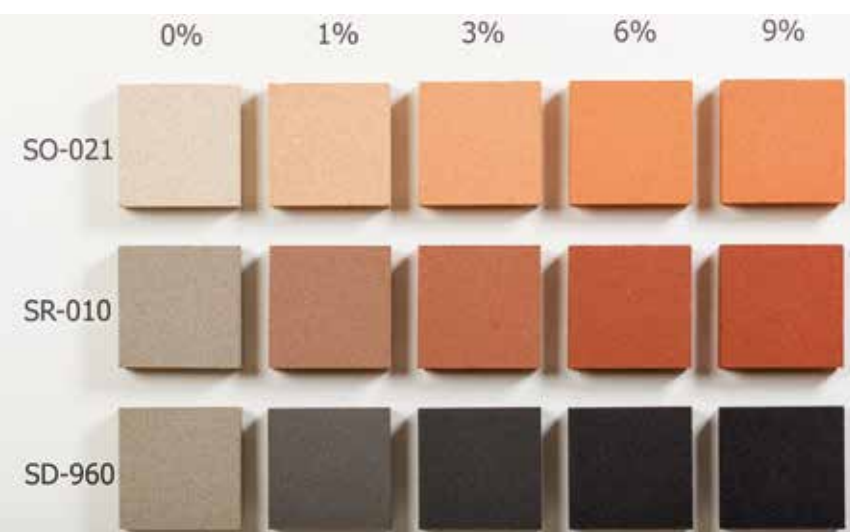


Fot. 7a. Wpływ dozowania pigmentu antracytowego SD-950 na wybarwienie betonu. Od lewej: 1% m.c., 4% m.c., 8% m.c., 12% m.c.



Fot. 7b (zdjęcie powyżej). Wpływ dozowania pigmentu czerwonego SR-010 na wybarwienie betonu. Od lewej: 1% m.c., 4% m.c., 8% m.c., 12% m.c.

Fot. 7c (zdjęcie poniżej). Wpływ dozowania pigmentu na wybarwienie betonu. Od lewej: próbka referencyjna bez dodatku pigmentu, 1% m.c., 3% m.c., 6% m.c., 9% m.c.



w pierwszej kolejności kruszywo i piasek oraz spoiwo. Z praktyki wynika, że najefektywniejszy proces mieszania polega na wstępnym wymieszaniu pigmentu z samym kruszywem i późniejsze dodawanie cementu.

Zalecana kolejność dozowania:

Kruszywa + pigment => wstępne mieszanie przez ok. 15-30 sekund

Kruszywa + pigment + cement => mieszanie przez ok. 15-30 sekund

Kruszywa + pigment + cement + woda + domieszki chemiczne => mieszanie przez ok. 45-90 sekund
Czas mieszania powinien zostać dobrany z uwagi na efektywność pracy mieszarki, której cechą charakterystyczną jest tzw. minimalny czas mieszania – dopiero jego przekroczenie gwarantuje pełne, jednolite wybarwienie mieszanki betonowej.

Wpływ koloru cementu i dodatków mineralnych

Kolor cementu, który rozciąga się od białego poprzez jasnoszary (cementy zawierające mielony granulowany żużel wielkopiecowy) aż do ciemnoszarego (cementy z dodatkiem popiołu lotnego), ma decydujący wpływ na efekt końcowy zabarwienia betonu. Wpływ koloru spoiwa jest szczególnie istotny w przypadku kolorów jasnych (żółty, pomarańczowy, zielony i niebieski), w których stosowanie cementów szarych skutkuje uzyskaniem barw stłumionych. Szczególnie widoczne jest to przy stosowaniu pigmentów żółtych, które z cementem szarym dają kolor oliwkowy. Wpływ koloru spoiwa w pigmentach antracytowych/czarnych jest niezauważalny.

Wpływ wysokości dozowania pigmentu

Dozowanie pigmentu w betonie, podobnie jak dozowanie domieszek, podaje się w procentach ilości cementu ewentualnie całego spoiwa. Przy niskim dozowaniu zależność wybarwienia od ilości pigmentu rośnie liniowo, aż do osiągnięcia stanu „nasylenia”. Po przekroczeniu tej wartości wzrost ilości pigmentu nie powoduje zmiany barwy gotowego wyrobu. Granica nasycenia koloru przeniesionego na medium zależy nie tylko od mocy barwiącej stosowanego pigmentu, ale również od parametrów betonu. Niskie dozowania pigmentów płynnych (1-3%) na białym cemencie skutkują kolorami pastelowymi. Do uzyskania intensywnej barwy w betonie o konsystencji wilgotnej potrzebne jest ok. 6% m.c., natomiast w przypadku betonu towarowego ok. 10% m.c. pigmentu płynnego. Wartości te gwarantują pełne pokrycie pigmentem wszystkich składników.

Wpływ koloru kruszywa

Pigment otacza ziarna kruszywa, jednak na skutek eksploatacji (np. poprzez ścieranie) kruszywo stopniowo odstania się – wówczas odbierany kolor będzie wypadkową zabarwionej zaprawy oraz odsłoniętego kruszywa. Podobnie jak w przypadku cementu, kolor kruszywa wpływa na barwę betonu. Naturalny odcień użytego piasku ma większy wpływ na jasne pigmenty. W przypadku kolorów brązowego i czarnego różnice są niezauważalne. Dlatego też zaleca się stosowanie jasnych kruszyw do jasnych kolorów. Wyjątek stanowi celowe kontrastowanie jasnego koloru pigmentu i ciemnego



Fot. 8. Wpływ koloru kruszywa na wybarwienie betonu
Od lewej: pigment żółty SY-020 - kruszywo jasne, kruszywo ciemne, pigment czerwony SR-010– kruszywo jasne, kruszywo ciemne

kruszywa (np. pigment biały i ciemny bazalt). Przy doborze piasku należy zwracać szczególną uwagę na ilość frakcji pyłastej (wysoka powierzchnia właściwa wymaga zwiększonego dozowania pigmentów) oraz eliminowanie iłów i gliny.

Wpływ współczynnika wodno-cementowego

Ważne jest, by stosunek w/c był zachowany, gdyż każda jego zmiana może wpływać na zmianę barwy betonu. Przy wzroście współczynnika w/c mamy do czynienia z optycznym rozjaśnieniem koloru betonu lub zaprawy. Zjawisko to występuje zarówno w betonach szarych, jak i kolorowych. Spowodowane jest to odparowywaniem wody z betonu w trakcie dojrzewania, w wyniku czego powstają pory kapilarnie, które silniej rozpraszają światło niż otaczający je beton. W efekcie beton wydaje się być jaśniejszy. Z kolei dodanie mniejszej ilości wody zarobowej do mieszanki powoduje przyciemnienie betonu. Dodatkowo redukcja wody wymaga większej ilości domieszki chemicznej w celu uzyskania jednakowej konsystencji, co w konsekwencji również może mieć wpływ na efekt końcowy wybarwionego elementu.

Wpływ warunków dojrzewania betonu

Dojrzewanie betonu w niskich temperaturach skutkuje powstawaniem większych produktów hydratacji, które słabiej rozpraszają światło, co skutkuje wrażeniem zwiększenia intensywności wybarwienia gotowego wyrobu. Zbyt wysoka wilgotność powietrza (powyżej punktu rosy) w trakcie dojrzewania może doprowadzić do powstawania wykwitów wapniowych i zmniejszenia intensywności wybarwienia.

Warunki eksploatacji

Na skutek eksploatacji kolor gotowego wyrobu może ulegać zmianom. Czynniki, które mają decydujący wpływ, to wykwity węglanowe, ciągły proces hydratacji cementu, ścieranie warstwy fakturowej oraz wnikiwanie w pory zanieczyszczeń i pyłów. Szczegół-

nie zjawisko wykwitów węglanowych jest dużym problemem, nie ma wpływu na trwałość, ale istotnie zmienia estetykę wyrobów barwionych. Barwniki nie mają wpływu na powstawanie wykwitów, są one efektem karbonatyzacji wodorotlenku wapnia na powierzchni betonu. Wolne wapno powstające w trakcie hydratacji jest rozpuszczane w wodzie zarobowej (wykwit pierwotny) lub wodzie deszczowej (wykwit wtórny) i transportowane na powierzchnię betonu, gdzie podlega karbonatyzacji i tworzy nierozpuszczalną w wodzie sól – węglan wapnia. Producenci betonu stosują wiele zabiegów, które mają minimalizować ryzyko wystąpienia wykwitów, wśród nich jest m.in. zapewnienie optymalnych warunków dojrzewania, uzyskanie maksymalnie zagęszczonego betonu z minimalną ilością kapilar, które są odpowiedzialne za transport rozpuszczonego wodorotlenku, oraz stosowanie domieszek hydrofobizujących, które również ograniczają transport cieczy przez system kapilar.

Do barwienia betonu można stosować pigmenty w różnej formie i z różnych źródeł, ale nie każdy z nich gwarantuje najwyższą jakość. Trwałość, powtarzalność i określona kolorystyka grają kluczową rolę przy wyborze pigmentu do danego projektu. Dzięki nowoczesnym technologiom projektowanie unikatowych kolorów stało się możliwe. Pozwala to na uzyskanie szerokiego wachlarza kolorystycznego. To kolor nadaje budynkom charakter i sprawia, że stają się one bardziej atrakcyjne. Jednakże należy mieć na uwadze, jak wiele składowych niezależnych od właściwości pigmentu ma wpływ na efekt końcowy zabarwionego elementu, zaczynając od doboru surowców, poprzez proces produkcji, a na warunkach eksploatacji kończąc. Należy to brać pod uwagę, aby efekt końcowy był zgodny z oczekiwaniami projektanta, inwestora i wykonawcy.

Ewelina Szymczak
Michał Oleksik
ATLAS sp. z o.o.



Fot. 9. Wpływ współczynnika wodno-cementowego na wybarwienie betonu – pigment brązowy SB-007.
Od lewej: w/c = 0,65, w/c = 0,55, w/c = 0,45, w/c = 0,35