

dr inż., Wioletta Jackiewicz-Rek

mgr inż., Jakub Zabawski

dr inż., Maciej Kalinowski

dr inż., Karol Chilmon

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

mgr inż., Ewelina Fiks

mgr inż., Arkadiusz Fornal

ATLAS

Wykorzystanie autorskiej metody analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego

Using an original image analysis method to assess efflorescence on the surface of colored architectural concrete

Streszczenie

Beton architektoniczny może być pięknym tworzywem w rękach projektantów i architektów przekutym na trwałe formy przez technologów i wykonawców konstrukcji. Jego wszechstronność przyczyniła się do szerokiego zastosowania w różnych realizacjach budowlanych, w szczególności w przestrzeniach publicznych, gdzie kolorowe elewacje, wnętrza i nawierzchnie z betonu stają się coraz powszechniejsze. W przestrzeni publicznej można zauważyć barwione nawierzchnie betonowe i elewacje budynków. W Polsce, w ostatnich latach, beton barwiony wykorzystano do kształtowania formy wielu obiektów publicznych, szczególnie muzealnych np. Muzeum Wojska Polskiego na warszawskiej cytadeli, Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie, Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku czy też Muzeum Józefa Piłsudskiego w Sulejówku. Jednakże brak ujednoliconych metod badania trwałości barwy betonu barwionego utrudnia rzetelną ocenę jego odporności na czynniki degradacji. Zmiany kolorystyczne mogą być spowodowane ekspozycją na promieniowanie UV, zabrudzeniami, uszkodzeniami mechanicznymi czy wykwitami solnymi na powierzchni. W niniejszej pracy zaproponowano nowy sposób oceny wykwitów węglanowych na powierzchni barwionych betonów architektonicznych poddanych przyspieszonemu starzeniu. Badania przeprowadzono na próbkach betonu zróżnicowanych pod względem rodzaju i ilości cementu i pigmentów. Zmiany barwy określono za pomocą spektrofotometru, natomiast zakres zmian powierzchniowych analizowano algorytmicznie na podstawie skanów wysokiej rozdzielczości przy użyciu środowiska programistycznego Python. Sformułowane wnioski dostarczają praktycznych wytycznych dotyczących wdrożenia proponowanej metodyki w procesie kontroli jakości elementów z betonu barwionego.

Abstract

Architectural concrete can be a beautiful material in the hands of designers and architects, transformed into durable forms by technologists and construction contractors. Its versatility has contributed to its wide use in various construction projects, especially in public spaces, where colored facades, interiors and surfaces made of concrete are becoming increasingly common. In public spaces, you can see colored concrete surfaces and building facades. In Poland, in recent years, colored concrete has been used to shape the form of many public buildings, especially museums, such as the Polish Army Museum in the Warsaw Citadel, the Museum of Modern Art in Warsaw, the Museum of the Second World War in Gdańsk or the Józef Piłsudski Museum in Sulejów. However, systematic evaluation of color durability in pigmented concrete remains challenging due to the absence of standardized test protocols. Chromatic alterations may arise from ultraviolet exposure, soiling, mechanical abrasion, or crystallization (efflorescence) on the surface. This study introduces an analytical methodology for quantifying carbonate efflorescence on colored architectural concretes subjected to accelerated aging. Concrete specimens, formulated with varying cement types and pigments, were assessed for colorimetric changes using a spectrophotometer, while surface alterations were quantified through algorithmic image analysis of high-resolution scans implemented in the Python programming environment. The results yield practical guidelines for employing this assessment technique in the quality control of pigmented concrete elements.

1. Beton architektoniczny

Beton architektoniczny może być pięknym tworzywem w rękach projektantów i architektów przekutym na trwałe formy przez technologów i wykonawców konstrukcji. O ile z betonem zwykłym różnych klas i właściwości nie ma specjalnie trudności realizacyjnych, to do „architektury” trzeba się odpowiednio przygotować. Starania dotyczą głównie jakości powierzchni betonu, której kształtowanie rozpoczyna się już na etapie projektowania, kiedy to planowane są nie tylko kształt elementu, wymiary, zbrojenie, otulina, ale również cechy związane z estetyką powierzchni w tym jej kolor, rysunek i tekstura. Te założenia projektowe warunkują często technologię wykonania i szereg czynników, które trzeba przewidzieć, a które dosłownie odcisną piętno na powierzchni betonu licowego. Nie bez znaczenia jest tutaj skład mieszanki betonu architektonicznego, który tylko pieczołowicie dobrany w połączeniu z odpowiednio dostosowaną technologią wykonania gwarantują pożądany efekt architektoniczno-plastyczny powierzchni elementu czy też obiektu [1÷4]. Jeśli „obraz” całości jest zgodny z oczekiwaniami i specyfikacją, to należy pamiętać o specjalnym zabezpieczeniu powierzchni, aby nie uległa destrukcji ani na etapie dalszej budowy i wykańczania obiektu ani podczas użytkowania i eksploatacji. Nie chodzi tylko o właściwą pielęgnację betonu w konstrukcji ale również zabezpieczenia przed wpływem czynników korozyjnych czy aktami wandalizmu. Dzisiejsze możliwości i dostępne na rynku środki pozwalają na skuteczne zabezpieczenie powierzchni betonowych.

Niezależnie od rodzaju wykończenia powierzchni betonu architektonicznego, każdy jego rodzaj może być barwiony. Można łączyć barwienie z formami strukturalnymi, szlifowaniem, piaskowaniem uzyskując bardzo efektowne różnorodne powierzchnie, które często są dodatkowym wyrazem znaczenia obiektów z nich wykonanych.

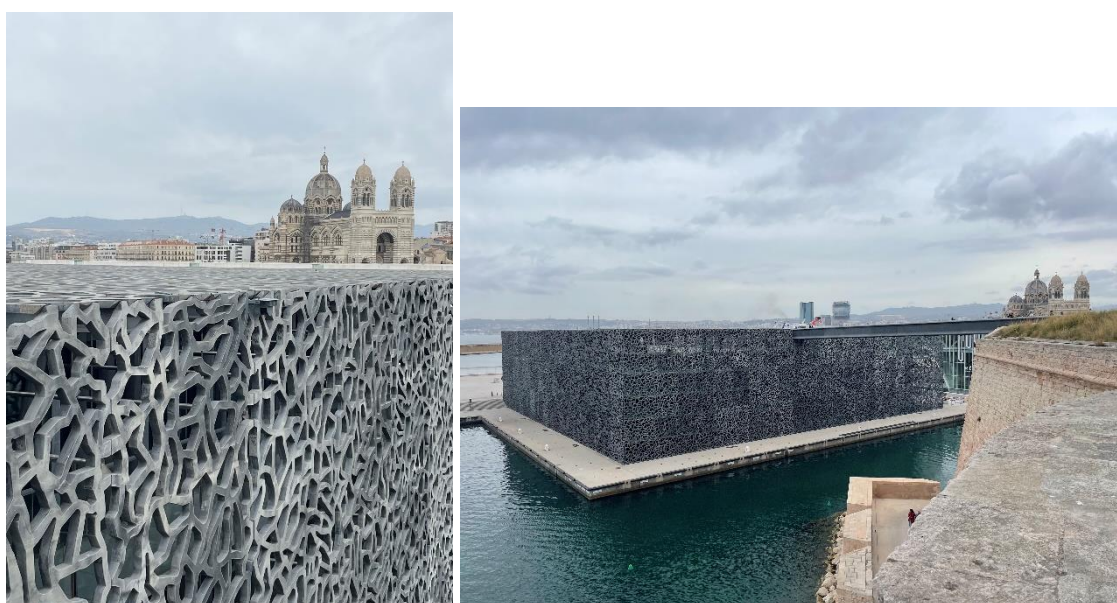
Dodatkowo można w ten sposób łatwo zintegrować budowle z otoczeniem dzięki dopasowaniu odcienia do otaczającego krajobrazu czy też sąsiedniej zabudowy.

Beton barwiony umożliwia subtelne wpisanie obiektu w otoczenie.

Pozostaje tylko kwestia trwałości estetycznej i technicznej takich rozwiązań, które w znacznej mierze zależą od staranności projektowej w doborze ilościowym i jakościowym składników betonu, substancji barwiących, a także reżimu

technologicznego wykonania i zabezpieczenia konstrukcji z betonu. Znane są realizacje z kolorowego betonu, których barwa, struktura i parametry techniczne pozostają niezmiennie przez dekady. Przykładem może być wybudowany w roku 2014 budynek Muzeum Cywilizacji Europejskiej i Śródziemnomorskiej (MuCEM) w Marsylii, gdzie ażurową fasadę wykonano z barwionego w masie betonu wysokiej wytrzymałości z dodatkiem czarnych pigmentów nieorganicznych, zapewniających głęboki kolor odporny na działanie promieniowania UV i aerozoli morskich. Elewacja muzeum składa się z około 400 prefabrykowanych paneli o wymiarach 6 x 3 m (rys. 1).

Architekt tego budynku Rudy Ricciotti za projekt otrzymał nagrodę Colored Concrete Works Award 2017. Kolejnym przykładem świadczącym o trwałości jest budynek CBR w Brukseli mający już status chronionego zabytku (od 2018 roku). Zaprojektowany przez architektów Constantina Brodzkiego i Marcela Lambrichsa i zbudowany w latach 1967÷1970 posiada fasadę złożoną z 756 owalnych prefabrykowanych modułów z białego cementu rozłożonych na dziewięciu piętrach i dwóch równoległych skrzydłach. Biały beton architektoniczny też może być barwiony, najczęściej bielą tytanową – tak jak ostatnio zrealizowany obiekt Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie wykonany ze spektakularnie białego betonu z białego cementu i z białym pigmentem.



Rys.1. Muzeum Cywilizacji Europejskiej i Śródziemnomorskiej (MuCEM) w Marsylii
[materiały własne]

1.1 Barwienie powierzchni betonu

Kolor powierzchni betonu można uzyskać na dwa sposoby – w efekcie barwienia betonu „w masie” lub jedynie zmiany koloru na powierzchni (powierzchniowe barwienie betonu).

Barwa betonu stwardniałego zależy od wielu czynników, takich jak: ilość dozowanego pigmentu, współczynnik masowy pigment-spoivo, rodzaj cementu oraz jego skład chemiczny, kolor kruszywa, współczynnik wodno-cementowy, warunki dojrzewania betonu i warunki jego eksploatacji. Uzyskanie jednolitej barwy powierzchni betonu barwionego jest zależne od warunków materiałowych i technologicznych. Ważne jest, aby mieszanka betonowa podczas układania w poszczególnych partiach miała tę samą konsystencję, była wykonana z tych samych materiałów i była w pełni zhomogenizowana. Z uwagi na to, zaleca się stosowanie odpowiednich środków kontroli produkcji w celu ograniczenia skutków ryzyka niejednorodności kolorystycznej. Trwałość uzyskanej barwy jest zależna od warunków ekspozycji na jakie powierzchnia betonowa została wystawiona – kolor będzie się zmieniał w zależności od środowiska. W środowisku przemysłowym i morskim, betony barwione wykazują znaczne zmiany koloru w stosunku do warunków mniej agresywnych. Powierzchniowe barwienie betonu uzyskuje się między innymi poprzez użycie barwników na bazie kwasów – zastosowanie ich pozwala na stworzenie często skomplikowanych kształtów czy też rysunków na jego powierzchni. Barwniki na bazie kwasów wnikają na głębokość kilkunastu milimetrów w głąb powierzchni betonu i tym samym reagują ze związkami, które powstały w wyniku hydratacji spoiwa cementowego. Duży wpływ na końcową barwę ma struktura betonu, ilość naniesionego środka i głębokość jego penetracji. Innym sposobem powierzchniowego barwienia betonu, jest stosowanie cienkowarstwowych powłok, które zmieniają odcień powierzchni betonu lub ujednolicają kolorystycznie powierzchnię zewnętrzną.

1.2 Pigmenty

Istnieje wiele różnych substancji barwiących, dzięki którym można uzyskać efekt barwienia, m.in. barwniki, laki i pigmenty. Pigmenty w odróżnieniu od barwników nie są rozpuszczalne w wodzie, dlatego też są bardziej efektywne w procesie barwienia betonu. Dostępne na rynku pigmenty do betonu można podzielić na: ciekłe, proszkowe, granulowane. Pigmenty wykorzystywane w produkcji barwionego betonu to głównie wysokoprocentowe tlenki żelaza. Wykorzystuje się tlenki żelaza barwiące na czerwono, hydroksytlenki żelaza – na żółto, mieszaninę tlenków i hydroksytlenków żelaza dające pomarańczowy lub brązowy kolor, tlenek chromu – zielony i tlenek kobaltu – niebieski. Czarny kolor uzyskuje się przy użyciu tlenków żelaza i/lub modyfikowanej sadzy technicznej. Do barwienia betonu wykorzystuje się również tlenki manganu, tlenki i wodorotlenki kobaltu, glinu, niklu i antymonu, zieleni i błękitów ftalocyjaninowych [5] oraz pigmenty specjalne, zwane tak z uwagi na swoje dodatkowe właściwości (oprócz barwienia) np. metaliczny połysk, właściwości luminescencyjne i właściwości magnetyczne [6].

Wyróżnia się również podział na pigmenty organiczne i nieorganiczne. Pigmenty nieorganiczne z reguły nie wpływają szkodliwie na przebieg wiązania cementu. Pozyskiwane są z naturalnych źródeł mineralnych. Ich skład chemiczny to głównie tlenki, siarczki lub siarczany [7]. Pigmenty organiczne charakteryzują się większą siłą

barwienia - nawet 10-krotnie większą niż pigmenty mineralne [8]. Z uwagi na różnorodne czynniki zewnętrzne, przy projektowaniu mieszanki betonowej bardzo ważne jest staranne dobranie odpowiedniego do założeń pigmentu.

Długotrwałe badania wyrobów betonowych o różnych kolorach wykazały, że najwyższą trwałością charakteryzują się głównie nieorganiczne pigmenty tlenkowe, dzięki swojej strukturze i składowi chemicznemu [9]. Udział pigmentów nieorganicznych w mieszankach betonowych nie wpływa znacznie na reologię oraz na cechy wytrzymałościowe stwardniałego betonu [10]. Tlenki żelaza w różnych proporcjach stanowią główny składnik większości dostępnych kolorów, przybierając różne odmiany w zależności od warunków zastosowanego procesu technologicznego [11].

Pigmenty stosowane do barwienia betonu powinny spełniać wymagania normy PN-EN 12878 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie. Wymagania i metody badań” [N1]. Substancje barwiące nie są traktowane jako dodatki, ani domieszki – tworzą osobną grupę modyfikatorów. Każdy pigment przeznaczony do barwienia betonu powinien charakteryzować się znaczną odpornością na intensywnie alkaliczne środowisko, a także być odpornym na wpływ światła i czynników atmosferycznych. Jednocześnie powinien gwarantować powtarzalność koloru w przypadku gotowych wyrobów [11].

Dozowanie pigmentu do mieszanki betonowej jest zależne od jego rodzaju oraz od zaprojektowanego nasycenia barwy. Wielkość dozowania podaje się w % masy spoiwa. Zwykle zalecane dozowanie pigmentów proszkowych wynosi 3-5%, a pigmentów ciekłych 4-6%. Typowe dozowanie pigmentów mieszczą się w przedziale 1-10%.

1.3 Wykwity na powierzchni betonu

Wykwity na powierzchni betonu to zjawisko niepożądane, często występujące w konstrukcjach betonowych, w szczególności narażonych na działanie czynników atmosferycznych. Objawiają się one w postaci białych lub jasnozabarwionych nalotów, głównie na powierzchniach elewacyjnych, nowo wykonanych prefabrykatów, czy właśnie betonach architektonicznych. Zjawisko to ma przede wszystkim charakter estetyczny, ale może także świadczyć o procesach migracyjnych soli i nadmiarze wilgoci, co ma znaczenie dla trwałości betonu.

Wykwity dzieli się przede wszystkim na:

- Wykwity pierwotne: pojawiają się wkrótce po zakończeniu procesu dojrzewania betonu, gdy zawartość wilgoci w mieszance jest wciąż wysoka. Głównym sprawcą jest uwalnianie się wodorotlenku wapnia (Ca(OH)_2) z matrycy cementowej i jego migracja na powierzchnię, gdzie w reakcji z CO_2 z powietrza powstaje nierozpuszczalny węgiel wapnia (CaCO_3).

- Wykwity wtórne: powstają po pewnym czasie eksploatacji konstrukcji i są efektem zawilgocenia elementu oraz rozpuszczania i migracji soli (np. Na^+ , K^+ , SO_4^{2-}) z wnętrza betonu na zewnątrz.

Proces wykwitów zależy od obecności rozpuszczalnych soli w betonie, działania wody (transport soli), parowania (transport soli do powierzchni) i dwutlenku węgla w powietrzu (w przypadku CaCO_3). Wykwity rozpoznaje się głównie wizualnie, jednak możliwe jest bardziej zaawansowane badanie przy pomocy analizy mikroskopowej SEM/EDS, które pozwalają na identyfikację składu chemicznego i morfologii soli, czy też spektroskopii do określania mineralogiczne osadów. Znane są metody

ograniczania wykwitów przez modyfikację składu betonu dodatkami mineralnymi (popioły lotne, żużle) i ograniczanie zawartości cementu portlandzkiego czy też obniżanie w/c, poprawa szczelności betonu, stosowanie aktywowanych alkalicznie materiałów czy też użycie nano-dodatków (nano-krzemionka, grafen), które ograniczają porowatość i skurcz betonu. Przydatne są również zabiegi powierzchniowe w tym hydrofobizacja betonu (silany, siloksany) czy też stosowanie powłok mineralnych i organicznych (np. krzemianowe).

Wykwity pogarszają odbiór wizualny powierzchni, dlatego są szczególnie niepożądane w przypadku kolorowych kompozytów cementowych monolitycznych i prefabrykowanych, w tym kostki brukowej [12]. Wykwit węglanowy według wymagań zawartych w normach i aprobaty technicznych nie jest klasyfikowany jako kryterium oceny jakości wyrobu [N2÷N4].

Choć wykwyty nie zagrażają trwałości kompozytu, mają istotny wpływ na postrzeganie jakości kolorystycznej oraz jednorodność zabarwienia, zwłaszcza betonu architektonicznego w ciemnych odcieniach.

2. Cel i zakres badań

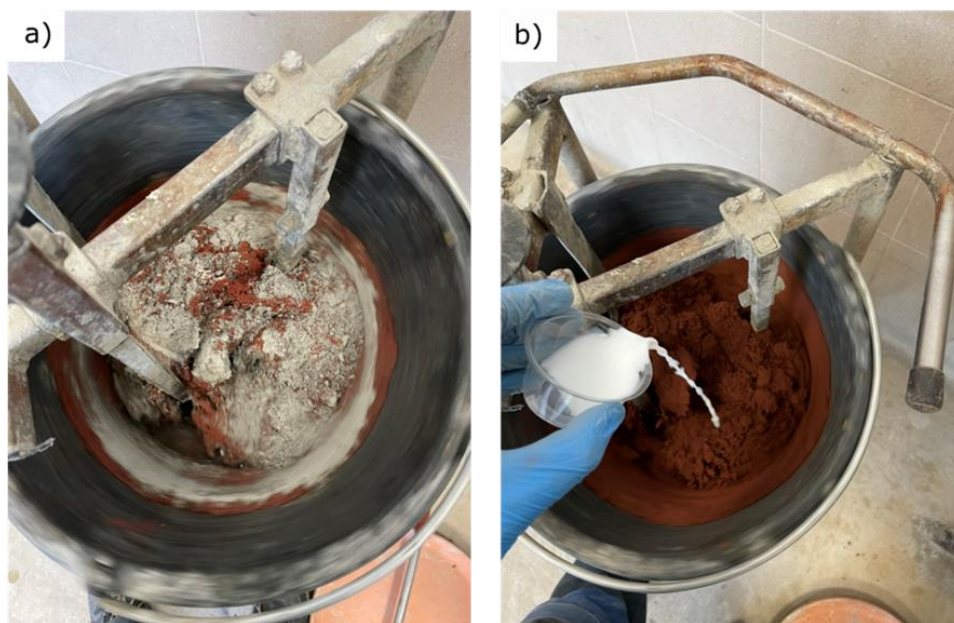
Celem badań prezentowanych w pracy była ocena możliwości zastosowania metody analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego. W tym celu zaprojektowano, wykonano i przebadano 48 składów betonów z pigmentami, (łącznie 288 próbek betonu barwionego). Wykonane próbki, po 7 dniowej pielęgnacji w komorze klimatycznej (Temp. = $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i RH = $90 \pm 5\%$), zostały dostosowane do badań – z próbek cylindrycznych wycięto górną powierzchnię, a próbki prostokątne zostały przełamane na dwie połowy. Nominalne wymiary próbek wykorzystanych do badań to: kostka $20 \times (40 \div 50) \times 100$ mm, walec 20×100 mm. Szerokość kostki różni się między poszczególnymi seriami z uwagi na sposób przygotowania próbki do badania – próbki zostały przełamane. Do badań wykorzystano 48 próbek cylindrycznych i 96 próbek prostokątnych. Probki poddano przyspieszonemu starzeniu według autorskiej metody w komorze karbonatyzacyjnej oraz skanowano powierzchnie próbek z użyciem skanera oraz badano ich barwę za pomocą spektrofotometru przed rozpoczęciem pierwszego cyklu przyspieszonego starzenia, a następnie po 5 cyklach oraz 10 cyklach starzenia. Obrazy ze skanera poddano analizie graficznej.

Zaprojektowano betony barwione zróżnicowane pod względem rodzaju i zawartości cementu oraz rodzaju pigmentu. Zdecydowano się na zastosowanie dwóch różnych zawartości cementu – 350 i 450 kg/m^3 . Ilość pigmentu we wszystkich składach próbek była określona jako 8% masy spoiwa, a domieszki jako 1% masy spoiwa. Współczynnik woda-cement był stały we wszystkich składach i wynosił 0,28. Z uwagi na to, że dodawane pigmenty były pigmentami w formie dyspersji wodnej, wodę z dyspersji uwzględniono przy określeniu całkowitego współczynnika woda-cement. Do wykonania próbek zostały wykorzystane 4 różne rodzaje cementów i 5 różnych pigmentów.

2.1 Materiały i wykonanie próbek

Do wykonania próbek zastosowano cztery różne cementy: CEM I 42,5 R, CEM II/A-V 42,5 R-NA, CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R i CEM II/A-S 42,5 R spełniające wymagania normy PN-EN 197-1 „Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” Użyto również piasku kopalnianego o

frakcji 0/2 zgodnego z wymaganiami PN-EN 13139 „Kruszywa do zaprawy”. Woda użyta do wykonania próbek była wodą z sieci wodociągowej zgodna z normą PN-EN 1008 „Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”. W celu ograniczenia tworzenia się wykwitów węglanowych użyto domieszki uszczelniającej ATLAS Angucel ES-200 zgodnej z PN-EN 934-2. Wykorzystano pięć różnych pigmentów w formie upłynnionej. Wśród nich znalazły się trzy pigmenty o kolorze antracytowym (ATLAS COLOR SD-050 Kolor antracytowy - na bazie tlenków żelaza, ATLAS COLOR SD-800 Kolor antracytowy - na bazie wielkocząsteczkowej sadzy technicznej i ATLAS COLOR SD-960 Kolor antracytowy – na bazie tlenków żelaza i modyfikowanej sadzy technicznej (mix)), jeden czerwony (ATLAS COLOR SR-040 Kolor czerwony – na bazie tlenków żelaza) i jeden żółty (ATLAS COLOR SY-020 Kolor żółty – na bazie tlenków żelaza). Wykonano również badania pigmentów na skaningowym mikroskopie elektronowym, które potwierdziły różną morfologię wykorzystanych pigmentów – zaobserwowano zróżnicowanie w zależności od rodzaju pigmentu - od ziaren o morfologii sferycznej po „igielkowate” i nieforemne. Próbkę betonową wykonano stosując stałą procedurę uwzględniającą kolejność i czas dozowania i mieszania składników. Do wstępnie nasycanego kruszywa połową wody zarobowej dodawano pigment, cement, pozostałą objętość wody i domieszkę uszczelniającą zachowując przy tym odpowiednio te same, ustalone czasy i warunki mieszania w trosce o pełną homogenizację składników (rys. 2). Próbkę betonową zostały zaformowane na dwa sposoby za pomocą: prasy żyratorowej i prasy hydraulicznej (rys. 3). Poprzez różne sposoby zagęszczania mieszanki uzyskano dwa kształty próbek – w formie kostki (za pomocą prasy hydraulicznej) i cylindra (w prasie żyratorowej).



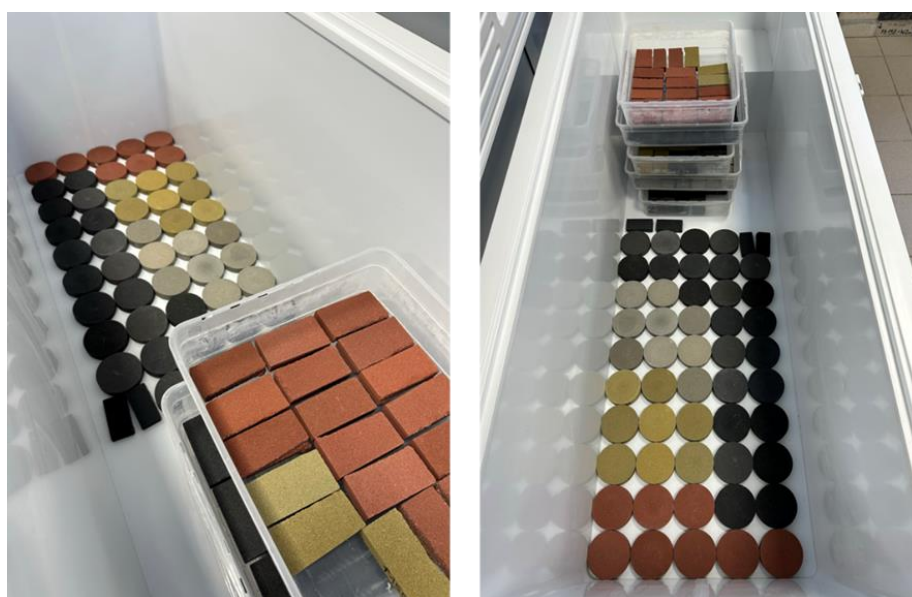
Rys.2. Wykonywanie próbek betonu barwionego a) dodanie cementu b) dozowanie domieszki [materiały własne]



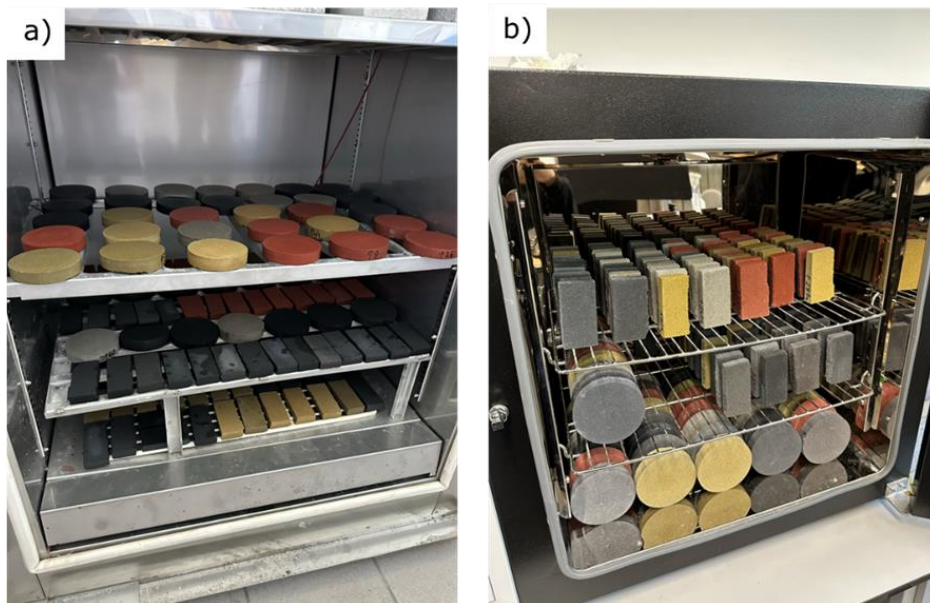
Rys.3. Wykonywanie próbek betonu barwionego a) formowanie próbek za pomocą prasy hydraulicznej b) formowanie za pomocą prasy żyratorowej [materiały własne]

2.2 Starzenie próbek betonowych barwionych

Opracowano autorską metodę starzenia próbek betonowych barwionych w celu „pobudzenia” powstawanie ewentualnych wykwitów na ich powierzchni. Metoda ta polegała na cyklicznej zmianie środowiska, w którym znajdowały się próbki – w ciągu jednego cyklu (24 godziny) przyspieszonego starzenia próbki znajdowały się w pojemniku wypełnionym wodą destylowaną (8 godzin), gdzie po częściowym zanurzeniu próbek (do 75% ich wysokości), w wyniku podciągania kapilarnego wody, łatwo-wymywalne związki z matrycy cementowej były transportowane na powierzchnię zewnętrzną próbek (rys. 4). Następnie, próbki umieszczano w komorze karbonatyzacyjnej, w środowisku o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotności $70 \pm 5\%$ oraz stężeniu dwutlenku węgla 3% , na 16 godzin (rys. 5).



Rys. 4. Próbkę podczas nasycania wodą destylowaną [materiały własne]



Rys.5. Próbkki umieszczone w: a) komorze karbonatyzacyjnej; b) suszarce [materiały własne]

Przed badaniami spektrofotometrem oraz skanowaniem powierzchni próbki były suszone do stałej masy po 5 i 10 cyklach starzenia.

2.3 Metody badań

Skanowanie powierzchni próbek betonowych odbywało się w stałych warunkach oświetlenia, przygotowano w tym celu pomieszczenie-ciemnię bez dostępu światła zewnętrznego. Do skanowania powierzchni próbek użyto skanera FUJITSU ScanSnap SV600 wyposażonego w matrycę CCD. Skaner oświetlał skanowaną próbkę oraz wyjście obiektywu białym światłem z lampy LED. Próbki zostały zeskanowane przed rozpoczęciem procedury przyspieszonego starzenia, jak i w trakcie jego trwania – po 5 i 10 cyklach przyspieszonego starzenia w komorze karbonatyzacyjnej. Próbki przed rozpoczęciem procesu skanowania zostały wysuszone do stałej masy, z uwagi na to, że barwa próbek zmienia się wraz ze zmianą ich wilgotności. Próbki zostały kolejno zeskanowane na jednolitym tle.

Badanie barwy próbek betonowych barwionych odbyło się z wykorzystaniem spektrofotometru NS800 firmy 3nh. Zgodnie z opracowaną metodą badania na każdej badanej próbce wykonano 16 pomiarów w losowych miejscach na jej powierzchni górnej. Następnie określono parametry barw w przestrzeni CIELAB. Badanie spektrofotometrem pozwala opisać kolor na podstawie trzech wartości składowych (L; a; b). Składowa L odpowiada za jasność, składowa a za kolor czerwony i zielony, składowa b za kolor niebieski i żółty. Różnicę barw wyraża się jako odległość między punktami barw w przestrzeni kolorymetrycznej – wzór (1).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

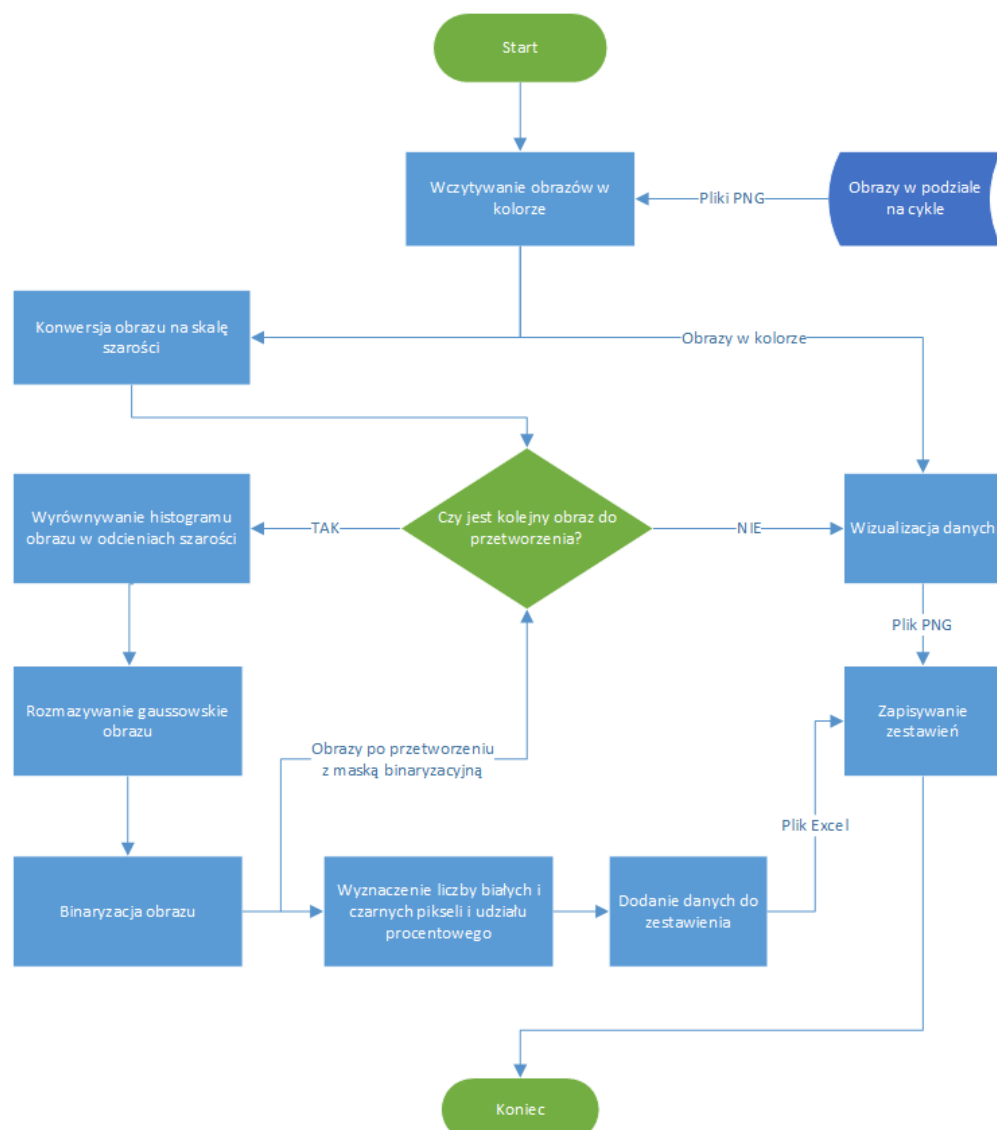
gdzie:

ΔL^* , Δa^* , Δb^* - różnice wartości każdej ze współrzędnych dwóch porównywanych barw psychofizycznych – próbki i wzorca.

ΔE_{ab}^* - różnica barw pomiędzy próbką a wzorcem.

2.4 Automatyczna analiza obrazu – algorytm

Algorytm do automatycznej analizy obrazu został stworzony w języku programowania Python. Schemat blokowy skryptu został przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy skryptu do automatycznej analizy obrazu

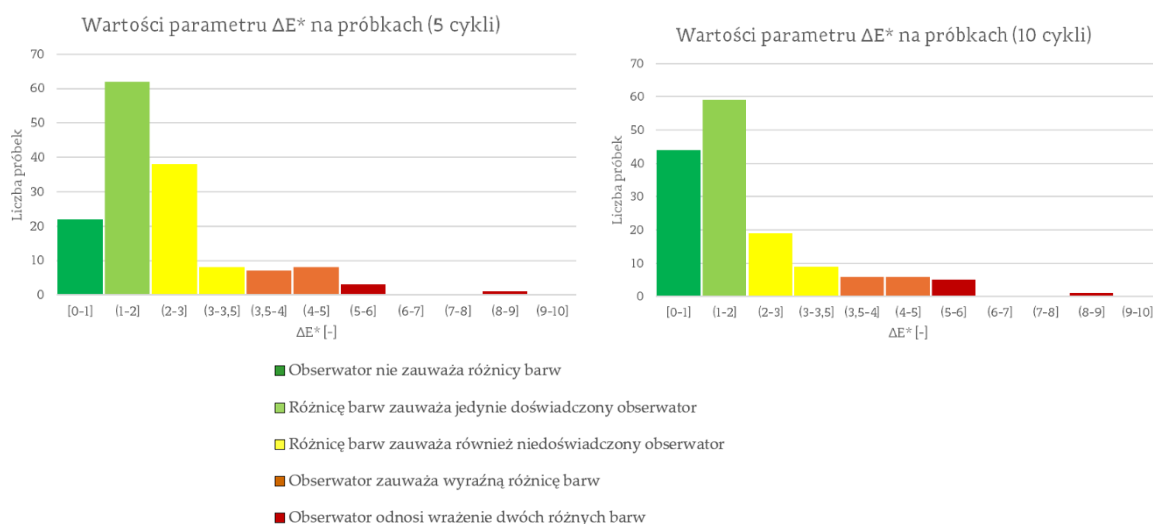
Opracowany algorytm umożliwia automatyczną analizę obrazów zeskanowanych powierzchni próbek. Algorytm przetwarza pobrany obraz na skalę szarości, wyrównuje histogram utworzony na obrazie w skali szarości i stosuje rozmycie gaussowskie. W następnym etapie algorytm poddaje przetworzony obraz binaryzacji. W ten sposób powstaje obraz, w którym każdy piksel jest określony kolorem białym, bądź czarnym. Próg binaryzacji wszystkich badanych próbek jest stały i wynosi 170.

Program zlicza liczbę pikseli czarnych oraz białych i określa procentowy stosunek do całkowitej liczby pikseli w obrazie. Dzięki takiemu rozwiązaniu, program jest w stanie określić na jakiej powierzchni próbki zaistniała istotna zmiana barwy. Następnie, program tworzy zestawienie z danymi liczbowymi w programie Excel oraz zestawienie graficzne, na którym widnieją zdjęcia próbki w trzech terminach badania – skan, obraz w skali szarości z rozmyciem gaussowskim, zbinaryzowany obraz i histogram reprezentujący liczbę pikseli o określonej barwie w skali szarości.

3. Wyniki

3.1 Badanie barwy próbek betonowych

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki różnicy barwy próbek betonowych po 5 i 10 cyklach procedury przyspieszonego starzenia. Współrzędne barwy początkowej i końcowej zostały wykorzystane do obliczenia parametru ΔE_{ab}^* za pomocą wzoru (2). Według przyjętej skali parametru ΔE_{ab}^* , można stwierdzić, że na większości badanych próbek zarówno po pięciu jak i dziesięciu cyklach przyspieszonego starzenia obserwator nie zauważył różnicy w barwie, albo różnica będzie zauważalna jedynie przez doświadczonego obserwatora, ponieważ większość próbek betonu barwionego charakteryzuje się wartościami ΔE_{ab}^* zawierającymi się w przedziale 0-1 oraz 1-2. W badaniu po 10 cyklach przyspieszonego starzenia można zauważyć wzrost liczby próbek w przedziale parametru ΔE_{ab}^* od 0 do 1 oraz spadek w przedziale 2-3 w stosunku do badania po 5 cyklach przyspieszonego starzenia.



Rys. 7. Różnica barwy ΔE^* na próbkach betonu barwionego po 5 i 10 cyklach przyspieszonego starzenia

Duży współczynnik zmienności na parametrach a i b na ciemnych próbkach (kolor antracytowy) wynika z faktu, że wielkość tych parametrów przy opisywaniu koloru czarnego w przestrzeni trójwymiarowej CIELAB jest pomijalna – wynika to z faktu, że kolor czarny, biały oraz ich połączenie w różnych proporcjach jest opisywane za pomocą parametru L, więc parametry a i b nie uczestniczą w opisie tych kolorów. Parametry a i b występują w opisie barwy czarnej przy badaniu spektrofotometrem, lecz ich wielkość jest bliska zeru, dlatego też występuje pomiędzy poszczególnymi

pomiarami przeskok przez wartość zerową z ujemnej na dodatnią (bądź odwrotnie) – stąd współczynnik zmienności tych parametrów ma dużą wartość. Przykładowo, dla próbki 258b, współczynnik zmienności parametru b w każdym terminie badania jest wysoki i wynosi nawet 837 % (tab. 1).

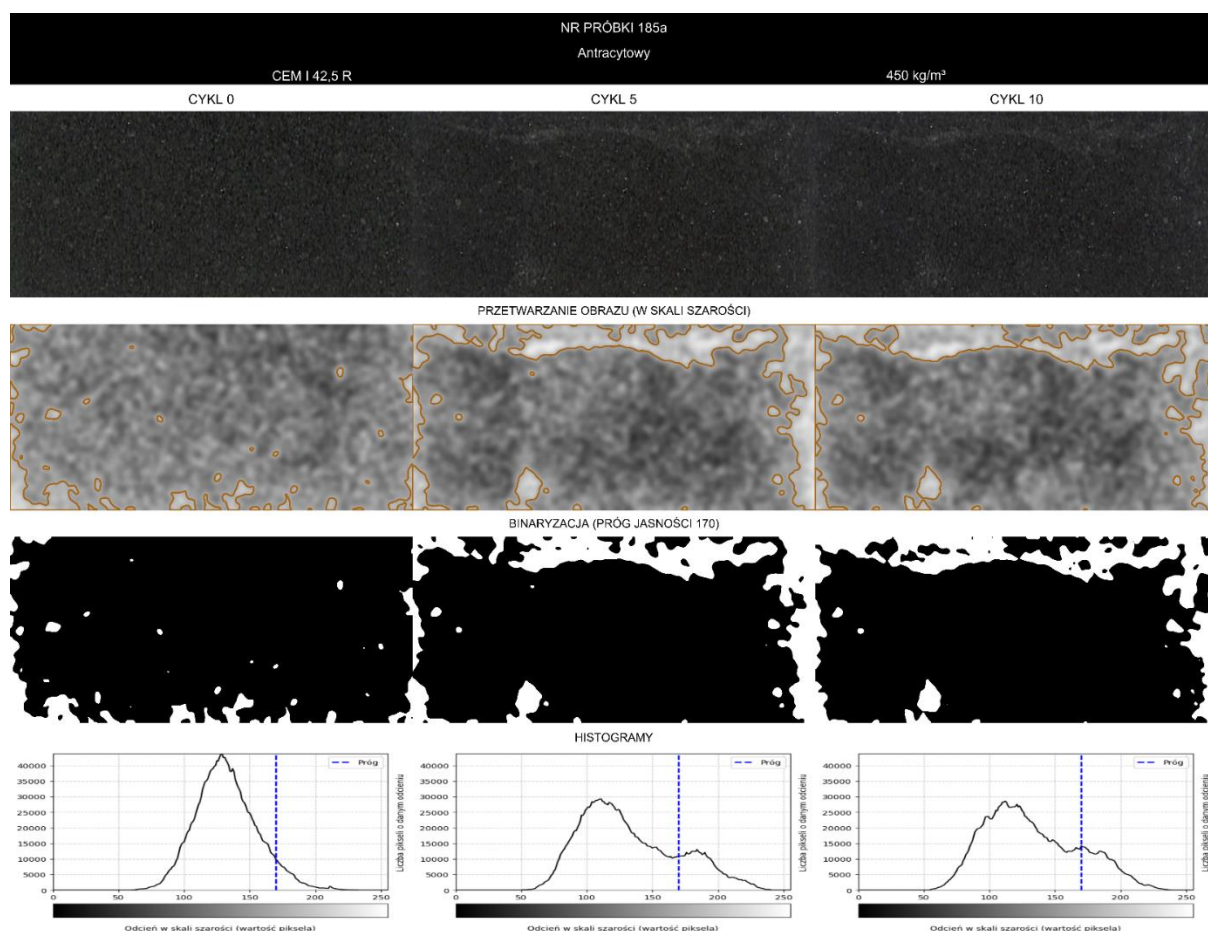
Tab. 1. Wyniki badania barwy próbki nr 258b za pomocą spektrofotometru

NR PRÓBK	258b									
CYKL	0			5				10		
	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM	Zmiana [%]	ŚREDNIA	ODCH. ST	WSP ZM
L*	23,400	0,389	1,662	21,941	0,605	2,758	-6,234	25,394	1,546	6,087
a*	0,396	1,236	312,570	0,336	0,031	9,160	-15,155	0,258	0,075	29,243
b*	-0,092	0,768	-836,952	0,660	0,096	14,611	-818,856	0,053	0,208	389,135
ΔE*				1,642				2,004		

W celu dokładności określenia barwy powierzchni betonowych zdecydowano się na pomiar w szesnastu losowo wybranych miejscach na powierzchni każdej próbki. Uśredniając wynik otrzymano barwę, która różniła się w każdym etapie przyspieszonego starzenia – przed starzeniem, po 5 i po 10 cyklach przyspieszonego starzenia. Potwierdzono też przypadki próbek, kiedy parametr ΔE_{ab}^* próbki po dziesięciu cyklach przyspieszonego starzenia w porównaniu do parametru ΔE_{ab}^* po pięciu cyklach widocznie zmalał. To zjawisko spowodowane jest losowością wykonywania pomiarów na powierzchni próbek. Z uwagi na punktowe sprawdzanie parametrów barwy, taki efekt można uzyskać, kiedy większość pomiarów zostaje wykonane poza zmianą powierzchniową (wykwitem, bądź przebarwieniem). Jest to największa wada badania barwy próbki za pomocą spektrofotometru. Z drugiej strony można uzyskać również zbyt duży parametr ΔE_{ab}^* gdy zbyt często pomiar będzie wykonywany na miejscowej zmianie powierzchniowej/przebarwieniu.

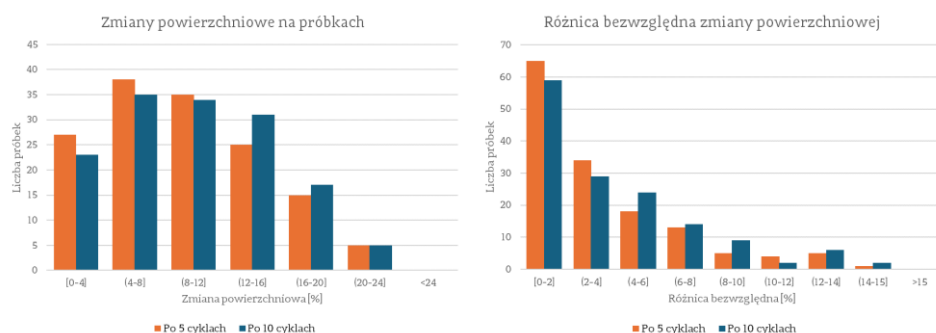
3.2 Automatyczna analiza obrazu – algorytm

Wyniki zostały automatycznie wygenerowane przez autorski skrypt do analizy obrazu. Program przeanalizował obrazy graficzne powstałe poprzez skanowanie powierzchni próbek betonowych. Zgodnie z zasadą działania skryptu, automatycznie zostały stworzone zestawienia graficzne obrazujące zmianę barwy na powierzchni próbki oraz zbiorcza tabela, w której zawarte są ilości pikseli białych i czarnych, i obliczone wartości zmiany powierzchniowej wyrażone w wartości procentowej. Przykładowe zestawienie graficzne próbki o numerze 185a wykonane w trzech terminach badania przedstawiono na rysunku 8– są to zdjęcia pokazane najwyżej. W kolejnym wierszu na zestawieniu przedstawiono próbki w skali szarości podczas graficznego przetwarzania obrazu, program stosuje rozmycie gaussowskie na zbinaryzowanym obrazie i wykrywa skupiska pikseli o tej samej barwie (białe, czarne). W kolejnym wierszu pokazano próbkę zbinaryzowaną ze stałym wcześniej ustalonym progiem binaryzacji, obszary zaznaczone kolorem białym przedstawiają zmiany powierzchniowe na próbce, a obszar o kolorze czarnym jest obszarem, który nie uległ zmianom. Do zestawienia graficznego dołączono również histogram dla każdego zdjęcia próbki, pokazuje on ile pikseli na zdjęciu reprezentuje dany odcień w skali szarości.



Rys. 8. Przykładowe zestawienie stworzone za pomocą skryptu do automatycznej analizy obrazu

Algorytm zlicza procentową zawartość obszaru białego w stosunku do całej próbki. Na rysunku 8 przedstawiono wykresy z liczbą próbek klasyfikujących się w poszczególnych przedziałach procentowych zmian powierzchniowych na próbkach. Zmiany powierzchniowe na badanych próbkach zwykle nie przekraczają 24%. Zarówno po 5 cyklach starzenia jak i po 10 cyklach najczęściej badanych próbek klasyfikuje się w trzech pierwszych przedziałach procentowych tj. od 0 do 12%. Za pomocą algorytmu można było ilościowo scharakteryzować wszystkie powierzchnie próbek. Można w ten sposób wskazać te, których zmiany miały największą powierzchnię (najwięcej wykwitów). W analizowanym przypadku były to próbki o kolorze antracytowym oraz zawartością cementu 350 kg/m³. Obszar objęty największą zmianą powierzchniową zajmował 23,12% powierzchni badanej próbki.



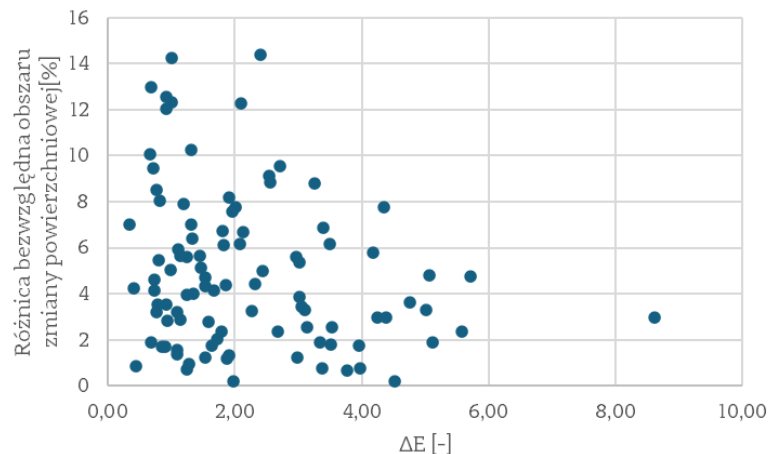
Rys. 9. Zmiany powierzchniowe na próbkach oraz różnice bezwzględne procentowej zmiany powierzchni wykwitu na próbkach

Z uwagi na to, że każda próbka była badana w trzech terminach obliczono również przyrosty zmian powierzchniowych, przedstawiono wykres różnicy bezwzględnej pomiędzy zmianą powierzchniową w trakcie oraz po procedurze przyspieszonego starzenia, a zmianą powierzchniową przed rozpoczęciem procedury (rys. 9). Różnice bezwzględne obszaru objętego zmianą w większości zawierają się od 0 do 6% zarówno po 5 jak i 10 cyklach procedury przyspieszonego starzenia próbek betonu barwionego.

Opracowana procedura przyspieszonego starzenia próbek przyczyniła się do wzrostu powierzchni wykwitu na próbkach betonu barwionego. Dzięki temu można było potwierdzić użyteczność opracowanej metodyki oceny zmian na powierzchni betonu barwionego. Po 10 cyklach przyspieszonego starzenia zmniejszyła się liczba próbek w trzech pierwszych przedziałach procentowych w porównaniu do tych samych próbek po 5 cyklach (rys. 9). Podobna zależność dotyczy różnicy bezwzględnej zmiany powierzchniowej. W dwóch pierwszych przedziałach procentowych zauważyć można spadek liczby próbek, na których zmiana powierzchniowa wzrosła po większej liczbie cykli przyspieszonego starzenia.

4. Wnioski

Zaprezentowane wyniki z badania barwy spektrofotometrem oraz z analizy obrazu zostały ze sobą skorelowane w celu określenia zależności pomiędzy badanymi właściwościami. Analiza zależności różnicy bezwzględnej obszaru zmiany powierzchniowej od parametru ΔE_{ab}^* przedstawionej na rysunku 10 nie wskazuje na istnienie żadnej korelacji. Potwierdza to tylko założenia, które były podstawą opracowanej metody bazującej na analizie obrazu. Badanie barwy spektrofotometrem określa jedynie uśrednioną zmianę barwy powierzchni próbki betonu barwionego, a algorytm do automatycznej analizy obrazu wskazuje obszary na próbce, które uległy zmianie.



Rys. 10. Wykres braku zależności różnicy bezwzględnej obszaru zmiany powierzchniowej od parametru ΔE^*

Badania spektrofotometrem określają zupełnie inne właściwości powierzchni i nie można ich stosować zamiennie. Potencjał do tworzenia się wykwitów jest możliwy do zarejestrowania tylko przy użyciu narzędzia do analizy całej powierzchni próbki betonu barwionego tak jak w przypadku zaproponowanego algorytmu. Badania punktowe wykonane za pomocą spektrofotometru nie pozwalają na ocenę zasięgu występowania wykwitów na powierzchni próbki betonowej. Ponadto średnia barwa na próbce zależy od tego w jakim punkcie wykonamy pomiar. Pomiar w losowych punktach na powierzchni betonu barwionego może określić jej uśrednioną barwę, o współczynnikach zmienności dla poszczególnych jej parametrów zależnych od jednorodności kolorystycznej próbki.

Zaproponowaną metodę można wykorzystać do wielu analiz – jak w przypadku przeprowadzonego programu badawczego potwierdzono, że zastosowanie cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5 N w przyjętym zakresie zmienności skutkowało najmniejszą tendencją do przyrostu zmian powierzchniowych wraz ze zwiększeniem masy spoiwa w mieszance betonowej. Zaś próbki z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R wykazały największą predyspozycję do wzrostu intensywności powstawania wykwitów na swoich powierzchniach wraz ze zwiększeniem zawartości spoiwa w mieszance betonowej (to tylko część wniosków, dotyczących wpływu cementu i pigmentów na powstawanie wykwitów, których zakres nie został uwzględniony w proponowanym referacie).

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników ustalono dodatkowo, że:

- Zaproponowany skrypt do automatycznej analizy obrazu może być użytecznym narzędziem do opisywania procentowej powierzchni wykwitu na badanej próbce;
- Zastosowanie analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego daje miarodajne, ilościowe wyniki;
- Intensywność powstawania wykwitów na powierzchni betonu barwionego jest zależna od czasu ekspozycji na zmienne warunki wilgotnościowe, CO₂ i temperaturę - w przedmiotowej pracy symulowane warunkami przyspieszonego starzenia.

2. Literatura

- [1] W. Jackiewicz-Rek, „Kształtowanie jakości gładkiego betonu architektonicznego”, Mat. Bud., Art. nr 9, 2015.
- [2] W. Jackiewicz-Rek i M. Mroczek, „Fotobeton jako sposób urozmaicenia formy architektonicznej budowli”, Mat. Bud., Art. nr 12, 2014.
- [3] W. Jackiewicz-Rek i P. P. Woyciechowski, „Wady betonu architektonicznego w konstrukcji”, Mat. Bud., Art. nr 2, 2014.
- [4] W. Jackiewicz-Rek i K. Kuniczuk, „Ocena jakości betonu architektonicznego w konstrukcji”, Inżynier Budownictwa, Art. nr 11, 2013.
- [5] P. Łukowski, „Modyfikacja materiałowa betonu.” Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2016.
- [6] P. Sulcova, "Options synthesis and application testing of inorganic pigments." Proceedings of 7th conference on international participation of particular substances in science, industry and environment, Technical University of Kosice, Kosice. 2012.
- [7] V. Hospodarova, J. Junak, N. Stevulova, "Color pigments in concrete and their properties." Pollack Periodica 10.3 (2015): 143-151.
- [8] K. Kurpiński, „Barwienie betonu - Praktyczne wskazówki cz. 1”. (2019).
- [9] H. Lee, J. Lee, , M. Yu, "Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks." Cement and Concrete Research 33.11 (2003): 1889-1896.
- [10] V. Corinaldesi, S. Monosi, L. M. Ruello, "Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC." Construction and building materials 30 (2012): 289-293.
- [11] E. Szymczak, M. Oleksik, "Barwienie betonu-techniczne aspekty stosowania pigmentów." Budownictwo, Technologie, Architektura (2018).
- [12] W. Kurdowski, A. Garbacik, Wykwity na betonie, Budownictwo Technologie Architektura, numer specjalny, 2005.
- [N1] PN-EN 12878:2014-05 „Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie -- Wymagania i metody badań”.
- [N2] PN-EN 1338:2005 „Betonowe kostki brukowe -- Wymagania i metody badań”.
- [N3] PN-EN 1339:2005 „Betonowe płyty brukowe -- Wymagania i metody badań”.
- [N4] PN-EN 1340:2004 „Krawężniki betonowe -- Wymagania i metody badań”.