

## Opracowanie ekologicznych metod pielęgnacji betonów drukowanych w technologii 3D zapewniające ciągłe ograniczenie skurczu

Drukowanie trójwymiarowe (ang. *3D*), określane również jako wytwarzanie addytywne (ang. *AM*), jest technologią umożliwiającą tworzenie obiektów trójwymiarowych warstwa po warstwie, bez użycia szalunków i procesu vibracji. W ostatnich latach obserwuje się znaczne zainteresowanie drukiem 3D z wykorzystaniem materiałów na bazie cementu. Problemem dużych elementów betonowych drukowanych w 3D jest ryzyko wystąpienia znacznych odkształceń skurczowych, co może prowadzić do pęknięcia elementów, a tym samym do obniżenia ich trwałości i estetyki. Chociaż naukowcy podjęli wiele działań mających na celu rozwiązanie tego problemu, większość z nich dotyczy skali laboratoryjnej. Tradycyjne metody pielęgnacji, takie jak zraszanie wodą lub przykrywanie folią, nie są odpowiednie do nowej technologii i mogą negatywnie wpływać na właściwości mieszanki lub powodować odkształcenia plastyczne materiału w trakcie twardnienia. W związku z tym konieczne jest opracowanie nowych metod pielęgnacji dedykowanych dla trójwymiarowego druku betonem (ang. *3DCP*) i zrozumienie ich wpływu na rozwój skurczu. Pozwoli to zapobiec pękaniu drukowanych elementów i podnieść ich trwałość.

Mając te problemy na uwadze, celem niniejszego projektu jest opracowanie przyjaznych dla środowiska metod pielęgnacji betonu drukowanego w 3D, umożliwiających stałą kontrolę skurczu, które będą neutralne dla właściwości reologicznych mieszanek na bazie cementu. Aby osiągnąć ten cel wykorzystane zostanie drobne kruszywo z recyklingu (ang. *fRA*) oraz biowęgiel. Kruszywa z recyklingu są uważane za przyjazne dla środowiska i niezbędne dla postępu i rozwoju przemysłu budowlanego w jego dążeniu do obniżenia emisji CO<sub>2</sub>. Można je uzyskać z rozbiórki starych budynków i konstrukcji, dzięki czemu nie tylko chroni się zasoby naturalne, ale także pomaga w utylizacji odpadów. Biowęgiel to lekka czarna pozostałość po pirolizie biomasy, składająca się z węgla i popiołów. Podczas produkcji biowęgla gazy CO<sub>2</sub> przekształcane są w stabilną formę, co zmniejsza emisję gazów cieplarnianych. Biowęgiel może być stosowany jako zamiennik cementu w betonie, zmniejszając tym samym jego zużycie. Dzięki realizacji projektu możliwa będzie kalibracja i rozszerzenie modeli numerycznych do szacowania skurczu, takich jak model B4 czy *fib* Model Code 2010.

Kontrola i pomiar rozwoju skurczu stanowią złożone wyzwanie, ponieważ tradycyjne techniki pomiarowe nie mają zastosowania w przypadku betonu drukowanego w 3D. Standardowe i opisane w normach badania skurczu wymagają stwardniałego materiału w celu określenia jego zmiany długości, podczas gdy w elementach drukowanych w 3D najważniejsze zmiany zachodzą w ciągu pierwszych 12 godzin, kiedy materiał jest jeszcze w stanie plastycznym. Dlatego konieczne jest zastosowanie nowych metod wyznaczania skurczu.

Do tej pory nie ma kompleksowej wiedzy na temat metod pielęgnacji betonu stosowanego w druku 3D. Dlatego też niniejszy projekt jest pierwszym tego typu przedsięwzięciem w tej dziedzinie. Przedstawiony tu plan badań ma charakter interdyscyplinarny, ponieważ łączy trzy różne dziedziny nauki: technologię betonu, recykling materiałów odpadowych i symulacje numeryczne. Dzięki zaproponowanej przez autora metodzie bezkontaktowego pomiaru odkształceń z wykorzystaniem czujników laserowych możliwe będzie monitorowanie zmian długości z dokładnością do 2 µm co 60 sekund. W rezultacie uzyskana zostanie wiedza na temat wpływu wewnętrznej pielęgnacji betonu drukowalnego na rozwój skurczu. Wyniki zostaną potwierdzone metodami komputerowej analizy obrazu, jak sugerują to inne międzynarodowe zespoły badawcze. Badania będą prowadzone zarówno na próbkach formowanych, jak i drukowanych w 3D. Uzyskane wyniki zostaną wykorzystane do optymalizacji modeli prognozowania skurczu stosowanych w Normach Europejskich oraz wytycznych projektowych proponowanych przez międzynarodową organizację takie jak *fib* lub RILEM, z uwzględnieniem nowych współczynników dla skurczu autogenicznego i skurczu od wysychania ocenianych mieszanek. Istniejące modele zostaną również rozszerzone w celu uwzględnienia składowej skurczu plastycznego, która jest krytyczna w przypadku betonu drukowanego w technologii 3D.

Jako badania wstępne w projekcie, przebadane zostaną właściwości fizykochemiczne kruszywa recyklingowego i biowęgla przy użyciu transmisyjnej i skaningowej mikroskopii elektronowej oraz dyfrakcji rentgenowskiej. Powierzchnia właściwa adsorpcji zostanie zmierzona za pomocą izotermy BET. W skład mieszanki wyjściowej wchodzi cement portlandzki, pył krzemionkowy, popiół lotny, piasek kwarcowy i woda. Biowęgiel i kruszywo recyklingowe będą dodane do mieszanki jako zamienniki piasku i cementu, aby uzyskać mieszanki o niskim śladzie węglowym i kontrolowanym skurczu.

W celu określenia wpływu różnych metod pielęgnacji wewnętrznej na proces hydratacji cementu zastosowana zostanie kalorymetria izotermiczna, analiza termogravimetryczna i dyfrakcja rentgenowska. Dzięki wykorzystaniu mikroskopów elektronowych i porozymetrii rtęciowej możliwe będzie przeanalizowanie struktury materiału i układu porów. Proponowany projekt będzie realizowany przez interdyscyplinarną i międzynarodową grupę badawczą, w skład której wejdą eksperci z dziedziny reologii (Wielka Brytania) oraz teoretycznej i numerycznej analizy skurczu betonu (Hiszpania).