

DRUK 3D OBIEKTÓW MAŁEJ ARCHITEKTURY METODĄ EKSTRUZJI Z MIESZANEK BETONOWYCH

Marek Myszka, Bartosz Puchała, Martyna Rozum, mgr inż. arch. Miłosz Sadowski, Wiktoria Śmiech, Katsiaryna Zhuk

Studenckie Koło Naukowe BIM – Projektowania Numerycznego Struktur Architektonicznych

Streszczenie

Praca koncentruje się na opracowaniu spójnego procesu technologicznego umożliwiającego wielkoformatowy druk 3D z mieszankami betonowymi w zastosowaniach małej architektury. Głównym celem jest określenie, jakie właściwości materiałów, parametry projektowe i zasady wykonawcze są kluczowe, aby przejść od modelu cyfrowego do stabilnego obiektu drukowanego metodą ekstruzji. Analizie poddano skład mieszanki cementowych, rolę dodatków mineralnych

oraz wpływ modyfikatorów reologii na pompowalność gotowej mieszanki i utrzymanie kształtu warstw. Porównano także różne typy zbrojenia (tradycyjne i rozproszone) możliwe do stosowania w druku warstwowym. Równolegle opracowano proponowane projekty gotowe do wydruku wielkoformatowego: modelowanie BIM, przygotowanie plików STL oraz testowe wydruki PLA służące weryfikacji geometrii. Projekt przechodzi obecnie do etapu konsultacji z gminami, co umożliwi wybór lokalizacji i przygotowanie do druku betonowego bezpośrednio na miejscu inwestycji.

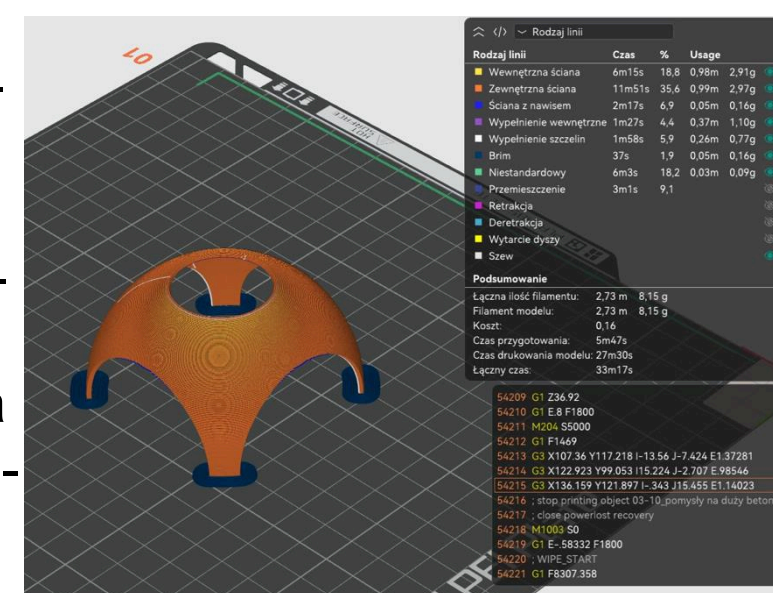
WPROWADZENIE

Wielkoformatowy druk 3D z betonu stanowi jedną z najbardziej perspektywicznych technologii we współczesnym budownictwie. Dynamiczny rozwój systemów drukujących na świecie pokazuje, że metoda ekstruzji materiałów cementowych może stać się realną alternatywą dla tradycyjnych technik wytwarzania, szczególnie w przypadku obiektów o niestandardowej geometrii.

Istotnym zapleczem dla rozwoju tej dziedziny jest środowisko BIM, które umożliwia precyzyjne modelowanie, analizę geometrii oraz przygotowanie danych niezbędnych do procesu druku. Integracja projektowania cyfrowego z technologią druku pozwala na płynne przejście od koncepcji do fizycznej realizacji, a jednocześnie ułatwia testowanie i optymalizację rozwiązań materiałowych oraz konstrukcyjnych.

Proces planowania wielkoformatowego druku 3D

Proces rozpoczyna się od kontaktu z inwestorem/gminą w celu uzyskania działki przeznaczonej pod planowaną realizację. Następnie powstaje projekt koncepcyjny BIM, konsultowany z inwestorem, wraz z doбором kompozytu cementowego o parametrach pasujących do druku warstwowego. Po zatwierdzeniu założeń geometrycznych model przygotowany jest na przykład w programie Autodesk Revit i eksportowany do formatu .stl. W Slicerze definiowane są parametry druku a następnie generowany jest plik .3mf zawierający ścieżkę narzędzia. Kolejnym krokiem jest testowy druk koncepcyjny z PLA, (plastiku) który pozwala zweryfikować geometrię, proporcje oraz sposób prowadzenia ścieżek przed przystąpieniem do druku betonowego. Po akceptacji koncepcji przygotowany jest finalny plik .step/.stp. Na miejscu inwestycji rozstawiana jest drukarka, a operator ustawia parametry pracy: prędkość druku, prędkość podawania mieszanki oraz czas przerwy między warstwami. Po wydrukowaniu elementu poddawany jest pielęgnacji co zapewnia właściwe dojrzewanie betonu i odporność na warunki atmosferyczne.



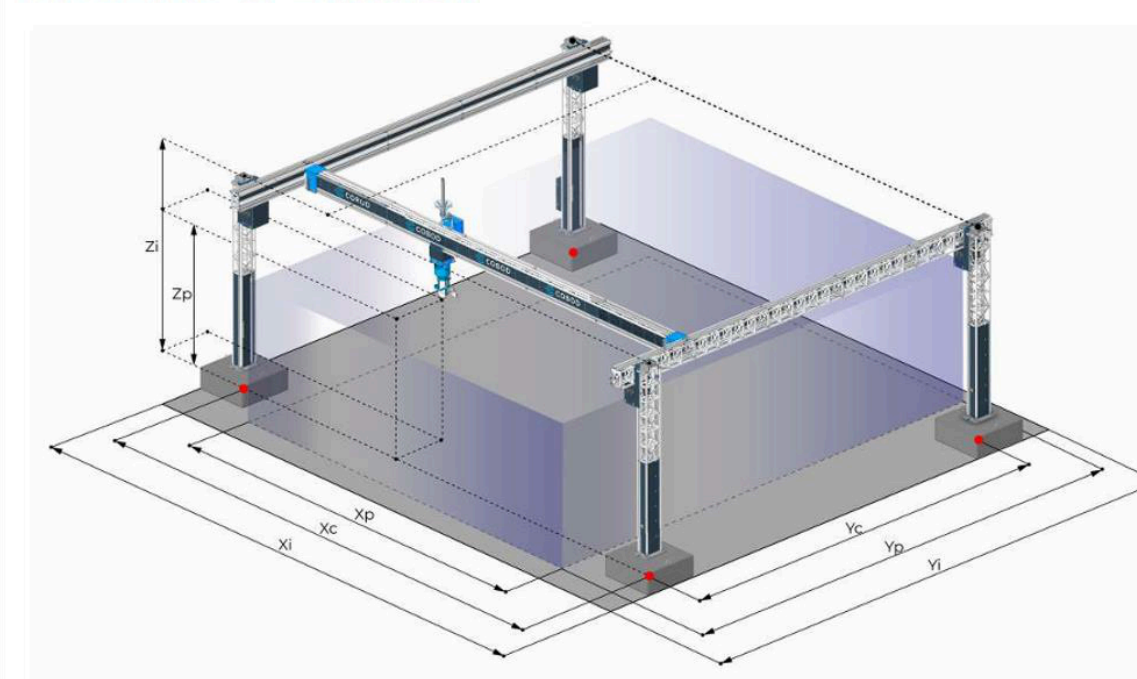
Analiza przykładowych składów kompozytu cementowego przeznaczonego do druku 3D

Kompozyty cementowe stosowane w druku 3D dzielą się na mieszanki gotowe oraz mieszanki przeznaczone do samodzielnego wytworzenia. Mieszanki gotowe mają charakter jednoskładnikowy i są dostępne jako produkty dedykowane, opracowane przez producentów z myślą o konkretnych zastosowaniach. Ich użycie wymaga pracy w zakresie parametrów określonych w dokumentacji technologicznej. Mieszanki do samodzielnego wytworzenia są wieloskładnikowe i wymagają każdorazowego doboru proporcji, co pozwala na ich szerokie zastosowanie i dostosowanie do specyfiki projektu. Obie grupy materiałów muszą spełniać wymagania technologii druku warstwowego, obejmujące odpowiednią reologię, stabilność i możliwość ciągłego podawania materiału.

W technologii druku 3D stosuje się zarówno zbrojenie tradycyjne, jak i rozproszone. Zbrojenie tradycyjne obejmuje pręty, strzemiona i siatki, które mogą być układane zgodnie z kierunkiem drukowanych warstw, na wskroś lub niezależnie od nich, przy czym błędy wykonawcze mogą prowadzić do ryzyka korozji. Zbrojenie rozproszone w postaci włókien polimerowych, szklanych lub stalowych zwiększa wytrzymałość na rozciąganie i ogranicza powstawanie pęknięć, a dzięki swojej formie znajduje szerokie zastosowanie w elementach drukowanych warstwowo.

Przykładowa mieszanka przedstawiona w tabeli ma uproszczony skład w porównaniu z recepturami wieloskładnikowymi. Brak dodatków mineralnych sprawia, że jej właściwości wynikają głównie z działania domieszek chemicznych stabilizujących reologię oraz z obecności włókien polipropylenowych. W porównaniu z mieszankami bogatszymi w mikrosilikę, popiół lotny czy zeolit, receptura z tabeli zachowuje się bardziej przewidywalnie podczas ekstruzji i jest łatwiejsza do kontrolowania w procesie druku. Dodatek włókien poprawia odporność na pękanie i wspiera utrzymanie kształtu świeżych warstw, co jest kluczowe w technologii warstwowej. Dzięki temu mieszanka ta lepiej odpowiada wymaganiom druku 3D, zapewniając stabilne układanie warstw i powtarzalność procesu.

MACHINE OPERATION



Fot. <https://cobod.com/projects-cobod/>

Projekty studenckie

Dome Pavilion to pawilon drukowany w 3D z betonu do postawienia w parku. Może pełnić funkcję zarówno dekoracyjną, jak i zacieniającą w gorące dni. Forma pawilonu oparta jest na półkuli z czterema wycięciami dookoła w formie arkad oraz jednym okrągłym wycięciem wprowadzonym centralnie od góry. Uzyskanabyła estetycznie nawiązuje do kopuły rzymskiego Panteonu - największej na świecie niezbrojonej kopuły betonowej.

Eye Pavilion to pawilon drukowany w 3D z betonu jako instalacja artystyczna otoczona zielenią oraz funkcjonalne miejsce wypoczynku podczas upału, czy też wielkowiedziowa „parasolka” w deszczowe dni. Obiekt zaprojektowano jako jednorodną, monolityczną strukturę o płynnej, organicznej geometrii, inspirowanej kształtem oka. Kompozycja przestrzenna opiera się na asymetrycznym łuku, który integruje funkcję dachu i

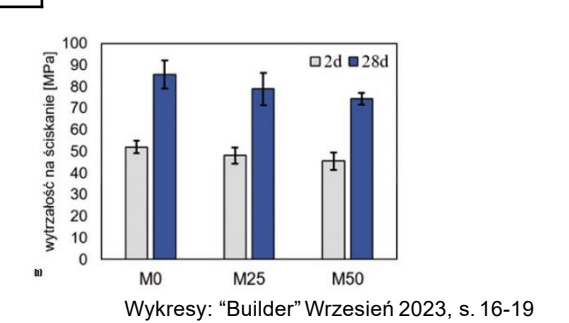
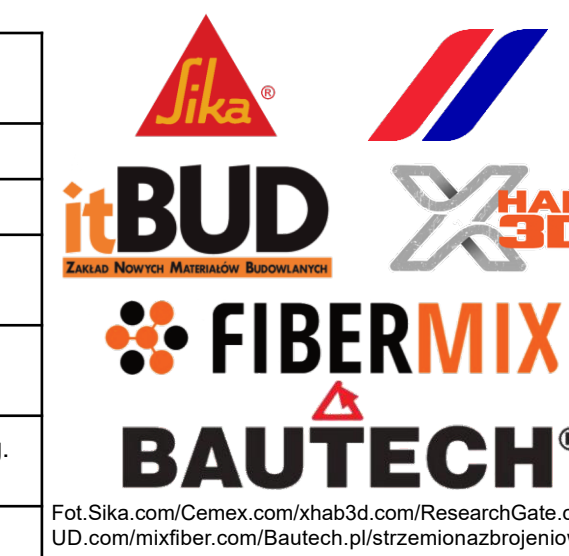


Dome Pavilion, proj. Marek Myszka



Eye Pavilion, proj. Wiktoria Śmiech

1.00	Cement portlandzki CEM I 42.5 R (Schwenk Ltd.)
0.35	Wypełniacz wapienny
2.40	Piasek o frakcji 0-2 mm
0.01	0 Superplastifikator (melanian melaminny)
0.00	3 Środek modyfikujący lepkość VMA (celuloza)
0.00	15 Włókna polipropylenowe 0.05 % wag. średnica 22 µm, długość 6 mm
0.39	Woda



Technologia COBOD

COBOD to system wielkoformatowego druku 3D oparty na drukarce bramowej BOD2, zaprojektowanej do wytwarzania elementów i obiektów budowlanych metodą ekstruzji kompozytów cementowych. Urządzenie pracuje w układzie kartezyjskim, w którym głowica porusza się w trzech osiach po modułowej konstrukcji stalowej, co umożliwia realizację obiektów o dużych gabarytach bez konieczności stosowania tradycyjnych szalunków. Materiał jest podawany do głowicy zewnętrznym systemem pompowym, a proces druku polega na warstwowym nakładaniu mieszanki zgodnie ze ścieżką wygenerowaną w Slicerze.

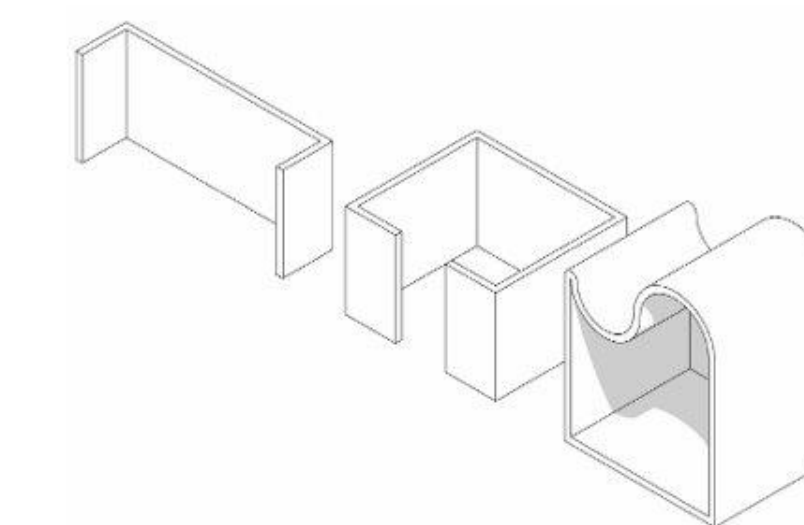
System pozwala na realizację złożonych geometrii, optymalizację zużycia materiału oraz znaczną redukcję czasu wykonania elementów w porównaniu z metodami tradycyjnymi.

Summary in English

The study focuses on developing a coherent technological process that enables large-scale 3D printing small architectural structures with concrete mixtures. The main goal is to identify the material properties, design parameters, and execution principles required to transform a digital model into a stable object printed by extrusion. The study examines the composition of cement-based mixtures, emphasizing the role of mineral additives and rheology-modifying agents in improving pumpability, structural build-up, and the ability of fresh layers to retain their geometry. The research also compares traditional reinforcement systems with dispersed fiber reinforcement to evaluate their compatibility with layered manufacturing and their potential to enhance mechanical behavior without disrupting the printing process. Alongside the material investigation, a complete design workflow was developed, including BIM modelling, STL file preparation, and PLA test prints used to verify geometry, extrusion paths, and the feasibility of proposed architectural forms. These prototypes allowed for optimization of printing strategies. The findings provide a methodological basis for implementing full-scale printed structures in real outdoor environments. The project is now entering a consultation phase with local municipalities, aimed at selecting appropriate locations and establishing technical and administrative conditions for on-site concrete printing. This transition marks a shift from laboratory-scale experimentation toward practical deployment of large-format additive manufacturing in public space.

ścian w jednym, ciągłym elemencie konstrukcyjnym. Centralne wycięcie, organizuje przestrzeń pawilonu oraz stanowi narzędzie kadrowania widoków, co wzmacnia relację pomiędzy wnętrzem a otaczającym krajobrazem.

Concrete Furniture to projekty obiektów małej architektury z betonu. Wszystkie projekty mogą zostać dostosowane do specyficznych warunków miejsca. Projekty są przeznaczone do wydruku na miejscu przy użyciu drukarki 3D.



Concrete Furniture, proj. Miłosz Sadowski

Podsumowanie

Technologia wielkoformatowego druku 3D z betonu stanowi realną szansę na wdrożenie innowacyjnych form małej architektury, czego potwierdzeniem są opracowane projekty studenckie. Dzięki nawiązaniu współpracy z gminami oraz uzyskaniu propozycji konkretnych działek możliwe jest przejście z etapu koncepcyjnego do przygotowania pełnowymiarowych realizacji. Połączenie

odpowiednio dobranych mieszanki, technologii COBOD oraz procesu projektowego opartego na BIM tworzy solidną podstawę do praktycznego wdrożenia drukowanych obiektów w przestrzeni publicznej, co stanowi główny cel dalszych działań zespołu.

Literatura

- Ponikiewski T., Gieroń D., Wrona J., Augustyn J., Wybrane domieszki chemiczne i zaprawy w procesie druku 3D betonu, Dni Betonu 2021, https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2021/Ponikiewski_Gieron_Augustyn.pdf (dostęp: 08.05.2025)
- Kozsela K., Chajec A., Projektowanie mieszanki betonowej do druku 3D - analiza literatury, <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:11f9c97c-899a-4a23-a73a-97ba6da1b887> (dostęp: 08.05.2025)
- Sawicki B., Sikora P., Druk Betonu 3D w praktyce i normach, Dni Betonu 2025, https://www.dnibetonu.com/wp-content/uploads/2025/10/Sawicki_Sikora.pdf (dostęp: 08.05.2025)
- Skibicki Sz., Górmostaj D., Orzelski K., Żygadło A., Łabecka M., Projektowanie i analiza mieszanki betonowej zawierającej kruszywo po obróbce strumieniowo ściemnej (garnet) w technologii druku 3D, "Builder" Wrzesień 2023, s. 16-19
- Sapata A., Šinka M., Šahmenko G., Korat Bensa L., Hanžič L., Šter K., Ručevskis S., Bajare D., P. Bos F., Establishing Benchmark Properties for 3D-Printed Concrete: A Study of Printability, Strength, and Durability, "Journal of Composites Science" 2025 nr. 9, nr. 74, s. 1-23

SKN BIM – Projektowania Numerycznego Struktur Architektonicznych
 Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki
 Katedra Projektowania Architektonicznego A-6
 Opiekun: dr inż. arch. Wojciech Cięplucha

