

Dr inż. arch. Wojciech Cieplucha

Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki
wojciech.cieplucha@pk.edu.pl

Mgr inż. arch. Kamila Cieplucha

NDI S.A.

Mgr inż. Marcin Majta

NDI S.A.

Integracja BIM z drukiem 3D betonu

Integration of BIM with 3D concrete printing

Streszczenie

Artykuł omawia integrację systemów BIM z technologią druku 3D betonu w budownictwie. Modelowanie parametryczne w BIM umożliwia automatyczną optymalizację form konstrukcyjnych dla technologii addytywnej. Przedstawiono programy CAD/BIM (Revit, ArchiCAD, Grasshopper) oraz slicery do obsługi drukarek 3D. Analizowano cztery grupy materiałów: mieszanki betonowe (25% oszczędności materiału), ekologiczne geopolimery (80% redukcja CO₂), ceramikę z węgla krzemu i polimery prototypowe. Dziesięć realizacji - od domów po mosty - wykazało redukcję czasu budowy z miesięcy do dni oraz kosztów o 50% przy zachowaniu funkcjonalności architektonicznej.

Abstract

The article discusses the integration of BIM systems with 3D concrete printing technology in construction. Parametric modeling in BIM enables automatic optimization of structural forms for additive technology. CAD/BIM software (Revit, ArchiCAD, Grasshopper) and slicers for 3D printer operation are presented. Four material groups were analyzed: concrete mixtures (25% material savings), eco-friendly geopolymers (80% CO₂ reduction), silicon carbide ceramics, and prototype polymers. Ten implementations - from houses to bridges - demonstrated construction time reduction from months to days and 50% cost reduction while maintaining architectural functionality.

1. Wstęp

Technologia BIM (Building Information Modeling) otwiera przed projektantami i konstruktorami niespotykane wcześniej możliwości w kształtowaniu form przeznaczonych do druku 3D w budownictwie. Dzięki integracji zaawansowanych narzędzi modelowania informacji o budynku z technologiami druku przestrzennego, powstaje nowy paradygmat projektowy, który rewolucjonizuje sposób myślenia o architekturze i konstrukcji.

2. BIM - Inteligentne modelowanie parametryczne

BIM umożliwia tworzenie inteligentnych obiektów 3D, które „rozumieją” kontekst całego budynku i mogą automatycznie adaptować się do zmieniających się warunków projektowych [1]. W kontekście druku 3D oznacza to możliwość projektowania elementów, które automatycznie optymalizują się pod kątem specyficznych wymagań technologii addytywnej. Każdy element w modelu BIM posiada nie tylko geometrię, ale także bogaty zestaw parametrów - od właściwości materiałowych po informacje o procesie produkcji, co pozwala na precyzyjne dostosowanie projektu do ograniczeń i możliwości konkretnej drukarki 3D. Parametryczne projektowanie w środowisku BIM pozwala na tworzenie form, które mogą być dynamicznie modyfikowane poprzez zmianę kilku kluczowych parametrów. Architekt może na przykład zdefiniować algorytm generujący strukturę nośną budynku, która automatycznie dostosowuje się do zmieniających się obciążeń, warunków gruntowych czy wymagań estetycznych, a jednocześnie uwzględnia ograniczenia technologiczne druku 3D, takie jak maksymalne zwisy czy konieczność stosowania podpór.

2.1 Projektowanie generatywne i optymalizacja form

Możliwością, jaką oferuje połączenie BIM z drukiem 3D, jest projektowanie generatywne - proces, w którym projektant definiuje cele i ograniczenia, a algorytm komputerowy generuje setki lub tysiące wariantów rozwiązań. W budownictwie 3D oznacza to możliwość automatycznego generowania optymalnych form konstrukcyjnych, które wykorzystują minimalne ilości materiału przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości [2].

Systemy generatywne mogą uwzględniać nie tylko kryteria strukturalne, ale także aspekty środowiskowe - od optymalizacji przepływu powietrza po maksymalizację wykorzystania światła naturalnego. Druk 3D pozwala na realizację skomplikowanych, organicznych form, które byłyby niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami budowlanymi. Algorytmy mogą generować struktury przypominające wzorce występujące w naturze - kości, struktury komórkowe czy wzory wzrostu roślin - które charakteryzują się optymalną relacją wytrzymałości do masy.

2.2 Projektowanie generatywne i optymalizacja form

BIM tworzy płynne połączenie między fazą projektową a procesem produkcji, eliminując tradycyjne bariery między projektem conceptualnym a realizacją techniczną. Model BIM może bezpośrednio generować instrukcje dla drukarki 3D, uwzględniając wszystkie parametry procesu - od prędkości drukowania po temperaturę ekstruzji materiału. Taka integracja eliminuje błędy translacji między różnymi formatami danych i zapewnia, że projekt rzeczywiście może być zrealizowany zgodnie z zamierzeniem architekta. Szczególnie rewolucyjne jest to w

kontekście projektowania elementów o zmiennych przekrojach czy nieregularnych geometriach. Tradycyjne metody wymagałyby skomplikowanych szalunków lub form, których koszt często przekraczałby opłacalność projektu. Druk 3D, sterowany bezpośrednio z modelu BIM, pozwala na ekonomiczne wytwarzanie nawet najbardziej skomplikowanych form architektonicznych.

Tab. 1. Programy do modelowania i obsługi modeli do druku 3D.

Kategoria	Program	Główne zastosowanie	Zalety dla druku 3D	Ograniczenia	Darmowy
Modelowanie 3D - BIM	Autodesk Revit	Projekty budowlane, parametryzacja	Bezpośrednia integracja z drukarkami, inteligentne obiekty 3D, automatyczna optymalizacja	Wysokie koszty licencji, wymaga specjalistycznej wiedzy	NIE
	ArchiCAD	Architektura, modelowanie parametryczne	Zaawansowane narzędzia parametryczne, dobra integracja z systemami produkcji	Ograniczona dostępność w Polsce, wysokie koszty	NIE
	Bentley MicroStation	Infrastruktura, projekty inżynierskie	Dośkonały do mostów i infrastruktury, precyzyjne modelowanie	Skomplikowany interfejs, wysokie wymagania sprzętowe	NIE
	Tekla Structures	Konstrukcje stalowe i betonowe	Specjalizacja w konstrukcjach, dokładne detale zbrojenia	Ograniczony do konstrukcji, bardzo specjalistyczny	NIE
Modelowanie 3D - ogólne	3ds Max	Modelowanie dowolnych form	Dowolność w modelowaniu, bogata biblioteka materiałów	Brak natywnego wsparcia BIM, ograniczona parametryzacja	NIE
	Maya	Modelowanie dowolnych form	Zaawansowane narzędzia rzeźbienia, modelowanie organicznych form	Nie jest dedykowany budownictwu, wymaga konwersji do CAD	NIE
	Blender	Modelowanie dowolnych form	Bezpłatny i open source, bardzo zaawansowane możliwości	Integracja BlenderBIM	TAK
	SketchUp	Szybkie prototypowanie	Intuicyjny interfejs, szybkie modelowanie koncepcyjne	Ograniczona precyzja, brak zaawansowanej parametryzacji	CZĘŚĆ
	Rhino 3D	Modelowanie NURBS	Precyzyjne modelowanie krzywych, dobra integracja z Grasshopper	Wymaga wtyczek do BIM	NIE
	Grasshopper (Rhino)	Algorytmiczne projektowanie	Pełna kontrola nad algorytmami, integracja z Rhino 3D	Wymaga znajomości programowania	NIE
	Autodesk Fusion 360	Projektowanie + generatywne	Łączy tradycyjne i generatywne,	Subskrypcja miesięczna,	CZĘŚĆ

			symulacje wytrzymałościowe	ograniczenia w wersji darmowej	
	ParaCloud GEM	Algorytmiczne modelowanie	Specjalizacja w formach organicznych, integracja z CAD	Niszowy program, ograniczona społeczność	TAK
	Dynamo (Revit)	Programowanie wizualne BIM	Natywna integracja z Revit, automatyzacja projektowania	Tylko w ekosystemie Autodesk	TAK
Slicery - eksport	Cura	Przygotowanie modeli FDM	Darmowy i open source, szerokie wsparcie drukarek	Głównie do małych drukarek, ograniczone funkcje budowlane	TAK
	Slic3r	Zaawansowany slicing	Bardzo konfigurowalne, obsługa skomplikowanych geometrii	Skomplikowany w użyciu, wymaga doświadczenia	TAK
	PrusaSlicer	Profesjonalny slicing	Zaawansowane funkcje wsparcia, regularne aktualizacje	Głównie dla drukarek Prusa, nie dla wielkoskalowego druku	TAK
	Simplify3D	Komercyjny slicer	Profesjonalne funkcje, dobra obsługa wsparć	Płatny, rzadkie aktualizacje	NIE
	ICON Control Software	Dedykowany druk betonowy	Specjalizacja w betonie, kontrola przepływu materiału	Tylko dla drukarek ICON, bardzo specjalistyczny	NIE
	APIs Cor Suite	Robotyczny druk budowlany	Kontrola robotów budowlanych, optymalizacja ścieżek	Zamknięty ekosystem, bardzo drogie	NIE

2.3 Symulacje i walidacja projektów

Zaawansowane możliwości analityczne BIM pozwalają na przeprowadzanie symulacji, które weryfikują nie tylko aspekty strukturalne projektu, ale także jego wykonalność w technologii druku 3D. Systemy mogą symulować proces drukowania, wykrywając potencjalne problemy takie jak deformacje termiczne, konieczność stosowania podpór czy ryzyko delaminacji warstw. Te analizy prowadzone są w czasie rzeczywistym podczas projektowania, pozwalając architektowi na bieżące modyfikowanie projektu w celu optymalizacji procesu produkcji. Szczególnie cenne są symulacje 4D, które integrują wymiar czasu z modelem przestrzennym. W kontekście druku 3D oznacza to możliwość wizualizacji sekwencji drukowania, optymalizacji kolejności wykonywania elementów czy planowania logistyki na placu budowy. Projektant może zobaczyć, jak budynek będzie „rosł” warstwa po warstwie, i odpowiednio zaplanować infrastrukturę budowlaną.

2.4 Personalizacja i adaptacyjność

BIM w połączeniu z drukiem 3D otwiera nowe możliwości w zakresie personalizacji architektury. Każdy element może być łatwo dostosowany do indywidualnych potrzeb użytkownika bez znaczącego wzrostu kosztów produkcji. Od ergonomicznych uchwytów po elementy dekoracyjne - wszystko może być parametrycznie

dostosowane i wyprodukowane jako unikalne komponenty. Ta elastyczność wykracza poza estetykę. Elementy konstrukcyjne mogą być dostosowane do specyficznych warunków lokalnych - od obciążeń sejsmicznych po warunki klimatyczne. BIM pozwala na automatyczne generowanie wariantów projektu optymalizowanych pod kątem lokalnych wymagań budowlanych, norm technicznych czy dostępności materiałów, a druk 3D umożliwia ekonomiczną realizację tych dostosowań bez konieczności modyfikacji linii produkcyjnych czy przygotowywania nowych form. Te możliwości technologiczne sygnalizują początek nowej ery w architekturze - ery, w której ograniczenia technologiczne przestają determinować formy architektoniczne, a architekt otrzymuje niemalże nieograniczoną swobodę kształtowania przestrzeni zgodnie z funkcjonalnymi i estetycznymi wymaganiami projektu.

3. Materiały

W druku 3D budowlanym dominują obecnie mieszanki betonowe oferowane przez firmy takie jak Sika i ATLAS, które umożliwiają redukcję zużycia materiału o 25% przy kosztach realizacji domów 300-450 tys. PLN za 100-200 m². Przyszłość należy do geopolimerów – „zielonego cementu” redukującego emisję CO₂ o 80% poprzez wykorzystanie odpadów przemysłowych, choć ich wysoka cena obecnie ogranicza zastosowanie [3]. Materiałem o ekstremalnych właściwościach jest ceramika z węgla krzemu opracowana przez HRL Laboratories, charakteryzująca się odpornością termiczną powyżej 1400°C i dziesięciokrotnie większą wytrzymałością od standardowych rozwiązań, jednak jej koszt i złożoność procesu ograniczają zastosowanie do specjalistycznych projektów. Polimery jak PLA, ABS i PETG pełnią rolę wspomagającą w prototypowaniu i tworzeniu form, umożliwiając szybkie testowanie rozwiązań przed przejściem do materiałów docelowych. Rozwój materiałów do druku 3D otwiera możliwości realizacji skomplikowanych, organicznych form architektonicznych niemożliwych do wykonania tradycyjnymi metodami, a integracja z systemami BIM pozwala na automatyczną optymalizację właściwości materiałowych pod konkretne wymagania projektowe [4] [5].

Tab. 2. Porównanie wybranych materiałów do druku 3D.

Kryterium	Beton/Mieszanki cementowe	Geopolimery	Ceramika (węgiel krzemu)
Popularność	Bardzo wysoka	Rosnąca	Niszowa
Koszt	Niski-średni	Wysoki (na razie)	Bardzo wysoki
Cena materiału	~300,000-450,000 PLN za dom 100-200 m ²	Droższa od tradycyjnego betonu	System ~3000 USD + materiały
Dostępność	Bardzo wysoka	Ograniczona	Bardzo ograniczona
Główni dostawcy	Sika (Sikacrete® 3D), ATLAS	Laboratoria badawcze	HRL Laboratories
Skład	Cement + piasek + dodatki (geopolimery, włókna)	Glinokrzemiany + krzemian sodu/potasu + wodorotlenek	Proszek węgla krzemu + żywica
Czas wiązania	Standardowy (godziny)	Bardzo szybki (kilka godzin)	UV + wypalanie 1000°C
Wytrzymałość termiczna	Standardowa (~100-200°C)	Wysoka	Ekstremalna (>1400°C)
Zastosowania	Domy, biura, infrastruktura	Zielone budownictwo, projekty eco	Przemysł kosmiczny, hipersoniczny
Główne zalety	- Sprawdzona technologia - Niskie koszty	- Ekologiczny - Szybkie wiązanie	Ekstremalna odporność termiczna

	• Dostępność • Oszczędność materiału 25%	• Wykorzystanie odpadów • Ogniotrwałość	• Lekkość • Nieprzewodność elektryczna • 10x mocniejszy
Główne wady	• Brak materiału podporowego • Ręczne zbrojenie	• Wysoka cena • Ograniczona dostępność	• Bardzo wysokie koszty • Skomplikowany proces
Perspektywy rozwoju	Stabilny rozwój, doskonalenie procesu	Duży potencjał przy obniżeniu kosztów	Specjalistyczne zastosowania
Ocena ogólna	OPTYMALNY dla większości projektów	PRZYSZŁOŚCIOWY dla eco-budownictwa	NISZOWY dla ekstremalnych warunków

3.1 Mieszanki betonowe - dominujący materiał

Beton pozostaje najpopularniejszym materiałem w druku 3D budowlanym ze względu na swoją praktyczność i dostępność. Firmy takie jak Sika oferują specjalne mieszanki jak Sikacrete® 3D, które są dostosowane do precyzyjnego drukowania elementów betonowych. Polska firma ATLAS również dostarcza zaprawy do druku 3D na bazie cementu, które pozwalają na personalizację kolorów mieszanki. Technologia druku betonu umożliwia znaczne oszczędności - można zredukować ilość potrzebnego materiału nawet o 25%, co przekłada się na koszty budowy domów w granicach 300,000-450,000 PLN za powierzchnię 100-200 m². Główną zaletą jest automatyzacja procesu i redukcja czasu realizacji, choć nadal istnieją wyzwania techniczne jak brak odpowiedniego materiału podporowego dla poziomych elementów i konieczność ręcznego układania zbrojenia.

3.2 Ceramika z węgla krzemu - materiał przyszłości

Firma HRL Laboratories z Kalifornii opracowała przełomowy „monomer preceramiczny” wykonany z proszku węgla krzemu, który drukuje się jak standardowy filament polimerowy. Pod wpływem promieniowania UV żywica utwardza się, tworząc ceramikę o wyjątkowych właściwościach - stabilną termicznie nawet w temperaturze ponad 1400 stopni Celsjusza, co przewyższa temperaturę topnienia większości metali. Ten materiał charakteryzuje się nie tylko wysoką odpornością termiczną, ale także nietypową właściwością przewodności cieplnej - jeden koniec elementu może być podgrzewany do 1000 stopni, podczas gdy drugi pozostaje na tyle chłodny, że można go trzymać gołą ręką. Zawartość składników organicznych w filamencie ceramicznym wynosi około 21,5% wagi, a sam materiał okazuje się dziesięciokrotnie mocniejszy od podobnych rozwiązań. Koszt technologii jest jednak znaczny - wymaga systemu stereolitograficznego za około 3000 USD.

3.3 Polimery - różnorodność zastosowań

Materiały polimerowe w druku 3D budownictwa pełnią głównie rolę prototypową i pomocniczą. PLA, jako najtańszy materiał kosztujący 60-140 zł za kilogram, sprawdza się w tworzeniu modeli architektonicznych i elementów dekoracyjnych, ale jego niska odporność na temperatury ogranicza zastosowania budowlane. ABS oferuje wyższą wytrzymałość mechaniczną w podobnym przedziale cenowym, podczas gdy PETG za 80-90 zł/kg łączy zalety obu materiałów - jest prosty w drukowaniu jak PLA, ale wytrzymały jak ABS. Polimery znajdują zastosowanie w tworzeniu form do odlewania betonu, elementów prototypowych oraz małej

architektury. Ich główną zaletą jest możliwość szybkiego prototypowania i testowania rozwiązań przed przejściem do produkcji w materiałach docelowych [5].

3.4 Geopolimery - ekologiczna rewolucja

Geopolimery reprezentują nowe podejście do materiałów budowlanych, powstając z reakcji chemicznej między surowcem bogatym w tlenki glinu i krzemu a silnie zasadowymi związkami. Te materiały, nazywane „zielonym cementem”, mogą zredukować emisję CO₂ nawet o 80% w porównaniu do tradycyjnego betonu. Podczas gdy produkcja jednej tony klasycznego cementu generuje tonę dwutlenku węgla, geopolimery wydzielają 4-8 razy mniej tego gazu przy zużyciu 2-3 razy mniejszej energii. Szczególną zaletą geopolimerów jest możliwość wykorzystania odpadów przemysłowych takich jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy czy nawet toksyczny czerwony szlam z produkcji aluminium. Materiały te charakteryzują się szybkim wiązaniem w ciągu kilku godzin, wysoką ogniotrwałością i odpornością na agresywne środowiska chemiczne. Głównym ograniczeniem pozostaje obecnie wysoka cena w stosunku do tradycyjnych betonów, co hamuje ich powszechne zastosowanie [6].

3.5 Geopolimery - ekologiczna rewolucja

W praktyce przemysłowej dominują mieszanki betonowe ze względu na sprawdzoną technologię i akceptowalne koszty. Ceramika z węgla krzemu znajduje zastosowanie w specjalistycznych projektach wymagających ekstremalnej odporności termicznej. Polimery pełnią rolę wspomagającą w procesach projektowych i prototypowych. Geopolimery, mimo obiecujących właściwości ekologicznych, czekają na obniżenie kosztów produkcji, które umożliwi ich masowe wdrożenie w budownictwie 3D.

4. Realizacje

Technologia druku 3D rewolucjonizuje współczesne budownictwo, oferując nowe możliwości projektowania i realizacji obiektów architektonicznych. Drukarki 3D w budownictwie wykorzystują różnorodne materiały, od tradycyjnych mieszanek betonowych po innowacyjne rozwiązania jak glina czy lavacrete. Dzięki tej technologii możliwe jest znaczne skrócenie czasu budowy - od kilku godzin do kilku dni zamiast miesięcy czy lat [7]. Koszty realizacji projektów mogą zostać obniżone nawet o 50% w porównaniu do tradycyjnych metod budowlanych. Integracja technologii BIM (Building Information Modeling) z drukiem 3D umożliwia precyzyjne projektowanie i optymalizację procesów budowlanych. BIM pozwala na tworzenie cyfrowych modeli budynków, które bezpośrednio przekładają się na instrukcje dla drukarek 3D. Druk 3D w budownictwie przyczynia się także do redukcji odpadów budowlanych i minimalizacji wpływu na środowisko. Automatyzacja procesu budowlanego zmniejsza zapotrzebowanie na wykwalifikowaną siłę roboczą, co jest szczególnie istotne w obliczu niedoborów kadrowych w branży [8]. Technologia znajdzie zastosowanie w budownictwie mieszkaniowym, obiektach użyteczności publicznej oraz infrastrukturze miejskiej. Przyszłość budownictwa 3D obiecuje jeszcze większą precyzję, szybkość i możliwości architektoniczne, które były dotychczas nieosiągalne tradycyjnymi metodami.

Tab. 2. Zestawienie przykładowych realizacji z druku 3D.

Lp	Nazwa	Kategoria	Użyty materiał	Wysokość (m)	Pow. (m ²)	Czas realizacji (dni)	Koszt (PLN)	Koszt budowy za m ² (PLN)	Orientacyjna kwota sprzedaży za m ² (PLN)
1	TECLA	Dom	Gлина	4	60	8.3 (200 godz.)	140 000	2 333	4 000
2	Beckum	Dom	Beton	8	160	4	1 500 000	9 375	12 000
3	Office of the Future	Biurowiec	Beton	6	250	17	1 900 000	7 600	15 000
4	Mediolan	Dom	Beton	3	100	10	300 000	3 000	6 000
5	Biurowiec w Dubaju	Biurowiec	Beton	9,5	640	60	2 300 000	3 594	8 000
6	Dom w Chinach	Dom	Beton	6	200	45	450 000	2 250	5 000
7	Lewis Grand Hotel	Hotel	Beton	3	130	5 (100 godz.)	350 000	2 692	4 500
8	Osiedle w Tabasco	Dom	Beton	3	48	1 dom/dzień	80 000	1 667	2 500
9	MX3D Bridge	Most	Stal	2,1	76,86	3 lata (2018-2021)	3 000 000	39 028	50 000
10	Nijmegen Bridge	Most	Beton	1,5	30	3 miesiące	500	16 667	25 000

4.1 Dom jednorodzinny w Massa Lombarda (Włochy)

Zrównoważone domy TECLA włoskich architektów powstające przy użyciu drukarek 3D są wykonane z gliny. Domy te, zbudowane w Massa Lombarda niedaleko Bolonii, zostały zaprojektowane przez włoską firmę WASP (World's Advanced Saving Project) i Mario Cucinella Architects (MCA). TECLA, skrótowiec-grupowiec od słów technologia i glina (z ang. technology; clay) – to struktury zbudowane praktycznie w całości z miejscowej, surowej ziemi. Według deklaracji projekt inspirowany powieścią Italo Calvino z 1972 roku *Niewidzialne miasta*, która jest serią rozmów między Marco Polo a mongolskim cesarzem. TECLA odnosi się do słowa „Thekla”, którego Calvino używa w swojej powieści, aby opisać miasto, które jest zawsze w budowie. WASP wyjaśnia, że domy są odpowiedzią na zagrożenia klimatyczne i środowiskowe, z jakimi mamy coraz częściej do czynienia. Okrągłe konstrukcje o powierzchni 60 metrów kwadratowych zostały stworzone w wyniku badań nad lokalnymi praktykami budowlanymi, zasadami bioklimatycznymi oraz wykorzystaniem naturalnych i lokalnych materiałów. Co ciekawe jest to projekt niemal bezodpadowy, a nawet wyposażenie zostało zaprojektowane w taki sposób, aby można je było poddać recyklingowi lub ponownie wykorzystać. Czas realizacji? Zawrotny, bo według TECLA wystarczy 200 godzin.

4.2 Dom jednorodzinny w Beckum (Niemcy)

Waldemar Korte przewiduje, że przy obecnym szybkim rozwoju technologii w ciągu najbliższych pięciu lat budowanie domów 3D może stać się tańsze od tradycyjnych metod budowlanych. „Budujemy znacznie szybciej” – mówi architekt, któremu budowa domu w Beckum zajęła zaledwie cztery dni. „Potrzebujemy mniej ludzi, a to

pomaga, gdy w branży budowlanej brakuje wykwalifikowanych pracowników”. Pomagają naprawdę duże drukarki 3D i innowacyjne mieszanki betonowe. Mieszanki betonowe są, mieszanką cementu i piasku, ale wielu budowniczych dodaje do nich geopolimery i włókna w celu wzmocnienia. Wyjątkowo ciekawy materiał przyszłości do druku 3D to odporny na ekstremalne warunki pogodowe lavacrete – opracowany przez amerykańskiego architekta Paula Schwama, jest mieszanką sproszkowanej czerwonej skały wulkanicznej, cementu i wody.

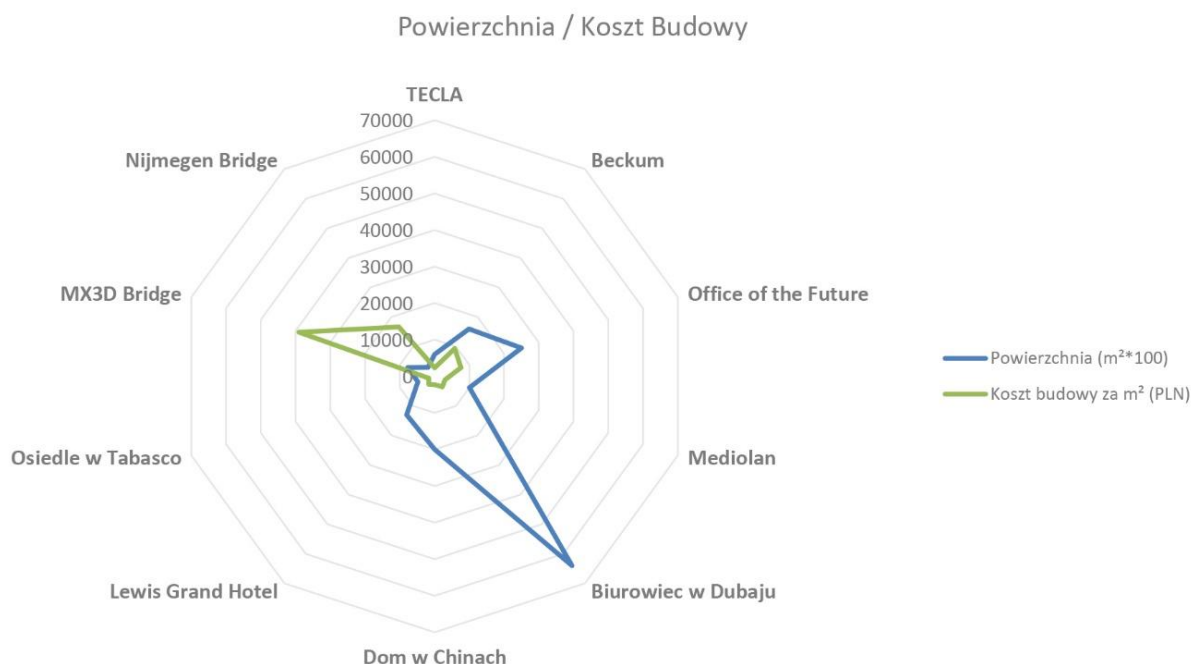
4.3 Biuro przyszłości w Dubaju (Zjednoczone Emiraty Arabskie)

Biuro Przyszłości to pierwsze w pełni funkcjonalne i stale użytkowane biuro wydrukowane w technologii 3D. Zajmuje powierzchnię 250 m² i zostało zbudowane w 17 dni przy użyciu drukarki 3D o wymiarach 6x37x12 metrów. Projekt został zrealizowany przez Killa Design jako część strategii Dubaju mającej na celu promowanie technologii druku 3D. Koszt budowy został zredukowany o 50% w porównaniu do tradycyjnych metod budowlanych, co pozwoliło na oszacowanie całkowitego kosztu na 1,9 miliona PLN.

4.4 Dom jednorodzinny w Mediolanie (Włochy), 2018

Dom jednorodzinny w Mediolanie, zbudowany w 2018 roku, ma powierzchnię około 100 m². Budowa tego domu zajęła 10 dni przy użyciu nowoczesnych technik druku 3D z mieszanką betonową. Koszt budowy został oszacowany na 300,000 PLN na podstawie dostępnych danych dotyczących technologii i kosztów materiałów budowlanych używanych w projektach druku 3D.

Rys. 1. Wykres przedstawiający powierzchnie w odniesieniu do kosztów budowy.



4.5 Biurowiec w Dubaju (Zjednoczone Emiraty Arabskie)

Biurowiec w Dubaju, znany również jako największy na świecie drukowany w 3D budynek, został zrealizowany przez firmę Apis Cor. Biurowiec ma wysokość 9,5 metra i powierzchnię 640 m². Proces druku trwał 60 dni, a koszt budowy wyniósł 2.300.000 PLN. Budynek wykorzystuje nowoczesne technologie zarządzania energią oraz systemy IT, które minimalizują zużycie energii i odpady budowlane.

4.6 Dom jednorodzinny (Chiny)

Dom jednorodzinny w Chinach, zbudowany przez firmę WinSun, ma powierzchnię około 200 m². Budowa trwała 45 dni, a koszt wyniósł 450,000 PLN. Wykorzystano mieszankę betonu oraz innowacyjne technologie druku 3D, co pozwoliło na szybkie i efektywne wykonanie budynku.

4.7 Pokój hotelu Lewis Grand na Filipinach

Pokój hotelowy w Lewis Grand Hotel w Angeles City, Pampanga, jest pierwszym na świecie w pełni funkcjonalnym, wydrukowanym w technologii 3D pokojem hotelowym. Powierzchnia pokoju wynosi 130 m², a jego budowa trwała około 100 godzin. Projekt obejmuje dwie sypialnie, salon, spa i jacuzzi, które również zostało wydrukowane w technologii 3D. Koszt budowy szacuje się na 350.000 PLN.

4.8 Osiedle domów jednorodzinnych w Tabasco (Meksyk)

Osiedle domów jednorodzinnych w Tabasco w Meksyku zostało zrealizowane przez firmę ICON. Każdy dom ma powierzchnię 48 m² i jego budowa trwa jeden dzień. Osiedle składa się z wielu domów, które są częścią projektu mającego na celu zapewnienie taniego i szybkiego budownictwa dla społeczności potrzebujących. Koszt budowy jednego domu wynosi 80.000 PLN.

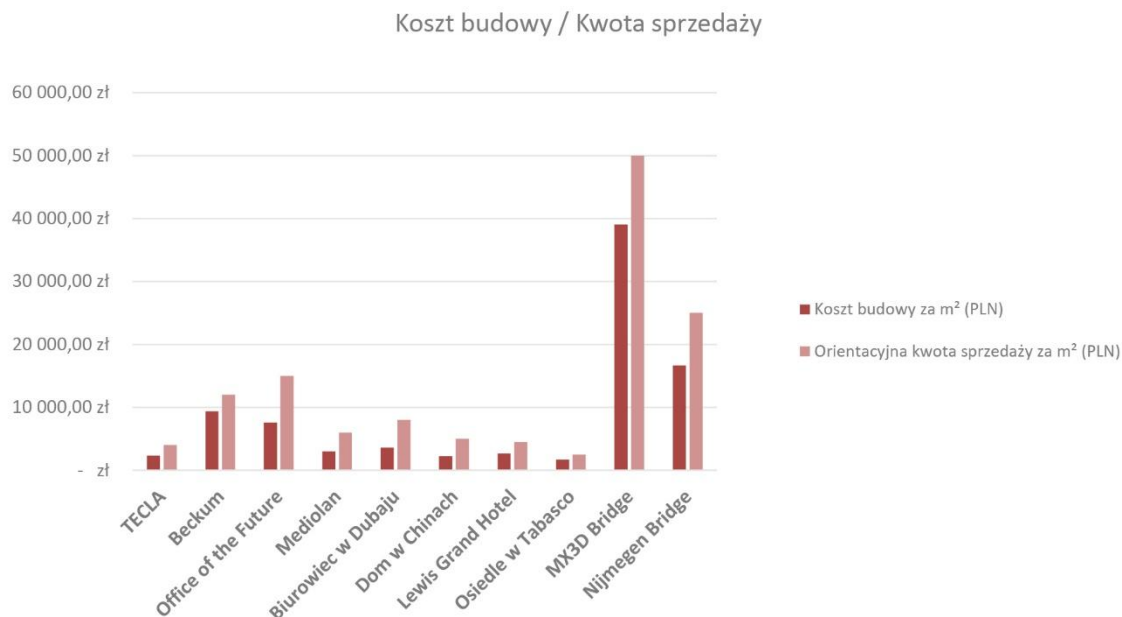
4.9 Kładka dla pieszych w Amsterdamie (Holandia)

MX3D Bridge to pierwsza na świecie stalowa kładka dla pieszych wydrukowana w technologii 3D. Projekt został zrealizowany przez firmę MX3D we współpracy z Joris Laarman Lab oraz Arup i zainstalowany nad kanałem w Amsterdamie. Kładka ma długość 12,2 metra, szerokość 6,3 metra i wysokość 2,1 metra. Budowa mostu trwała od 2018 do 2021 roku i kosztowała około 3 milionów PLN. Most wyposażony jest w inteligentne czujniki monitorujące jego stan w czasie rzeczywistym.

4.10 Nijmegen Bridge - kładka dla pieszych (Holandia)

Kładka dla pieszych w Nijmegen to innowacyjny projekt zrealizowany jako część większej inicjatywy badawczej. Most został zbudowany z wykorzystaniem technologii druku 3D i ma na celu poprawę infrastruktury miejskiej oraz monitorowanie ruchu pieszych. Most ma długość 10 metrów, szerokość 3 metry i wysokość 1,5 metra. Budowa trwała około 3 miesięcy, a koszt oszacowano na 500,000 PLN.

Rys. 2. Wykres przedstawiający koszt budowy w odniesieniu do kwoty sprzedaży.



5. Podsumowanie

Technologia druku 3D w połączeniu z systemami BIM stanowi przełom we współczesnym budownictwie, otwierając nowe możliwości projektowania i realizacji obiektów architektonicznych [9] [10]. Integracja modelowania parametrycznego z technologiami addytywnymi pozwala na tworzenie skomplikowanych, zoptymalizowanych form konstrukcyjnych, które byłyby niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami. W zakresie materiałów dominują obecnie mieszanki betonowe, umożliwiające redukcję zużycia surowca o 25% przy zachowaniu odpowiednich parametrów wytrzymałościowych. Perspektywiczne są ekologiczne geopolimery redukujące emisję CO₂ o 80%, choć ich wysoki koszt ogranicza obecnie powszechne zastosowanie. Dla zastosowań specjalistycznych dostępna jest wysokotemperaturowa ceramika z węgla krzemu, podczas gdy polimery służą głównie do prototypowania. Analizowane realizacje – od domów jednorodzinnych po mosty – dowodzą praktycznej użyteczności technologii. Czas budowy skraca się z miesięcy do dni (np. dom w Beckum zbudowano w 4 dni), a koszty mogą być niższe nawet o 50% w porównaniu do metod tradycyjnych. Szczególnie imponujące są projekty TECLA wykorzystujące lokalną glinę (200 godzin realizacji) czy osiedle w Tabasco, gdzie jeden dom powstaje w ciągu doby za około 80 000 PLN.

Technologia druku 3D nie tylko rewolucjonizuje proces budowlany poprzez automatyzację i redukcję kosztów, ale także przyczynia się do zrównoważonego rozwoju poprzez minimalizację odpadów i możliwość wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu. Połączenie z systemami BIM umożliwia pełną kontrolę nad procesem projektowym i wykonawczym, od koncepcji po realizację, otwierając drogę do architektury przyszłości – spersonalizowanej, ekologicznej i ekonomicznej.

6. Literatura

- [1] Prem, P. R., Ambily, P. S., Kumar, S., & Ghodke, S. B. (2024). A theoretical model to predict the structural buildability of 3D printable concrete. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11043-024-09666-8>
- [2] Borkowski, A. (2024). *Propedeutyka BIM – filozofia modelowania informacji o obiekcie budowlanym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [3] Kuznetsov, D. v., Klyuev, S. v., Ryazanov, A. N., Sinitsin, D. A., Pudovkin, A. N., Kobeleva, E. v., & Nedoseko, I. v. (2023). Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology. *Construction Materials and Products*, 6(6). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-5>
- [4] Ambily, P. S., Kaliyavaradhan, S. K., & Rajendran, N. (2024). Top challenges to widespread 3D concrete printing (3DCP) adoption. In *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (Vol. 28, Issue 2, pp. 300–328). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2213294>
- [5] Elistratkin, M., Alfimova, N., Podgornyi, D., Olisov, A., Promakhov, V., & Kozhukhova, N. (2022). Influence of Equipment Operation Parameters on the Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing. *Buildings* 2022, 12. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
- [6] Bondarev, B., Bayazov, V., Korneev, O., Vostrikov, I., Meshcheryakov, A., & Korneeva, A. (2021). Selection of mixtures for 3D printing. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(3). <https://doi.org/10.15862/29savn321>
- [7] Iqbal, A. R., & Muhammad, K. F. (2022). Analysis and Design of Control System for Desktop Size Concrete 3D Printer. *MEKATRONIKA*, 4(1), 80–87. <https://doi.org/10.15282/mekatronika.v4i1.8624>
- [8] Ivanov-Kostetskyi, S., Gumennyk, I., & Voronkova, I. (2021). Innovative Trends in Architecture – Creating Full-Scape Buildings with the 3D Print Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(2), 022099. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/2/022099>
- [9] Perz, R. (2020). Betonowy dom z drukarki 3D. *Materiały Budowlane*, 1, 64–65. www.materiaלבudowlane.info.pl
- [10] Cross, N. (2023). *Design Thinking. Understanding How Designers Think and Work*. Bloomsbury.