

Druk 3D w budownictwie

Helena Dodziuk

Druk 3D (ang. *3D printing*, 3DP) polega, mówiąc w dużym uproszczeniu, na nakładaniu kolejnych, łączonych następnie ze sobą warstw materiału na podstawie programu komputerowego [1]. Znalazł on zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. w różnych gałęziach przemysłu, medycynie, modzie, sztuce i edukacji [2]. Budownictwo pozostaje jedną z niewielu dziedzin, w której w niewielkim stopniu wykorzystuje się druk 3D. Dotychczas oparte jest ono głównie na pracy ręcznej. Robienie butów, ubrań czy też urządzeń domowych zostało już dawno zautomatyzowane, teraz czas na zautomatyzowanie budowy domów. Możliwości zastosowań druku 3D w budownictwie doprowadziły do wielu propozycji i licznych interesujących realizacji [1–3] (rys. 1, [4]) i obecnie przechodzą one od działalności niszowej do mainstreamu [5]. Przewiduje się, że rynek budownictwa 3D osiągnie 1,5 mld USD w roku 2024 [6].

Na początku, na etapie koncepcji, proponowano drukowanie budynków w taki sposób, żeby wszystkie fragmenty, np. rury kanalizacyjne, przewody elektryczne i tym podobne elementy były wbudowywane w ściany w trakcie drukowania 3D. Jak na razie okazało się to niemożliwe. W 3D drukuje się ściany z otworami i szybami pozwalającymi przeprowadzić rury i przewody. Wykorzystanie druku 3D w budownictwie wymagało opracowania specjalistycznych [5, 7, 8] i gabarytowo większych drukarek [7, 9], jak również wprowadzenia nowych technologii i nowych materiałów do drukowania [8] (obok tradycyjnego cementu [7, 10], szkła [11], papieru [12], ziemi [13] czy też „atramentu” wykorzystującego śmieci [14, 15]). Skutki związane z korzystaniem ze śmieci w 3DP omówił Sam Taylor [16]. Żywe zainteresowanie drukiem 3D wykazuje NASA: obok drukowania w 3D żywności, tak aby kosmonauci mieli smaczniejsze jedzenie w trakcie długich



Rys. 1. The Lotus House. Autor: © Team WashU for Solar Decathlon China 2018



Rys. 2. Model wydrukowanej w 3D bazy na Księżycu.

© NASA. <https://sservi.nasa.gov/articles/building-a-lunar-base-with-3d-printing/>

podróży, i licznych innych zastosowań mówi się o wykorzystywaniu Księżycowej gleby, zwanej regolitem, do budowania baz [17] (rys. 2). Ostatnio NASA zainaugurowała współpracę z firmą ICON nad wczesnymi badaniami i opracowaniem kosmicznego systemu budowania, który mógłby wesprzeć przyszłą eksplorację Księżycza i Marsa [18].

Druk 3D warto stosować, ponieważ posiada szereg istotnych zalet w porównaniu z tradycyjnym budownictwem:

1. Jest przyjazny dla środowiska, gdyż do budowania można wykorzystać lokalnie dostępne materiały [13].
2. Jest też znacznie tańszy od tradycyjnego budownictwa: koszty budowy są niższe o ponad 30% [5], co ma duże znaczenie ekonomiczne i społeczne.
3. 3DP jest również dużo szybszy niż budownictwo tradycyjne [5], ale zaletę tę wiele firm przedstawia nierzetelnie. Informacje na ten temat zostaną później dokładniej omówione.

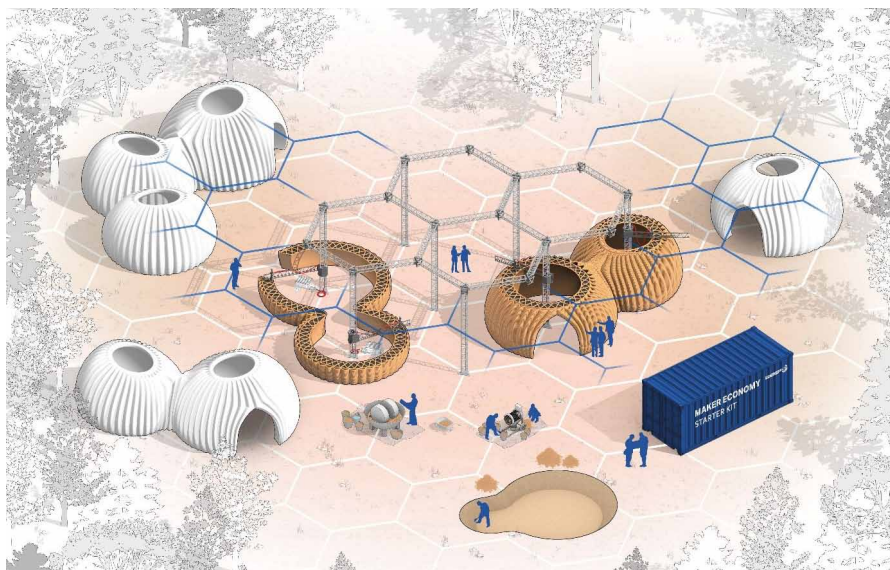
4. Budując w technologii druku 3D, wykorzystuje się, obok standardowych, wiele nietypowych materiałów, co przedstawili Ronald Rael i Virginia San Fratello w książce „Innovative Recipes for 3D Printing” [8], uwzględniając nie tylko piasek, cement i glinę, lecz również tak niekojarzące się z budownictwem materiały, jak sól, kawa, herbata, winne wytloki, guma i bioplastiki.
5. W druku 3D design jest dużo bardziej elastyczny, co stwarza dużo mniej ograniczeń niż spotykane w budownictwie tradycyjnym [3].
6. Budownictwo jest dziedziną, w której zdarza się wiele wypadków – przy zastosowaniu druku 3D jest ich dużo mniej [10].

Warto również wymienić wady budowania domów w technologii druku 3D [8]:

Bardzo wysoki koszt początkowy inwestycji. Drukarka budowlana może kosztować nawet 1 mln USD.

1. Jak wspomniano uprzednio, obecnie ta metoda budowania wymaga ręcznego wykonania instalacji wodno-kanalizacyjnej i elektrycznej itp. Szorstkie ściany zewnętrzne; na ogół nie są one tak gładkie, jak w budownictwie tradycyjnym.
2. Aktualnie brak jest certyfikacji takiego budownictwa.
3. W druku 3D mamy do czynienia ze swoistym paradoksem. Z jednej strony jest on tańszy od technologii tradycyjnych, a więc bardziej dostępny dla ludzi o niskich dochodach. Z drugiej, jako tzw. technologia niszcząca (ang. *disruptive*) [19], pozbawia pracy ludzi o niskich kwalifikacjach.

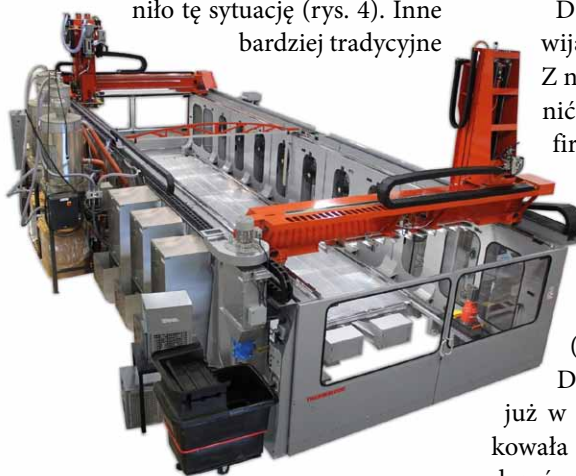
Należy podkreślić, że w obliczu ogromnych potrzeb mieszkaniowych rozrastających się miast istnieje paląca konieczność usprawnienia i obniżenia kosztów budownictwa. Przewiduje się, że w 2030 roku ta dziedzina gospodarki osiągnie wartość 17,5 biliona USD, zaś już w 2025 roku potrzeba będzie miliarda domów dla ponad 50 mln nowych mieszkańców miast rocznie [20]. Wyżej wymienione zalety pozwalają na stwierdzenie, że druk 3D będzie odgrywał coraz większą rolę w budownictwie,



Rys. 3. Projekt osiedla TECLA firmy WASP. © WASP

zwłaszcza w krajach rozwijających się. Jedną z najciekawszych inicjatyw w dziedzinie taniego i ekologicznego budownictwa przedstawiła włoska firma WASP [21], której jeden z projektów pokazano na rys. 3. Jej działalność zostanie pokrótce omówiona poniżej.

Przez długi czas ograniczeniem druku 3D były niewielkie rozmiary roboczej objętości drukarek 3D, a więc i wielkości drukowanych obiektów. W 2015 roku na targach w Berlinie pokazano ogromną (w tamtym czasie) drukarkę 3D o objętości roboczej 1 m × 1 m × 1 m, co oczywiście nie było wystarczające dla budownictwa. Wprowadzenie robotów z drukującym w 3D ramieniem lub wykorzystanie suwnic radykalnie zmieniło tę sytuację (rys. 4). Inne bardziej tradycyjne



Rys. 4. Large Scale Additive Manufacturing system (LSAM 1040) używany również w budownictwie. Thermwood Corporation http://www.thermwood.com/lсам_home.htm

podejście polega na użyciu kilku mini-robotów do zbudowania większej struktury [22].

Warto wspomnieć o innych, całkowicie różnych i nietypowych podejściach do zastosowania druku 3D w budownictwie. Pierwszy z nich, bardziej standardowy, polega na wykorzystaniu wydrukowanych w 3D form wtryskowych do zbudowania budynku przedstawionego na rys. 1. Inny, daleko bardziej oryginalny, zastosowała Neri Oxman przy „budowie” Jedwabnego Pawilonu. Najpierw zbudowano szkielet, a następnie osadzono na nim jedwabniki, które pokryły go warstwą jedwabiu [23]. W budownictwie wykorzystuje się również typowe dla druku 3D prototypowanie [24].

Druk 3D w budownictwie rozwijany był w różnych ośrodkach. Z najważniejszych warto tu wymienić Behrokha Khoshnevisa i jego firmę Contour Crafting [25] oraz holenderski projekt Canal House [26]. Bardzo chwaliła się swoimi osiągnięciami w budownictwie metodą 3DP chińska firma WinSun (Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co), która już w 2014 roku ogłosiła, że wydrukowała w ciągu jednego dnia dziesięć domów o powierzchni 200 m² [27]. Nie wiadomo, co prawda, ile czasu trwały prace wstępne (p. omówienie poniżej) oraz suszenie zbudowanej konstrukcji, jak również prace wykończeniowe.

Później WinSun ogłosiło, że zbudowało dużą willę i pięciopiętrowy budynek [28], wykorzystując wydrukowane w 3D elementy. Jak bardziej szczegółowo omówimy to później, relacje WinSun były niezetelne, co więcej, firmę oskarżono o kradzież własności intelektualnej [29]. Jednym z głównych elementów krytyki były podawane przez WinSun czasy budowy [30].

Jak i w innych zastosowaniach druku 3D, obok firm komercyjnych, ważną rolę odgrywają firmy i/lub fundacje, których celem jest działanie dla najbardziej potrzebujących [31]. Jedną z nich jest wspomniana uprzednio włoska firma WASP [21], która obok robienia drukarek 3D, prowadzi prace nad zrównoważonym budownictwem mieszkalnym. Stworzyła ona nowy ekonomiczny model budownictwa w jednym kontenerze Zestaw Startowy Ekonomii Wytwarzania (ang. *Maker Economy Starter Kit*) [32], zawierający m.in. kilka drukarek 3D do różnych materiałów oraz zestaw narzędzi i surowców do konserwacji mechanicznej, obejmujący m.in. kompresor, urządzenie spawalnicze, sprzęt do szlifowania, klucze i narzędzia, mikrotokarkę, śruby i wkręty do kilku materiałów.

Zestaw Startowy ma na celu budowanie domów mieszkalnych z materiałów lokalnych, materiałów z recyklingu, jak również z materiałów standardowych; w oparciu o zebraną wiedzę projekt może być odtwarzany wielokrotnie. Stosowane w projekcie informacje mogą być przekazywane w sieci bezpłatnie. Jest to projekt *open source*, to znaczy, że menedżerowie, designerzy, inżynierowie i architekci mogą wejść na stronę i pobierać informacje lub się nimi wymieniać. Celem projektu jest niskokosztowe budowanie aktywnego domu, tzn. domu, który jest samowystarczalny (energetycznie, bo chyba bez obiegu wody? – HD) w oparciu o własnoręczne wytwarzanie i możliwą do zastosowania wszędzie technologię cyfrową. WASP twierdzi, że jest to przedsięwzięcie samofinansujące się w 100%, inwestując w opracowanie przyjaznych dla środowiska, zrównoważonych funkcjonalnych materiałów i innowacyjnych systemów. Obok wspomnianego powyżej projektu TECLA, który miał być zakończony w czerwcu 2020 (niestety pandemia koronawirusa



Rys. 5. Zbudowany z ziemi dom Gaia. © WASP

chyba go opóźniła), WASP prowadzi projekt Gaia (rys. 5) druku w 3D małego domu zbudowanego z ziemi [33] oraz projekt Shamballa budowy całego osiedla [34].

Podobny projekt Vulcan prowadzi organizacja *non-profit* New Story, czyli Nowa Opowieść [35, 36]. Ma on zapewnić mieszkania dla ludzi niemających. Organizacja ta współpracuje z firmą ICON, która dostała fundusze z NASA na prace wstępne nad budową stacji kosmicznej na Księżycu i Marsie [18]. Będące w trakcie budowy w ramach projektu Vulcan osiedle w Meksyku ma się składać z 50 domów. Druk dwóch pierwszych z nich skończono w grudniu 2019 r., a zasiedlenie osiedla przewidziane jest w tym roku. Takie domy są przeznaczone dla osób mających na przeżycie mniej niż 3 dolary amerykańskie dziennie. Do budowy wykorzystuje się wielkie drukarki VULCAN firmy ICON. Autorzy projektu twierdzą, że wydrukowanie jednego domu trwa tylko jeden dzień. W świetle omawianego dalej Raportu COBOD [30] nie wydaje się, żeby ta ostatnia informacja była wiarygodna. Jednak nawet gdyby budowa trwała dłużej, to i tak zostanie ona ukończona prędzej i będzie znacznie tańsza niż gdyby została wykonana metodą tradycyjną.

Podobnie jak WinSun, wiele firm budujących budynki w technologii druku 3D twierdzi, że drukuje je (albo nawet, że je buduje) w ciągu jednego dnia. Nie może to być prawdą. Ostatnio ukazał się Raport duńskiej firmy COBOD drukującej budynki w 3D na temat rzetelności takich doniesień [30], w którym autorzy twierdzą, że większość informacji

reklama

reklama

prasowych w tej dziedzinie nie jest wiarygodna. Np. żaden z zaprezentowanych domów NIE BYŁ zbudowany w ciągu 24 godzin, jak twierdzi wiele firm drukujących w 3D domy. Domy te nie są drukowane na placu budowy, a jedynie montowane z prefabrykowanych elementów wydrukowanych w fabrykach, czasami bardzo daleko od placu budowy. Tezy te ilustruje Raport przykładami:

1. Chińska firma WinSun.

Jak wspomniano powyżej, firma WinSun chwaliła się wieloma wydrukowanymi w 3D domami, m.in. 10 domami wydrukowanymi w ciągu 10 dni już w 2013 roku [27], rezydencją, cztero-piętrowym domem mieszkalnym [28] oraz budynkiem biurowym w Dubaju [37]. Jest ona jednym z liderów rynku druku 3D w budownictwie. Firma WinSun zbudowała fabrykę w Suzhou w Chinach, gdzie drukuje w 3D fragmenty domów, wykorzystując własne drukarki. Jeśli więc WinSun podaje, że zbudowanie 10 domów zajęło im 10 dni, to znaczy, że przez te 10 dni zmontowano te budynki z prefabrykowanych wcześniej elementów. Często pokazywany budynek w Dubaju wcale nie został wydrukowany w 3D w tym kraju i do budowy użyto nie tylko wydrukowanych elementów [30]. O problemach prawnych firmy WinSun wspomniano powyżej [29]. Warto jednak wspomnieć, że WinSun opracował własne materiały do drukowania wykorzystujące śmieci [14].

2. Rosyjska firma Apis Cor [38] zaczęła działalność, drukując w 3D często pokazywany mały domek podczas trzydniowych targów druku 3D, dostępnych tylko dla Rosjan, w październiku 2016 roku. Apis Cor nie twierdził, że budowa ta została wykonana w ciągu 24 godzin, a jedynie, że mógł on być wydrukowany w ciągu 24 godzin, faktycznie ukończono ten budynek dopiero w lutym 2017 roku. Podobnie jak w innych projektach tego typu, wydrukowane w 3D były tylko ściany, a inne elementy wykonane zostały w sposób tradycyjny. Co więcej, mimo założonego celu Apis Cor nie dostarczało budowlanych drukarek 3D nawet jesienią 2019 roku.

3. Podobnie mały budynek dla bezdomnych w Austin firmy ICON [39], o której mówiliśmy wcześniej, opisując akcje taniego budownictwa mieszkaniowego oraz projekt dla NASA, „mógł być”, ale nie został wydrukowany przez 24 godziny, a w ciągu kilku dni, a może dłużej. W Raporcie firmy COBOD autorzy analizowali wideo reklamujące budowę i doszli do wniosku, że trwała ona wiele tygodni. Podobnie jak Apis Cor, firma ICON nie zdołała zapewnić klientom drukarek budowlanych do jesieni 2019 roku.

Warto podkreślić, że również inne firmy, niewymienione w Raporcie COBOD, podają nierealistyczne terminy wykonania budynków metodą druku 3D. Na zakończenie Raportu firma COBOD stwierdza, że w 2017 roku wybudowała ona pierwszy w Europie dom w technologii 3D, a następnie powtórzyła ten projekt w 2019 roku w ciągu trzech dni roboczych (28,5 godziny) (rys. 6, 7). W Raporcie firma COBOD przyznała, że nawet ten ostatni projekt posiadał pewne wady, nad usunięciem których będzie nadal pracować. Wydaje się, że to właśnie ten Raport przyczynił się do

uhonorowania firmy COBOD, będącej w ścisłej czołówce nagrody portalu *3D printing industry* za 2019 rok [40]. Mimo pandemii firma COBOD dobrze się rozwija i jej drukarki budowlane 3D znalazły zastosowanie w trzech projektach krótko omówionych poniżej.

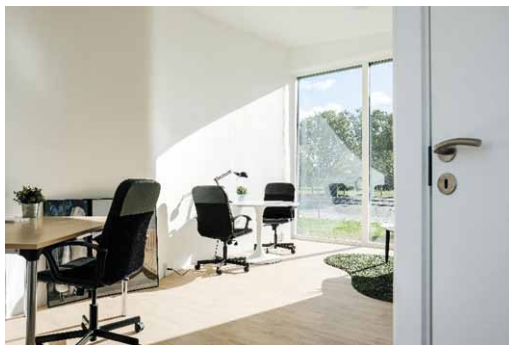
Druk 3D znajduje coraz więcej zastosowań w budownictwie. Pojawiła się informacja, że pierwszy budynek mieszkalny w Europie – zresztą o trochę dziwnym kształcie – wzniesiony w technologii 3D został zbudowany w Rosji w historycznym Jarosławlu [42]. Budynek ten, jak również projekt pierwszego wydrukowanego w 3D zamku [43] wskazują, że zastosowanie nowoczesnej technologii niekoniecznie łączy się z wysublimowanym smakiem artystycznym.

Z drugiej strony ogłoszono, że dwa lata temu pierwsza rodzina w Europie zamieszkała w wydrukowanym w 3D 95-metrowym domu z czterema sypialniami i dużym salonem [44]. Dom ten ma zakrzywione ściany, by zmniejszyć wpływ zwiększonej wilgotności, i wbudowane dodatkowe zabezpieczenia dla niepełnosprawnych. Podrożyło to budowę. Jego drukowanie trwało 54 godziny, a dodatkowo 4 miesiące zajęło wstawienie okien, drzwi, dachu i (chyba, HD) instalacji elektrycznej i wodno-kanalizacyjnej. Był to prototyp większych projektów, mający na celu sprawdzenie, czy budowane w 3D domy są tańsze i szybsze w budowie. Budowniczy uważają, że wzniesienie tego budynku obecnie zajęłoby im 33 godziny. Jest interesujące, że budynek powstał w ramach współpracy między Radą Miejską, spółdzielnią mieszkaniową a uniwersytetem w ubogiej dzielnicy Nantes i był częściowo finansowany przez Radę Miejską.

Ukraiński *start-up* Passiv Dom wydrukował w 3D mały (38 m²) dom wyposażony w panele słoneczne i charakteryzujący się zerową emisją CO₂ (rys. 8) [45]. Omówiony powyżej budynek biurowy, mający być najwyższym wydrukowanym w 3D budynkiem na świecie, wybudowano w Dubaju [46]. Ostatnio doniesiono o trzech projektach



Rys. 6. Budynek wydrukowany w 3D przez firmę COBOD. © COBOD [41]



Rys. 7. Biuro w budynku przedstawionym na rys. 6. © COBOD [41]

budowania więcej niż parterowych domów z wykorzystaniem drukarek budowlanych 3D firmy COBOD. Zwraca uwagę fakt, że mimo perturbacji związanych z pandemią koronawirusa firma ta sprzedała ostatnio kilka swoich drukarek budowlanych 3D. Pierwszy z projektów to budowany w Belgii piętrowy dom mieszkalny [47] dofinansowany przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego ERDF [48], wydrukowany w 3D na placu budowy „w jednym kawałku”. Ma on częściowo eksperymentalny charakter, pozwoli ocenić trwałość takiego budownictwa. Budynek ten jest wyposażony w ogrzewanie podłogowe i sufitowe, specjalne fasadowe panele słoneczne, pompę ciepła i ma mieć zielony dach. Innym takim projektem, również wykorzystującym drukarkę firmy COBOD, jest budowany w Niemczech piętrowy budynek o powierzchni 80 m² na każdym piętrze, który może być wykorzystany zarówno jako dom mieszkalny, biurowy, jak też wystawieniczny [49]. Również w Niemczech firma COBOD buduje jeszcze większy, dwupiętrowy dom mieszkalny [50]. Ma on mieć powierzchnię 380 m² i składać się z pięciu mieszkań. Warto podkreślić, że szereg firm i instytucji, takich jak armia amerykańska, GE czy też japońskie firmy budowlane Taisei i Taiheivo Cement, jest zainteresowanych drukarkami 3D firmy COBOD.

Wśród innego typu budowli wzniesionych w technologii 3D warto wymienić most ze wzmocnionego betonu dla pieszych w Madrycie [51] (rys. 9). Wydrukowano również inne mosty [52, 53], zaś polska firma ZMORPH wydrukowała w 3D prototypy podczas projektowania mostu na dwutorowej trasie kolejowej z Gdańska do Pruszcza Gdańskiego [24]. Omawiana wcześniej firma WinSun pokazała również wydrukowane w 3D obiekty małej miejskiej architektury [54].

Bardzo ciekawe są plany katalońskiego Institute for Biodigital Architecture and Genetics Międzynarodowego Uniwersytetu Katalonii, iBAG-UIC, mające na celu wykorzystanie biomimetyki w architekturze miejskiej oraz genetyki i druku 3D [55]. Dyrektor instytutu Alberto Estévez uważa, że „Dziś nasze centra miejskie przypominają raczej kontenery towarowe ułożone w stosy do

przechowywania niż coś bardziej naturalnego, jak las.”, mówi on o zielonym futuryzmie z miastami zaprojektowanymi tak, aby naśladować naturę. Inspirując się pracami Gaudiego i twórczością surrealistów uczeni i praktycy z iBAG-UIC chcą zastosować genetykę i druk 3D, aby żywe komórki rosły w niestandardowych biomateriałach architektonicznych do wykorzystania w przestrzeniach mieszkalnych, umożliwiając miastom „wzrost” w sposób naturalny. Na razie podziwiać można ich bardzo piękne miejskie siedziska [55].

Na zakończenie warto wspomnieć o opracowanym przez firmę CEMEX cemencie z zerowym śladem węglowym [56]. Ten materiał, wykorzystujący nieorganiczne materiały wiążące i standardowe urządzenia do przechowywania, mieszania i dostarczania na pewno zainteresuje firmy budowlane stosujące druk 3D.

A co dzieje się w druku 3D w budownictwie w Polsce? Już w 2016 roku studenci ASP w Krakowie – Patryk Kurczaba, Paulina Morawa i Adrianna Pusz – analizowali możliwości i zalety zastosowania druku 3D w budownictwie [57]. Podobne opracowanie wykonali na Politechnice Częstochowskiej Maciej Major i Izabela Minda [58]. Jednak dopiero poprzedni rok okazał się w tej dziedzinie przełomowy. Pojawił się pierwszy wydrukowany w 3D dom w skali mikro: ma tylko 7 m², a zużyto przy jego wydruku 6 ton betonu [59]. Inżynierowie ze *start-upu* REbuild zbudowali drukarkę 3DCP (*3D Construction/Concrete Printing*) do betonu i wydrukowali ten dom w Otrębusach pod Warszawą. Warto również wspomnieć o zastosowaniu druku 3D przy produkcji małych elementów okien przez firmę Fakro [60].

Reasumując, dzięki swoim unikalnym właściwościom zastosowania druku 3D w budownictwie mają ogromny potencjał i będą odgrywać coraz większą rolę w wielu krajach. Dubaj [61] ma nawet ogólnokrajową politykę takich



Rys. 8. Wydrukowany w 3D inteligentny dom.

© PassiveDom



Rys. 9. Wydrukowany w 3D most dla pieszych

w Madrycie. © Wikipedia


zastosowań, podobnie jak USA (*America Makes*) [62] i Wielka Brytania (*Innovate UK*) [63]. W ramach tej strategii w Dubaju już w 2025 roku każdy nowy budynek ma być w 25% wydrukowany w 3D. Wydaje się, że w większości innych krajów brak jest takiego całościowego podejścia, ale nie ma wątpliwości, że ta technologia będzie odgrywała coraz istotniejszą rolę, zwłaszcza w budownictwie mieszkaniowym dla osób niemających. Z drugiej strony, technologia druku 3D będzie atrakcyjna dla inwestorów poszukujących niebanalnych rozwiązań. Ma ona tyle zalet, że nie warto, co robi większość firm działających w tej branży, podawać nieprawdziwych danych na temat jej efektywności. W tej sytuacji zwraca uwagę brak ogólnokrajowej instytucji branżowej wspierającej rozwój druku 3D w naszym kraju [64].

Literatura

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing, dostęp, 23 lutego 2020.
- [2] DODZIUK H.: *Druk 3D/AM. Zastosowania i skutki społeczne i gospodarcze*. PWN, Warszawa 2019, Rozdz. 11E.

- [3] CAROLO L., 19 lipca 2020, <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-building-construction/>, dostęp 16 października 2020.
- [4] OTTEN L., 14 sierpnia 2018, <https://source.wustl.edu/2018/08/changing-how-buildings-are-made/>, dostęp 2 października 2020.
- [5] ZASTROW M., 7 lutego 2020, <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00271-6>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [6] <https://www.prnewswire.com/news-releases/1-5-billion-3d-printing-construction-market-2024-by-material-type-concrete-metal-composite-construction-method-extrusion-powder-bonding-end-use-sector-building-infrastructure-300912755.html>, dostęp 20 listopada 2020.
- [7] CHERDO L., 27 marca 2020, https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/house-3d-printer-construction/#3D_printed_house_time_and_cost, dostęp 26 marca 2020. W tym przeglądzie drukarek budowlanych omówiono najnowsze (2020) stosowane w budownictwie drukarki 3D, ale podano nieprawdziwą informację o wycofaniu przez firmę strony internetowej WinSun. Została ona chyba zmieniona na <http://www.winsun3d.com/En/>, dostęp 2 kwietnia 2020.
- [8] RAE L. R., SAN FRATELLO V., *Printing architecture. Innovative recipes for 3D printing*. Chronicle Books, San Francisco 2018.
- [9] Kira, 10 lutego 2016, <http://www.3ders.org/articles/20160210-the-20-biggest-3d-printers-in-2016.html>, dostęp 23 lutego 2020; Twigg, 1 grudnia 2016, <https://www.scmp.com/magazines/post-magazine/long-reads/article/2050702/story-worlds-first-industrial-scale-3d-printer>, dostęp 27 lutego 2020.
- [10] LINK J., 4 listopada 2015, <https://www.autodesk.com/redshift/3d-printing-concrete/>, dostęp 26 marca 2020.
- [11] KOTZ F., ARNOLD K., BAUER W., SCHILD D., KELLER N., SACHSENHEIMER K., HELMER D., RAPP B.E., *Nature* 544, 337–339 (2017), <https://doi.org/10.1038/nature22061>; 21 sierpnia 2015, <https://youtu.be/7pRAzeNdVN8>, dostęp 23 lutego 2020.
- [12] adlughmin, 26 czerwca 2015, <https://3dprint.com/76838/3d-printed-celulose-houses/>, dostęp 23 lutego 2020.
- [13] MOLITCH-HOU M., 2 października 2014 <https://3dprintingindustry.com/news/progressive-innovations-earthbag-3d-printing-eco-friendly-construction-33961/>, dostęp 23 lutego 2020; <https://www.arch2o.com/pylos-3d-printing-with-soil-sofoklis-giannakopoulos/>, dostęp 16 lutego 2020; SCOTT C., 3 kwietnia 2017, <https://3dprint.com/169892/iaac-tecnalia-robotic-construction/>, dostęp 27 lutego 2020.
- [14] WHEELER A., 19.01.2015, <https://3dprintingindustry.com/news/winsun-3d-printing-building-40316/>, dostęp 23 lutego 2020.
- [15] <https://www.youtube.com/watch?v=EVl3gmswhM>, dostęp 10 kwietnia 2020.
- [16] TAYLOR S., 16 kwietnia 2019, <https://www.ecomena.org/3d-printing-waste-management/>, dostęp 16 lutego 2020.
- [17] ANDERSON T., 1 luty 2013, <http://www.tgdaily.com/space-features/69207-how-to-build-a-lunar-base-with-3d-printing>, dostęp 23 lutego 2020.
- [18] 1 października 2020, <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/releases/2020/nasa-looks-to-advance-3d-printing-construction-systems-for-the-moon.html>, dostęp 12 października. 2020.
- [19] Odn. 2, Rozdz. 5.
- [20] GILES B.C., SOUTER B., 5 stycznia 2017, https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-next-five-years-brian-c-giles-blair-souter-armatron-systems-114979/?utm_medium=push&utm_source=onesignal&utm_campaign=website%20button, dostęp 16 lutego 2020.
- [21] <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>, dostęp 26 marca 2020.
- [22] STOTT R., <https://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-print-structures-of-any-size>, dostęp 13 października 2020.
- [23] <https://www.solidsmack.com/fabrication/silk-pavilion-creating-3d-printed-structures-from-silk-worms/>, dostęp 23 lutego 2020.
- [24] ŻÓŁTOWSKI P., <https://zmorph3d.com/pl/zastosowania/most-wydrukowany-3d>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [25] Tess, 16.06.2017, <http://www.3ders.org/articles/20170616-contour-crafting-begins-series-production-of-deployable-construction-3d-printers.html>, dostęp 23 lutego 2020.
- [26] <https://houseofdus.com/project/3d-print-canal-house/>, dostęp 23 lutego 2020.
- [27] YOUNG M., <https://greeninitiatives.cn/blog-description/chinese-company-builds-3d-printed-sustainable-houses>, dostęp 23 lutego 2020.
- [28] MASSIE C., 28 stycznia 2015, https://www.architectmagazine.com/technology/chinas-winsun-unveils-two-new-3d-printed-buildings_o, dostęp 2 kwietnia 2020.
- [29] Krassenstein, 16.04.2015, <https://3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/>, dostęp 23 lutego 2020.
- [30] cobod.com > 2019/12 > 3DCP-fact-sheet-Final, plik pdf, dostęp 1 kwietnia 2020.
- [31] BOISSONNEAULT T., 8 sierpnia 2018, <https://www.3dprintingmedia.network/ways-3d-printing-impacting-world/>, dostęp 10 kwietnia 2020.
- [32] <https://www.3dwasp.com/en/maker-economy-starter-kit/>, dostęp 29 marca 2020
- [33] CHIUSOLI A., 20 września 2018, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>, dostęp 13 października 2020.
- [34] <https://www.3dwasp.com/en/shamballa/>, dostęp 29 marca 2020.
- [35] <https://www.youtube.com/watch?v=SvM7jFZGAec>, dostęp 1 kwietnia 2020.
- [36] ESSOP A., 14 maja 2019, <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-to-provide-housing-for-low-income-community-in-latin-america-155397/>, dostęp 29 marca 2020.
- [37] GAROFALO F., <https://www.lifegate.com/people/lifestyle/worlds-first-3d-printed-office-building-dubai>, dostęp 5 kwietnia 2020.
- [38] GARFIELD L., 23 marca 2020, <https://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3?IR=T>, dostęp 6 kwietnia 2020.
- [39] CANALES K., 13 października 2019, <https://www.businessinsider.com/icon-3d-printer-tiny-home-austin-photos-2019-10?IR=T>, dostęp 6 kwietnia 2020.
- [40] JACKSON B., 11 czerwca 2019, <https://3dprintingindustry.com/news/2019-3d-printing-industry-awards-winners-announced-156727/>, dostęp 9 kwietnia 2020.

- [41] <https://cobod.com/>, dostęp 13 października 2020.
- [42] Benedict, 24 października 2017, <https://www.3ders.org/articles/20171024-amt-specavia-builds-europes-first-habitable-3d-printed-building.html>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [43] Nie tylko modele: HULETTE T., 9 marca 2019, <https://all3dp.com/2/3d-printed-castle-best-models-to-mark-your-territory/>, dostęp 13 października 2020.
- [44] ANUSCI V., 16 kwietnia 2015, <https://all3dp.com/rise-3d-printed-personal-house/>, dostęp 13 października 2020; COWAN M., 6 lipca 2018, <https://www.bbc.com/news/technology-44709534>, dostęp 6 kwietnia 2020.
- [45] GARFIELD L., 14 grudnia 2017, <https://www.businessinsider.com/3d-printed-house-robot-passivdom-2017-4?IR=T>, dostęp 13 października 2020.
- [46] SALEEM F., 29 stycznia 2020, <https://www.engineering.com/BIM/ArticleID/19863/Worlds-Largest-3D-Printed-Building-in-Dubai.aspx>, dostęp 13 października 2020.
- [47] <https://3dprint.com/270371/belgium-kamp-c-uses-cobod-bod2-3d-printer-build-two-story-home-piece/>, dostęp 13 października 2020.
- [48] https://ec.europa.eu/regional_policy/en/funding/erdf/, dostęp 13 października 2020.
- [49] <https://3dprint.com/270371/belgium-kamp-c-uses-cobod-bod2-3d-printer-build-two-story-home-piece/>, dostęp 13 października 2020.
- [50] <https://3dprint.com/275866/three-floor-3d-printed-apartment-building-begins-construction/>, dostęp 13 października 2020.
- [51] <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [52] TUCKER E., <https://thespaces.com/shanghai-is-now-home-to-the-worlds-largest-3d-printed-bridge/>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [53] <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [54] http://www.winsun3d.com/En/News/news_inner/id/451, dostęp 5 kwietnia 2020.
- [55] LISTEK V.: 3 grudnia 2020, <https://3dprint.com/276251/biodigital-architecture-felixprinters-and-ibag-uic-to-test-living-biomaterials-for-sustainable-architecture/>, dostęp 5 grudnia 2020.
- [56] BETTENHAUSEN C., 29 Oct. 2020, https://cen.acs.org/materials/Chemex-goes-global-carbon-neutral/98/i42?utm_source=NonMember&utm_medium=Newsletter&utm_campaign=CEN, dostęp 4 października. 2020.
- [57] 27 czerwca 2016, <https://www.astrofizyka.pl/aktualnosci/2016-06-23-06-59-15>, dostęp 13 października 2020.
- [58] MAJOR M., MINDA I., *Zastosowanie technologii druku przestrzennego w budownictwie*, „Budownictwo” 22, doi: 10.17512/znb.2016.I.23, <https://docplayer.pl/59124805-Zastosowanie-technologie-druku-przestrzennego-w-budownictwie.html>, dostęp 13 października 2020.
- [59] BALCEROWSKA M., 18 września 2019, <https://www.muratorplus.pl/technika/konstrukcje/pierwszy-betonowy-dom-z-drukarki-3d-stanal-pod-warszawa-aa-xZCN-1gWc-itT7.html>, dostęp 9 kwietnia 2020.
- [60] <https://vshaper.com/pl/case-studies-pl/druk-3d-wspiera-rozwoj-firmy-fakro/>, dostęp 5 kwietnia 2020.
- [61] <https://www.dubaifuture.gov.ae/our-initiatives/dubai-3d-printing-strategy/>, dostęp 2 kwietnia 2020.
- [62] <https://www.americamakes.us/about/>, dostęp 20 listopada 2020.
- [63] <https://innovateuk.blog.gov.uk/tag/3d-printing/>, dostęp 20 listopada 2020.
- [64] Krótko istniejące Stowarzyszenie Polskiej Branży Druku 3D się samorozwiązało <https://rejestr.io/krs/632441/stowarzyszenie-polskiej-branzy-druku-3d>, dostęp 20 listopada 2020.

 Prof. Helena Dodziuk,
IChF PAN, Warszawa
e-mail: hdodziuk@gmail.com