

Mieszanki betonowe stosowane w technologii druku trójwymiarowego

Concrete mixtures applied in three-dimensional printing technology

dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-7735-7863), Wydział Inżynierii Ładowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6298

Streszczenie: W niniejszej pracy dokonano przeglądu literatury z zakresu mieszanek i zapraw betonowych stosowanych w druku trójwymiarowym. Przegląd literatury przygotowano z zachowaniem chronologii pojawienia się danej publikacji (daty publikacji). Na podstawie przeprowadzonego przeglądu dokonano tabelarycznego zestawienia receptur mieszanek wykorzystywanych w wydrukach trójwymiarowych (3D). Przedstawiony przegląd literatury z zakresu mieszanek i zapraw betonowych stosowanych w druku trójwymiarowym można traktować jako wstęp do szczegółowych badań związanych z projektowaniem nowych typów mieszanek i receptur.

Słowa kluczowe: druk trójwymiarowy, beton drukowalny, mieszanki betonowe.

Abstract: This paper presented a state-of-the-art review of the literature on the subject of concrete mixes and mortars used in 3D (three-dimensional) printable concrete. The literature review is prepared by the chronology of the publication (date of publication). Based on the performed state-of-the-art review, a tabular list of concrete mix recipes used in three-dimensional printing technology is given. The presented literature review in the field of concrete mixtures and mortars used in three-dimensional printing can be treated as an introduction to detailed research related to the design of new types of mixtures.

Keywords: 3D concrete printing, printable concrete, concrete mix.

1. Wprowadzenie

Zmieszanie w odpowiednich proporcjach kruszywa ze spoiwem mineralnym i wodą oraz innymi domieszkami i dodatkami nazywamy mieszanką betonową. W procesie wiązania mieszanka betonowa twardnieje (nazywana betonem), uzyskując określone właściwości mechaniczne, chemiczne i fizyczne, które zależą od składu i proporcji poszczególnych składników mieszanki oraz warunków klimatycznych, w których jest układana [1]. Rozwój technologii betonu postępuje od ponad dwóch tysięcy lat. Rzymski Panteon i Termy Karakalli są przykładem konstrukcji betonowych, do budowy których używano mieszanek, w skład których wchodziło wapno palone, pucolany i kruszywa lub gruzu. W XVIII wieku John Smeaton zastosował mieszankę na bazie wapna gaszonego z dodatkiem trasy i żuźla miedziowego do budowy latarni morskiej Eddystone w zatoce Plymouth. Kolejny przełom nastąpił w 1824 roku, kiedy Joseph Aspdin opatentował nowoczesny cement, który nazwał portlandzkim. Na ziemiach polskich pierwszą cementownię uruchomił Jan Ciechanowski w roku 1857, w Grodźcu pod Będzinem. Unowocześnienie technologii produkcji cementu (np. zastosowanie pieca obrotowego do wyprażania cementu portlandzkiego) spowodowało jego masową produkcję, co było impulsem do rozwoju technologii produkcji nowoczesnych mieszanek betonowych.

W tradycyjnym procesie betonowania dostarczone na budowę mieszanki betonowe „umieszczamy” we wcześniej przygotowanych deskowaniach, gdzie w procesie wiązania mieszanka utwardza się do ostatecznej formy i nabiera określonych parametrów mechanicznych (m.in. określonej wytrzymałości na ściskanie). W przypadku technologii druku trójwymiarowego (3D) układana mieszanka nie ma deskowania ani formy. Mieszanka do zastosowania w drukarce 3D różni się składem od stosowanych tradycyjnych mieszanek betonowych, lecz jest do niej podobna. Mieszanka do druku 3D powinna być zaprojektowana tak, aby spełniała specyficzne wymagania eksploatacyjne stawiane zarówno świeżej mieszance, jak i utwardzonej/związanej. Świeża mieszanka musi odpowiadać specyficznym wymaganiom reologicznym w celu osiągnięcia optymalnej równowagi między jej urabialnością, wyłączalnością i możliwością wbudowania/ułożenia. Druk trójwymiarowy jest atrakcyjną technologią do produkcji 3D struktur powstających w wyniku układania cienkimi warstwami mieszanki o określonych parametrach spełniającej wymagania urabialności (pompowalność – ang. *pumpability*), wytłaczalności (ang. *extrudability*), budowalności (ang. *buildability*) odpowiedzialne za drukowalność mieszanki (ang. *printability*) i wymagania reologiczne (niska dynamiczna granica plastyczności w celu zwiększenia przepływu, wysoka statyczna granica plastyczności, aby przeciwstawiać się przepływowi) związane z tiksotropią (ang. *thixotropy*).

Literatura z zakresu badań mieszanek betonowych wykorzystywanych w procesie druku 3D jest obszerna, niemniej jednak warto zwrócić uwagę na wybrane pozycje bibliograficzne. Boulekbache i inni [2] analizują płynność mieszanki betonowej zbrojonej włóknami i jej wpływ na właściwości mechaniczne betonu. Libre i inni [3] badają ciągliwość lekkiego betonu kruszywowego poprzez zastosowanie hybrydowych włókien stalowych i polipropylenowych. Lim i inni [4] omówili wielkoskalowe procesy wytwarzania przyrostowego bazujące na zautomatyzowanym procesie opartym na wytłaczaniu mieszanek (drukowaniu betonu), które stosowane są w budownictwie i architekturze. Le i inni [5] opisali wyniki eksperymentalne dotyczące wysokosprawnych mieszanek drobnoziarnistych zbrojonych włóknami i ich właściwości. Mieszanki zostały zaprojektowane do wytłaczania przez dyszę w celu budowania elementów konstrukcyjnych warstwa po warstwie w technologii druku 3D. Gosselin i inni [6] zaproponowali nową ścieżkę przetwarzania i wytwarzania przyrostowego dla betonu ultra wysokosprawnego w technologii drukowania 3D materiałów cementowych. Nerella i inni [7] przedstawili aktualne podejścia do drukowania betonu 3D oraz zaproponowali nowatorskie podejście, w którym pompa z wysięgnikiem do betonu jest przystosowana do umieszczania świeżego betonu z geometryczną precyzją. Autorzy podkreślają, iż właściwości reologiczne świeżego betonu (mieszanki betonowej) muszą być zoptymalizowane zgodnie z parametrami procesu, takimi jak szybkość drukowania i scenariusze drukowania. Panda i inni [8] opracowali nowatorską zaprawę geopolimerową zbrojoną włóknami, której skład (w procentach masy całkowitej) to popiół lotny (ang. *fly-ash*) 23%, żużel (granulat wielkopieczowy zmielony, ang. *ground granulated blast-furnaceslag*) 5%, mikrokrzemionka (ang. *micro silica*) 3%, drobny (rzeczny) piasek o maksymalnym uziarnieniu 1,18 mm 47%, płynny krzemian potasu (ang. *liquid potassium silicate*) 15%, hydroksypropylometyloceluloza (ang. *hydroxypropyl methylcellulose*) 2% i woda wodociągowa 5%. Podkreślają, że dodatek włókien (do 1%) nieznacznie poprawia wytrzymałość na ściskanie wydrukowanej mieszanki, ale wpływa znacznie na wytrzymałość na zginanie i rozciąganie. Kazemian i inni [9] badali mieszanki cementowe z zastosowaniem nanogliny, pyłu krzemionki i włókien do drukowania 3D w skali konstrukcyjnej. Hambach i Volkmer [10] przebadali właściwości wydrukowanego w 3D kompozytu z pasty cementu portlandzkiego wzmocnionego włóknami. Ponikiewski i inni [11] oceniali mieszanki betonowe pod względem łatwości pompowania, łatwości wbudowania oraz czasu urabialności. Otrzymane wyniki pozwoliły wstępnie ocenić przydatność badanej mieszanki do procesu drukowania. Paul i inni [12] podkreślają, że właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ściskanie i zginanie próbek drukowanych w 3D zależą od kierunków ich drukowania. Pacewicz i inni [13] dokonali charakterystyk materiałów do drukowanych w 3D metodą druku addy-

tywnego konstrukcji budowlanych. Marchment i inni [14] podjęli próbę zbadania metody wzmocnienia wiązań międzywarstwowych wydrukowanego materiału poprzez zastosowanie pasty cementowej na styku, aby zminimalizować puste przestrzenie i wzmocnić obszar wiązania. Za pomocą skanera i unikalnej metody przetwarzania obrazu na drukowanych warstwach dokonano ilościowej oceny pola styku, tzw. pola efektywnego wiązania. Zhang i inni [15] badają właściwości świeżych mieszanek wykorzystywanych w druku 3D. Wyniki wykazały, że budowlalność testowanych mieszanek z niewielką ilością nanogliny (ang. *nano clay*) lub mikrokrzemionki (ang. *silica fume*) została zwiększona odpowiednio o 150 i 117% w porównaniu z bazową mieszanką, co znacznie poprawiło tiksotropię i wytrzymałość. Panda i Tan [16] opracowali mieszankę geopolimerową do druku 3D, który może być wykorzystany do drukowania niekonstrukcyjnych elementów budowlanych bezpośrednio z modeli cyfrowych bez konieczności stosowania szalunków. W badaniach eksperymentalnych zmierzono krytyczne właściwości świeżej mieszanki, takie jak wytłaczalność, zachowanie kształtu, budowlalność i czas otwarcia, a następnie określono ich zakresy robocze. Kruger i inni [17] przedstawili nowatorski model tiksotropii reologicznej (uwzględniający zarówno fizyczne, jak i chemiczne wpływy na mikrostrukturę materiału), który w szczególności odnosi się do charakterystyki materiałów nadających się do drukowania 3D mieszanek betonowych. Mechtcherine i inni [18] dokonali oceny stanu techniki w zakresie interesujących technologii, które umożliwiłyby produkcję na dużą skalę konstrukcji betonowych zgodnie z wymaganiami współczesnych wymagań architektonicznych i konstrukcyjnych oraz przedstawiają konstrukcję koncepcji druku procesowego 3D do monolitycznego drukowania 3D. Nerella i inni [19] badają właściwości mechaniczne i graniczne mieszanek cementowych do druku 3D o różnych składach spoiw (zawierającymi jedynie cementem portlandzkim lub inne zawierające dodatki pucolanowe). Zhang i inni [20] opisują proces projektowania mieszanki betonu do druku 3D w oparciu o teoretyczną analizę granicy plastyczności zaprawy. Stwierdzono, że istnieje liniowa zależność między płynnością pasty a optymalną zawartością kruszywa w mieszankach betonowych do druku 3D, które dobrze spełniają wymagania dotyczące drukowalności. Malaeb i inni [21] opisują proces opracowania odpowiednich mieszanek betonowych odpowiednich do druku 3D. Optymalną mieszankę autorzy uzyskują po przeprowadzeniu kilku testów w celu weryfikacji jej właściwości. Xu i inni [22] przedstawili nowatorską metodę druku przestrzennego 3D betonu, wykorzystującą kwadratową dyszę o zmiennej wielkości do produkcji ozdób architektonicznych. Objętościowy proces drukowania 3D betonu (ang. *volume – forming 3D concrete printing*) jest opisany jako bezpośrednie wytwarzanie zmiennej objętości przekroju poprzecznego podczas jednorazowej pracy, zamiast procesu akumulacji modelowania

Rys. 1. Przykłady przestrzennych struktur wykonanych w technologii druku 3D



topionego osadzania (ang. *fused deposition modelling*). Rahul i Santhanam [23] badali drukowalność mieszanek betonowych wykonanych z lekkich kruszyw keramzytowych o maksymalnym rozmiarze 10 mm. Wpływ dodatku gruboziarnistego kruszywa na zasadnicze aspekty drukowania (wyłaczalność i budowlalność) badali za pomocą systemu drukarki 3D opartej na pompie tłokowej. Wang i inni [24] testują wytrzymałość na bezpośrednie rozciąganie i ścinanie granic międzyfazowych wzmocnionych zaprawą polimerową. Ponadto za pomocą dynamiki molekularnej i teorii funkcjonału gęstości przeprowadzono symulację wpływu wilgoci uwalnianej z powierzchni materiałów kompozytowych na bazie cementu na właściwości wiązania międzywarstwowego oraz mechanizm wzmacniania zapraw modyfikowanych lateksem epoksydowym i chloroprenowym. Marchment i Sanjayan [25] przedstawili nową metodę procesową osadzania zbrojenia siatkowego w czasie drukowania warstwy betonu 3D. Zbrojenia w każdej warstwie są nakładane w kierunku międzywarstwowym (w poprzek warstwy), aby symulować ciągłe zbrojenie. Testy i obliczenia wykazały, że zbrojenie z siatki zakładkowej skutecznie funkcjonowało jako zbrojenie ciągłe. Moelich i inni [26] badali swobodny skurcz próbek mieszanek wydrukowanych w 3D, a także zidentyfikowali i systematycznie wprowadzili źródła unieruchamiania w celu wywołania plastycznego pęknięcia skurczowego. Yu i inni [27] przedstawili charakterystykę mikrostrukturalną betonu drukowanego w technologii 3D. Autorzy podkreślili, iż całkowita porowatość wzrosła z 22,8% dla próbki odlewanej do 32,6% dla próbki przygotowanej z mieszanki drukowanej. Moelich i inni [28] analizują wpływ dodawanie superabsorbentu polimerowego (ang. *superabsorbent polymers*) i dodatkowej wody w drukowanych mieszankach 3D w celu regulowania procesu hydratacji poprzez opóźnione wewnętrzne uwalnianie wody. Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowany superabsorbent polimerowy modyfikuje rozwój właściwości reologicznych mieszanki poprzez wchłanianie płynu porowego przez krótki czas po drukowaniu. Zhu i inni [29] opisują proces wykorzystania technologii drukowania 3D jako szalunku traconego do budowy słupów. W artykule badane są efekty stosowania



Rys. 2. Przykład przestrzennej wielkoformatowej struktur wykonanych w technologii druku 3D

różnych zawartości hydroksypropylometylocelulozy (ang. *hydroxypropyl methyl cellulose*) i różnych stosunków wody do spoiwa na drukowalność i właściwości mechaniczne badanych mieszanek. Federowicz i inni [30] wykorzystują ciężki beton na bazie magnetytu jako surowiec do procesu drukowania 3D. Dvorkin i inni [31] wykonali badania porównawcze wpływu najczęściej spotykanych odpadów przemysłowych na wyłaczalność i właściwości mechaniczne betonów nadających się do druku 3D.

Powyższy przegląd literatury wskazuje, iż tematyka związana z technologią drukowania 3D oraz wykorzystaniem i testowaniem różnego rodzaju mieszanek betonowych i zapraw cementowych jest chętnie podejmowana przez liczne grono naukowe i inżynierskie. Technologia druku 3D konstrukcji i elementów konstrukcyjnych jest postrzegana jako technologia przyszłości, która ma wiele możliwości i potencjalnych zastosowań w różnych gałęziach przemysłu, m.in. inżynierii lądowej i budownictwie (rys. 1, 2).

2. Składy mieszanek wykorzystywanych w technologii druku 3D

Wynalezienie stereolitografii (technologii, która pozwoliła na wytwarzanie modeli na podstawie danych cyfrowych) w 1984 roku uważa się za początek druku 3D. Od tamtej pory obserwuje się dynamiczny rozwój technologii druku 3D. Coraz szybszy rozwój druku 3D w wielu gałęziach przemysłu daje szerokie perspektywy coraz bardziej dynamicznego rozwoju [32]. Technologia druku 3D jest upatrywana także jako szansa dla środowiska naturalnego, poprzez zredukowanie emisji szkodliwych substancji do środowiska oraz możliwość ponownego wykorzystania materiałów uznawanych dotychczasowo za odpady [33].

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury zebrano i zestawiono w tabelach 1–10 składy recepturowe mieszanek betonowych i zapraw stosowanych w technologii druku 3D. Zestawienie tabelaryczne utrzymano w porządku chronologicznym ukazania się danej publikacji. Na podstawie cytowanej pozycji bibliograficznej i zamieszczonych w danej publikacji danych zestawiono informacje dotyczące składu mieszanek betonowych i zapraw, które były badane lub testowane w przywołanej pozycji literaturowej. Składy mieszanek i zapraw podawane są w sposób masowy (wskazując ilość danego składnika w kg/m^3) lub też w stosunku do zawartości cementu lub spoiwa. Należy zwrócić uwagę, że w cytowanych publikacjach często brak jest szczegółowych informacji o poszczególnych składnikach mieszanek,

lecz mimo to zdecydowano się zestawzić dostępne w literaturze składy recepturowe mieszanek.

W składach mieszanek jako spoiwo stosowany jest głównie cement portlandzki z dodatkiem mikrokrzemionki, popiołów lotnych lub granulowanego żużla wielkopieczowego oraz innych dodatków i domieszek poprawiających cechy urabialności, wytłaczalności, budowlalności lub/i właściwości reologicznych niezbędnych do zastosowania danej mieszanki w technologii druku 3D. Można zwrócić uwagę, że stosowane mieszanki (tabele 1–10) zawierają dużą ilość cementu/spoiwa, przez co mieszanki te mają stosunkowo dużą wytrzymałość na ściskanie, lecz z drugiej strony sprzyja to powstawaniu naprężeń skurczowych. Z tego względu aby zabezpieczyć beton przed zarysowaniem aplikuje się włókna np. włókna polipropylenowe.

Tabela 1. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoiwo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{\max}	Zbrojenie włóknami
Lim i inni [4]	cement portlandzki CEM I 52.5: 578,9 kg/m^3 popiół lotny: 165,4 kg/m^3 pył krzemionkowy: 82,7 kg/m^3	216 kg/m^3 0,26	opóźniacz: 0,5%C superplastyfikator: 1%C	piasek 2 mm: 1241 kg/m^3	mikrowłókna polipropylenowe (12/0,18 mm)
Le i inni [5]	cement CEM type I 52.5: 376-643 kg/m^3 popiół lotny: 107–184 kg/m^3 pył krzemionkowy: 54–92 kg/m^3	150–257 kg/m^3	superplastyfikator, opóźniacz, przyspieszacz w różnych proporcjach	piasek 0–2 mm: 1123–1612 kg/m^3	włókna polipropylenowe 12/0,18 w różnych proporcjach
Gosselin i inni [6]	cement portlandzki CEM I 52.5N: 30-40%w krzemionka krystaliczna: 40–50%w pył krzemionkowy: 10%w wypełniacz wapienny: 10%w	woda/(cement +piasek) = 0,1	brak danych	brak danych	-
Nerella i inni [7]	cement portlandzki CEM I 52.5R (ft): 430 kg/m^3 popiół lotny: 170 kg/m^3 zawiesina mikrokrzemionkowa (zawartość substancji stałych 50%): 180 kg/m^3	180 kg/m^3	superplastyfikator (MCPF5100/MC Bauchemie): 10 kg	piasek 0,06-0,2mm: 430 kg/m^3 piasek 0-1mm: 380 kg/m^3 piasek 0-2mm: 430 kg/m^3	-

Tabela 2. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoiwo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{\max}	Zbrojenie włóknami
Kazemian i inni [9]	cement portlandzki typ II: 600 kg/m^3	259 kg/m^3	superplastyfikator: 0,05%C domieszka zwiększającą stabilność oraz spójność 0,11%C	piasek 2,36mm: 1379 kg/m^3	-
	cement portlandzki typ II: 540 kg/m^3 pył krzemionkowy: 60 kg/m^3	259 kg/m^3	superplastyfikator: 0,16%C	piasek 2,36mm: 1357 kg/m^3	-
	cement portlandzki typ II: 600 kg/m^3	259 kg/m^3	superplastyfikator: 0,06%C domieszka zwiększającą stabilność oraz spójność 0,10%C	piasek 2,36mm: 1379 kg/m^3	włókna polipropylenowe: 1,18 kg/m^3
	cement portlandzki typ II: 600 kg/m^3	259 kg/m^3	superplastyfikator: 0,06%C nanogлина: 0,30%C	piasek 2,36 mm: 1379 kg/m^3	-
Hambach i Volkmer [10]	cement portlandzki typu I 52,5 R: 61,5% pył krzemionkowy: 21%	Woda 15% (w/c) _{eq} = 0,3	2,5% wagowo środka redukującego wodę (Glenium ACE 430, BASF) 0,3% wagowo inhibitor hydratacji (PANTARHOL 85, Pferrer)	-	-
Ponikiewski i inni [11]	cement portlandzki typu I 452,5 R: 903 kg/m^3 pył krzemionkowy: 101 kg/m^3	238 kg/m^3 (w/c) _{eq} = 0,24	superplastyfikator: 7,02 kg/m^3 (0,7%S)	piasek 0–2 mm: 1108 kg/m^3	włókna polipropylenowe 12 mm: 0,6 kg/m^3

Tabela 3. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoiwo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{max}	Zbrojenie włóknami
Paul i inni [12]	żużel: 39 kg/m ³ popiół lotny: 645 kg/m ³ pył krzemionkowy: 78 kg/m ³	47 kg/m ³	aktizel (ang. actigel): 8 kg/m ³ bentonit: 8 kg/m ³ krzemian potasu (K ₂ SiO ₃): 250 kg/m ³ tlenek potasu (KOH): 23 kg/m ³	piasek: 1168kg/m ³	-
	cement portlandzki: 290 kg/m ³ popiół lotny: 278 kg/m ³ pył krzemionkowy: 145 kg/m ³	285 kg/m ³	lignosulfonian sodu (ang. sodium lignosulfonate): 7 kg/m ³	piasek: 1211kg/m ³	-
	cement portlandzki: 289 kg/m ³ popiół lotny: 277 kg/m ³ pył krzemionkowy: 145 kg/m ³	284 kg/m ³	lignosulfonian sodu (ang. sodium lignosulfonate): 9 kg/m ³	piasek: 1209kg/m ³	włókna szklane: 13,5 kg/m ³
Marchment i inni [14]	cement portlandzki (typ GP): 1,0	0,360C	domieszka CO (ang. colour oxide): 0,025C	piasek kwarcowy (30/60) z średnią wielkością cząstek około 500 µm: 1,0C piasek kwarcowy (16/30) z średnią wielkością cząstek około 800 µm: 1,0C	-

Tabela 4. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoiwo (S)	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{max}	Zbrojenie włóknami
Zhang i inni [15]	cement portlandzki 52.5: 900 kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,35	superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,26%S zagęszczacz (thicker agent): 0,0125%spoiwa	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze ziaren 1 mm: 900 kg/m ³	
	spoiwo: cement portlandzki 52.5: 882 kg/m ³ pył krzemionkowy: 18 kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,35	superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,26%S zagęszczacz: 0,0125% spoiwa	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze ziaren 1 mm: 900 kg/m ³	
	cement portlandzki 52.5: 882 kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,35	superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,26%S zagęszczacz: 0,0125%S nanogлина: 18 kg/m ³	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze ziaren 1 mm: 900 kg/m ³	
	cement portlandzki 52.5: 882 kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,35	superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,26%S zagęszczacz (thicker agent): 0,0125%S opóźniacz (retarder agent): 0,1%S nanogлина: 18 kg/m ³	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze ziaren 1 mm: 900 kg/m ³	
	spoiwo: cement portlandzki 52.5: 864 kg/m ³ pył krzemionkowy: 18kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,35	superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody 0,26% spoiwa zagęszczacz (thicker agent) 0,0125% spoiwa nanogлина 18 kg/m ³	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze ziaren 1 mm: 900 kg/m ³	

3. Podsumowanie

Optymalny rodzaj/typ mieszanki stosowanej do druku 3D zależy w dużej mierze od urządzeń wbudowujących tę mieszankę. Kształt, średnica i wielkość elementu wytłaczającego i zamierzone przeznaczenie warunkuje dobór parametrów mieszanki. Z drugiej strony, należy zwrócić uwagę, że nawet niewielkie zmiany składu i konsystencji mieszanek stosowanych w druku 3D wpływają na utratę urabialności pomimo, iż mają łatwość pompowania i zdolność do układania ich w warstwach. Ważnym elementem

odpowiadającym za zdolności do wyciskania mieszanki z drukarki jest obecność odpowiedniej ilości materiałów drobnoziarnistych w składzie takiej mieszanki. Elementy drukowane mają zwykle mniejszą wytrzymałość mechaniczną, niż te pochodzące z form zabetonowanych daną mieszanką. Wpływ na to ma struktura powstała w wyniku łączenia się ze sobą układanych kolejno filamentów. W celu poprawy wytrzymałości tego wiązania proponuje się stosowanie dodatkowej mieszanki wiążącej. Urabialność mieszanek przeznaczonych do druku 3D zostaje zwykle wydłużona wskutek stosowania domieszek opóźniających,

Tabela 5. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{max}	Zbrojenie włóknami
Panda i Tan [16]	popiół lotny: 671,67 kg/m ³ granulowany żużel wielkopiecowy: 118,62 kg/m ³	65,84 kg/m ³	mikrokrzemionka (G940): 65,84 kg/m ³ odczynnik alkaliczny (roztwór krzemianu potasu z 24,32wt.% SiO ₂ , 18,71 wt.% Na ₂ O, razem z 45 wt.% roztworem NaOH) 355,58 kg/m ³	piasek rzeczny z max rozmiarem kruszywa 2 mm: 869,2 kg/m ³	-
Kruger i inni [17]	cement CEM II 52.5 N: 579 kg/m ³ popiół lotny: 165 kg/m ³ pył krzemionkowy: 83kg/m ³	261 kg/m ³	superplastyfikator (Chryso Fluid Premia 310): 1,48%S domieszka modyfikujący lepkość (ang. <i>viscosity modifying agent</i>) (Chryso Quad 20): 0,13%S nanocząstki (ang. <i>nanoparticles</i>): 1–3%C	drobne kruszywo z max rozmiarem kruszywa 4,75 mm: 1167 kg/m ³	-
Nerella i inni [19]	cement portlandzki: 627kg/m ³	(w/c) _{eq} =0,42	superplastyfikator 0,75% <i>c</i>	piasek 1391 kg/m ³ (piasek 0,06-0,2 – 20%, piasek rzeczny 0-1 – 20%, piasek 0-2 – 60%) 2,2 = Piasek/spoivo	-
	cement portlandzki: 391 kg/m ³ (55%wt%), popiół lotny: 213 kg/m ³ (30wt%), zawieszna mikrokrzemionkowa: 213 kg/m ³ (zawartość substancji stałych 50%)	(w/c) _{eq} =0,42	superplastyfikator: 2% spoiva	piasek: 1260 kg/m ³ (piasek 0,06-0,2 – 20%, piasek rzeczny 0-1 – 20%, piasek 0-2 – 60%) 1,8 = piasek/spoivo	-

Tabela 6. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica D_{max}	Zbrojenie włóknami
Zhang i inni [20]	cement portlandzki 42.5 R: 460–782g/L pył krzemionkowy: 40–68g/L nanokrzemionka: 0–1% glinka mikro-attapulgitu: 0-31g/L	w/S = 0,215–0,260	superplastyfikator: 0,8%	piasek: 1195–1455g/L piasek naturalny 0/4,75mm o mak. średnicy ziarna 4,75 mm; drobny piasek 0/1,18mm o maks. średnicy ziarna 1,18 mm; piasek 0/2,26 mm	-
Malaeb i inni [21]	cement 125 g	w/c= 0,39	superplastyfikator: 1mL opóźniacz: 0,625 mL przyśpieszacz: 1mL	kruszywo drobne: 160 g piasek: 80 g	-
Rahul i inni [23]	cement portlandzki: 585–660 kg/m ³ popiół lotny: 146–165 kg/m ³	234–264 kg/m ³	domieszki modyfikującej lepkość (ang. <i>viscosity modifying agent</i>): 0,25%S superplastyfikator na bazie eteru polikarboksylogowego (ang. <i>polycarboxylic ether-based superplasticizer</i>): 0,08%S	kruszywo z gliny ekspandowanej lekkiej (ang. <i>lightweight expanded clay aggregates</i>): 0–329 kg/m ³ piasek kwarcowy: 769–1237 kg/m ³	włókna polipropylenowe długości 12 mm i szerokości 40 μm
Wang i inni [24]	cement portlandzki 52.5 + sulfoglinian belitu (ang. <i>high belite sulphoaluminat</i>) = (0,85+0,15) = S pył krzemionkowy 0,15S proszek krzemionkowy 0,10S	0,35	glina: 1,24%S superplastyfikator: 0,45%S	piasek krzemianowy: 1.50S	-

natomiast domieszki przeciwskurczowe powodują znaczne zmniejszenie skurczu betonu.

Wymagania mieszanki betonowej do druku 3D związane z wytrzymałością na ściskanie, zginanie i rozciąganie nie różnią się szczególnie od innych rodzajów betonów konstrukcyjnych. Niemniej jednak warto zwrócić uwagę, że z powodzeniem

opracowano betony nadające się do druku z niską wytrzymałością na ściskanie do bardzo wysokich wytrzymałości (przekraczających 100 MPa). Kluczowymi elementami w procesie przygotowania betonu do druku 3D (ang. *3D printable concrete*) jest właściwy dobór składników i poprawne zaprojektowanie składu mieszanki betonowej, aby spełnić

Tabela 7. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Kruszywo	Zbrojenie włóknami
Marchment i Sanjayan [25]	cement portlandzki: 90 pył krzemionkowy: 0,10	0,28S	superplastyfikator (MasterGlenium® SKY 8379): 6,70 ml dodatek modyfikujący lepkość (MasterMatrix® 362): 8,00 ml	piasek (30/60) z średnią wielkością cząstek około 500 µm: 0,47S piasek (16/30) z średnią wielkością cząstek około 840 µm: 0,70S piasek kwarcowy z średnią wielkością cząstek około 170 µm: 0,88S	-
Moelich i inni [26]	cement CEM II 52.5 N: 579 kg/m ³ popiół lotny (DuraPozz Class F): 169 kg/m ³ pył krzemionkowy (Chryso DSF): 83 kg/m ³	261 kg/m ³ w/c=0,45	superplastyfikator (Chryso Fluid Premia 310): 1,204%S	kruszywo drobne o maksymalnym rozmiarze kruszywa 4,75 mm: 1167 kg/m ³	-
Yu i inni [27]	cement portlandzki: 0,8%S popiół lotny: 0,1%S pył krzemionkowy: 0,1%S	W/S=0,31	superplastyfikator: 0,008%S opóźniacz: 0,002%S	piasek typ I: 0,44%S piasek typ II: 0,21%S piasek typ III: 0,35%S	-
Moelich i inni [28]	cement CEM II 52.5N: 568 kg/m ³ popiół lotny: 162 kg/m ³ pył krzemionkowy: 81 kg/m ³	256+17,88 kg/m ³	superplastyfikator (SP, Chryso: Fluid Premia 310): 0,6%S superabsorbent polimerowy: 0,3%S	piasek (kruszywo drobne): 1175 kg/m ³	-

Tabela 8. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Kruszywo	Zbrojenie włóknami
Zhu i inni [29]	spoivo: cement portlandzki: 82% cement sulfoglinowy: 3%, pył krzemionkowy: 15%	w/S = 0,27-0,31	superplastyfikator: 0,1%S hydroksypropylometyloceluloza (ang. hydroxypropyl methyl cellulose): 0,06%S wiskery z węglanu wapnia: 10%S	kruszywo drobne: 80%S	włókno polietylenowe: 0,1%S
Soltan i Li [34]	Spoivo: cement portlandzki typu I 69,6% popiół lotny 22,4% cement glinianowo-wapniowy 8%	43%S	mikrokrzemionka: 10%S mielona krzemionka: 5%S hydroksypropylometyloceluloza: 0,4%S superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,8%	piasek kwarcowy F-75 45%S	włókna PVA: 2% objętościowo
	Spoivo: cement portlandzki typu I 72% popiół lotny 23% cement glinianowo-wapniowy 5%	43%S	mikrokrzemionka: 10%S mielona krzemionka: 5%S nanogлина atapulgitowa: 0,5%S hydroksypropylometyloceluloza (ang. hydroxypropyl methyl cellulose): 0,4%S superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,8%	piasek kwarcowy F-75: 45%S	włókna PVA: 2% objętościowo
Kruger i inni [35]	cement CEM II 52.5N: 579 kg/m ³ popiół lotny: 165 kg/m ³	261 kg/m ³ (w/c) _{eq} = 0,45	pył krzemionkowy: 83 kg/m ³ superplastyfikator (Chryso Fluid Premia 310): 1,48%S	kruszywo z max uziarnieniem ziaren 4,75 mm: 1167 kg/m ³	-

wymagania związane z pompownością, wyłaczalnością i możliwością wbudowania, które są decydującymi cechami materiałowymi związanymi z procesem i wymaganiami druku betonu technologii 3D. Generalnie skład mieszanek betonowych do druku 3D charakteryzuje się wysoką zawartością spoiva i stosunkowo niewielkimi rozmiarami stosowanego kruszywa. Kruszywa gruboziarniste są rzadko stosowane w betonie nadającym się do druku, ponieważ większość istniejących technologii druku 3D wymaga

stosowania dysz o niewielkich rozmiarach, które umożliwiają produkcję stosunkowo cienkich struktur.

Przedstawiony przegląd literatury z zakresu mieszanek i zapraw betonowych stosowanych w druku trójwymiarowym można traktować jako wstęp do szczegółowych badań związanych z projektowaniem nowych typów mieszanek i receptur. Problemy związane z utrzymaniem odpowiednich parametrów mieszanek w trakcie wydruku do czasu właściwego utwardzenia wymagają prowadzenia dalszych badań

Tabela 9. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Kruszywo	Zbrojenie włóknami
Zhang i inni [36]	beton o wysokiej tiksotropii do drukowania 3D: stosunek (S/C) wynosi od 0,6 do 1,5 (0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5) pył krzemionkowy: 2%C	$(w/c)_{eq}=0,35$	nanogлина: 2%C superplastyfikator polimerowy redukujący ilość wody: 0,26%C zagęszczacz (thicker agent): 0,0125%C	piasek rzeczny z max rozmiarem kruszywa 1mm	-
Rahul i inni [37]	cement 573,6–663kg/m ³ popiół lotny 164–165,7 kg/m ³ pył krzemionkowy 0–81,9 kg/m ³ nonogлина 0–247 kg/m ³	262,2-265,2 kg/m ³	superplastyfikator: 1,39–1,49 kg/m ³ domieszka modyfikująca lepkość (ang. <i>viscosity modifying agent</i>): 0–0,82 kg/m ³	proszek kwarcowy (ang. <i>quartz powder</i>): 491,7–497,2 kg/m ³ piasek typ I: 368,7–372 kg/m ³ piasek typ II: 368,7–372,9 kg/m ³	włókna poli-propylenowe 1,8 kg/m ³
Yuan i inni [38]	cement portlandzki 42.5: 89-100% cement sulfoglinowy (ang. <i>sul-phoaluminate cement</i>): 0–10% gлина (attapulgit): 0–1%	w/c=0,35	superplastyfikator (polikarboksyłanowy reduktor wody, ang. <i>polycarboxylate high-range water reducer</i>) glukonian sodu (ang. <i>sodium gluconate</i>): 0,0008 przyśpieszczacz (ang. <i>accelerating agent</i>)	piasek kwarcowy o maksymalnej średnicy ziarna 1,2 mm: 150%S	-

Tabela 10. Składy recepturowe mieszanek i zapraw stosowanych w technologii druku 3D

Pozycja literaturowa	Spoivo	Zawartość wody lub stosunek W/C lub W/S	Domieszki	Średnica Dmax	Zbrojenie włóknami
Chen i inni [39]	cement portlandzki CEM I 52.5R: 40 wt.%	30%S	proszek wapienny: 20%S kalcynowana gлина: 40%S (nisko- i wysokogatunkowa kalcynowana gлина w proporcji 3:1) superplastyfikatora na bazie eteru polikarboksyłowego: 2%S domieszki modyfikującej lepkość na bazie hydroksypropylometylcelulozy (ang. <i>hydroxypropyl methyl cellulose</i>): 0,0024%S	piasek kwarcowy o maksymalnej średnicy ziarna 2 mm: 150%S	-
Ma i inni [40]	spoivo: cement: 0,7 popiół lotny: 0,20 pył krzemionkowy: 0,10	0.27S	materiał odpadowy: 0,48S superplastyfikator: 0,0029S	piasek 0,72S	włókna poli-propylenowe: 1,2 kg/m ³

z uwagi na specyfikę i charakter druku trójwymiarowego elementów lub całych przestrzennych konstrukcji.

Podziękowania

Praca powstała w wyniku prac B+R firmy 3dArtech Sp. z o.o, 25-639 Kielce ul. Malików 150D w ramach projektu: **Opracowanie i wdrożenie innowacyjnej technologii szalunków wbudowanych, tworzonych metodą druku 3D do realizacji ścian konstrukcyjnych i działowych budowli architektonicznych, kompatybilnej z istniejącymi systemami szalowania i możliwością dekoracyjnego wykończenia powierzchni o numerze PO-IR.01.01.01-00-1865/20-00 z dnia 31.05.2021 roku, finansowanego ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, Działanie 1.1 Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie 1.1.1 Badania przemysłowe**

i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa. Fotografie zamieszczone w artykule przedstawiają wydruki 3D prefabrykatów wykonane przez firmę 3dArtech Sp. z o.o.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ambroziak A, Ziolkowski P, Concrete compressive strength under changing environmental conditions during placement processes, *Materials* (Basel) 13, 2020, <https://doi.org/10.3390/ma13204577>
- [2] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials* 24, 2010, str. 1664–1671, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025>
- [3] Libre N. A., Shekarchi M., Mahoutian M., Soroushian P., Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice, *Construction and Building Materials* 25, 2011, str. 2458–2464, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058>
- [4] Lim S., Buswell R. A., Le T. T., Austin S. A., Gibb A. G. F., Thorpe T., Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Auto-*

- mation in Construction, 21, 2012, str. 262–26, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- [5] Le T. T., Austin S. A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T., Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures* 45, 2012, str. 1221–1232, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [6] Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morel P., Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders, *Materials and Design* 100, 2016, str. 102–109, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- [7] Nerella V. N., Krause M., Näther M., Mechtcherine V., Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology technology (CONPrint3D). Rheol. Messungen an Baustoffen, Regensburg, Germany, 2016, str. 236–246
- [8] Panda B., Chandra Paul S., Jen Tan M., Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, *Materials Letters* 209, 2017, str. 146–149, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- [9] Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B., Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials* 145, 2017, str. 639–647, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- [10] Hambach M., Volkmer D., Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, *Cement and Concrete Composites* 79, 2017, str. 62–70, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>
- [11] Ponikiewski T., Wrzecion K., Augustyn J., Projektowanie betonów w technologii druku 3D, modyfikowanych wybranymi domieszkami chemicznymi, *Dni Betonu* 2018, Wisła, str. 385–400
- [12] Paul S. C., Tay Y. W. D., Panda B., Tan M. J., Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18, 2018, str. 311–319, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- [13] Pacewicz K., Sobotka A., Gołek L., Characteristic of materials for the 3D printed building constructions by additive printing, *MATEC Web of Conferences* 222, 2018, str. 01013, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822201013>
- [14] Marchment T., Sanjayan J., Xia M., Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification, *Materials and Design* 169, 2019, str. 107684, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107684>
- [15] Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink, *Construction and Building Materials* 174, 2018, str. 263–271, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>
- [16] Panda B., Tan M. J., Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing, *Ceram Int* 44, 2018, str. 10258–10265, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>
- [17] Kruger J., Zeranka S., van Zijl G., An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete, *Construction and Building Materials* 224, 2019, str. 372–38, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>
- [18] Mechtcherine V., Nerella V.N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M., Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Automation in Construction* 107, 2019, str. 102933, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- [19] Nerella V. N., Hempel S., Mechtcherine V., Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing, *Construction and Building Materials* 205, 2019, str. 586–601, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
- [20] Zhang C., Hou Z., Chen C., Zhang Y., Mechtcherine V., Sun Z., Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content, *Cement and Concrete Composites* 104, 2019, str. 103406, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103406>
- [21] Malaeb Z., AlSakka F., Hamzeh F., 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning and Mix Comparison Between Different Machine Setups, *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier; 2019, str. 115–136, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3>
- [22] Xu J., Ding L., Cai L., Zhang L., Luo H., Qin W., Volume-forming 3D concrete printing using a variable-size square nozzle, *Automation in Construction* 104, 2019, str. 95–106, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.008>
- [23] Rahul A. V., Santhanam M., Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates, *Cement and Concrete Composites* 109, 2020, str. 103570, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103570>
- [24] Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M., Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies, *Cement and Concrete Composites* 110, 2020, str. 103571, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103571>
- [25] Marchment T., Sanjayan J., Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing, *Automation in Construction* 109, 2020, str. 102992, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102992>
- [26] Moelich G. M., Kruger J., Combrinck R., Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete, *Composites Part B Engineering* 200, 2020, str. 108313, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108313>
- [27] Yu S., Xia M., Sanjayan J., Yang L., Xiao J., Du H., Microstructural characterization of 3D printed concrete, *Journal of Building Engineering* 2021;44:102948, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102948>
- [28] Moelich G. M., Kruger J., Combrinck R., Modelling the interlayer bond strength of 3D printed concrete with surface moisture, *Cement and Concrete Research* 150, 2021, str. 106559, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106559>
- [29] Zhu B., Nematollahi B., Pan J., Zhang Y., Zhou Z., Zhang Y., 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction, *Cement and Concrete Composites* 121, 2021, str. 104039, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104039>
- [30] Federowicz K., Techman M., Skibicki S., Chougan M., El-Khayatt A. M., Saudi H. A., et al., Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHWC) containing magnetite aggregate, *Materials and Design* 233, 2023, str. 112246, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112246>
- [31] Dvorkin L., Marchuk V., Mróz K., Maroszek M., Hager I., Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies, *Applied Sciences* 14, 2024, str. 3038, <https://doi.org/10.3390/app14073038>
- [32] Dodziuk H., *Perspektywy rozwoju druku 3D, Napędy i Sterowanie* 22, 2020, str. 38–44
- [33] Jaworska N., Podsiadło H., *Technologia druku 3D jako szansa dla środowiska naturalnego*, *Acta Poligraphica* 14, 1991, str. 55–70
- [34] Soltan D. G., Li V. C., A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing, *Cement and Concrete Composites* 90, 2018, str. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>
- [35] Kruger J., Zeranka S., van Zijl G., 3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification, *Automation in Construction* 106, 2019, str. 102904, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102904>
- [36] Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y., Rheological and hardened properties of the high-thixotropy 3D printing concrete, *Construction Building Materials* 201, 2019, str. 278–85, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>
- [37] Rahul A. V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z., 3D printable concrete: Mixture design and test methods, *Cement and Concrete Composites* 97, 2019, str. 13–23, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>
- [38] Yuan Q., Li Z., Zhou D., Huang T., Huang H., Jiao D., et al., A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar, *Construction Building Materials* 227, 2019, str. 116600, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.326>
- [39] Chen Y., Jansen K., Zhang H., Romero Rodriguez C., Gan Y., Çopuroğlu O., et al., Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study, *Construction Building Materials* 262, 2020, str. 120094, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120094>
- [40] Ma G., Li Y., Wang L., Zhang J., Li Z., Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers, *Construction Building Materials* 241, 2020, str. 117982, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117982>