

Dr inż. Szymon Skibicki¹

Dr hab. inż. Adam Zieliński, prof. ZUT¹

Richard Dvořák, Ph.D.²

doc. Libor Topolář, Ph.D.²

Prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska¹

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

² Uniwersytet Technologiczny w Brnie, Czechy

Wpływ makrowłókien poliolefinowych i topologii wydruku na podstawowe parametry mechaniczne kompozytów na spoiwie cementowym w technologii druku 3D

Impact of Polyolefin Fibers and Print Topologies on the Basic Mechanical Properties of Cement-Based Composites in 3D Printing Technology

Streszczenie

W artykule skupiono się na dwóch zagadnieniach związanych z technologią wytwarzania kompozytów cementowych metodą przyrostową. Oceniono wpływ krótkich makrowłókien poliolefinowych o długości 24 mm oraz topologii wydruku na wybrane parametry kompozytu na spoiwie cementowym przeznaczonym do druku 3D. W ramach badań wykonano próbki o wysokości od jednej do dwóch warstw, w dwóch topologiach: liniowej (wielowarstwowe próbki drukowane warstwa po warstwie) oraz z przesunięciem warstw (próbki drukowane w taki sposób, że następowało przesunięcie połączenia kolejnych warstw na ich szerokości). W obu przypadkach zastosowano mieszankę referencyjną oraz mieszankę zawierającą włókna poliolefinowe. W artykule przeanalizowano wytrzymałość na ściskanie niestwardniałego kompozytu (tzw. green strength), skurcz liniowych próbek drukowanych, wytrzymałość na zginanie i ściskanie stwardniałych próbek drukowanych w różnych topologiach. Badania potwierdziły, że istnieje wpływ topologii wydruku na parametry mechaniczne betonu drukowanego. Ponadto wykazano, że struktura próbki z przesunięciem warstw mimo bardziej złożonej topologii nie wykazuje istotnych różnic wytrzymałościowych względem próbek o topologii liniowej. Ponadto stwierdzono, że dodatek krótkich włókien poliolefinowych ogranicza skurcz kompozytu cementowego w teście deformacji warstwy liniowej. Udział włókien

zwiększył wytrzymałość na zginanie stwardniałego kompozytu maksymalnie o około 17%, uzyskano również statystycznie istotną poprawę wytrzymałości niestwardniałego kompozytu zawierającego zastosowane włókna. Podsumowując w artykule przedstawiono badania wstępne dotyczące zastosowania włókien poliolefinowych w technologii druku 3D kompozytów cementowych. Ponadto łącznie z zastosowaniem włókien przeanalizowano ich skuteczność w zależności od przyjętej topologii wydruku.

Abstract

The article focuses on two issues related to the incremental production of cement composites: the impact of short polyolefin macrofibers (24 mm in length) and the influence of print topology on selected properties of cement-based composites designed for 3D printing. As part of the study, samples with a height of one or two layers were produced in two topologies: (i) linear (multilayer samples printed layer by layer), and (ii) shifted (samples printed so that the joints between subsequent layers were offset along their width). In both cases, a reference mixture and a mixture containing polyolefin fibers were tested. The article examines compressive strength of the fresh composite (so-called green strength), shrinkage of linear printed samples, as well as flexural and compressive strength of hardened samples in different topologies. The results confirmed that print topology affects the mechanical properties of printed concrete. Moreover, it was shown that samples with shifted layers, despite their more complex geometry, do not exhibit significant strength differences compared to samples with linear topology. In addition, the incorporation of short polyolefin fibers reduced shrinkage in linear layers. The fiber-reinforced mixtures showed an increase in flexural strength of the hardened composite (up to approximately 17%) and a statistically significant improvement in the green strength. In summary, the article presents preliminary research on the use of polyolefin fibers in 3D printing of cement composites and highlights the relationship between fiber effectiveness and the adopted print topology.

1. Wprowadzenie

Współczesne budownictwo dynamicznie rozwija się w kierunku stosowania innowacyjnych materiałów i technologii, które coraz częściej wpisują się w koncepcję zrównoważonego rozwoju [1,2]. W ostatnich latach istotną rolę w tym procesie odgrywają rozwiązania oparte na modelowaniu predykcyjnym [3] oraz technologiach przyrostowych, w tym druku 3D z betonu [4]. Szczególnie ta ostatnia technika znajduje coraz szersze zastosowanie, ponieważ oferuje możliwość usprawnienia procesu budowlanego w wielu aspektach – od ograniczenia zużycia materiałów, przez skrócenie czasu realizacji, aż po swobodę kształtowania geometrii elementów. Jednocześnie kluczowym zagadnieniem pozostaje ocena właściwości stwardniałych kompozytów przeznaczonych do tego rodzaju druku, co stanowi wyzwanie badawcze i inżynierskie.

Analiza mechanicznych właściwości betonów drukowanych jest złożona ze względu na specyfikę procesu technologicznego. Istotnym utrudnieniem jest anizotropia materiału [5–7], czyli zależność właściwości od kierunku obciążenia, a

także silny wpływ czynników technologicznych i materiałowych, takich jak skład mieszanki, liczba nakładanych warstw, czas odstępu między ich ułożeniem czy rodzaj stosowanych dodatków i domieszek. Literatura przedmiotu dostarcza licznych przykładów badań, które pokazują, że uzyskiwane wyniki mogą znacząco się różnić, a w wielu przypadkach rozbieżności są na tyle duże, że utrudniają jednoznaczną interpretację.

Jednym z istotnych czynników wpływających na właściwości stwardniałego kompozytu jest liczba warstw nakładanych podczas procesu drukowania. Badania Shakora i in. [8] wykazały, że w przypadku zapraw cementowo-piaskowych, zarówno bez włókien, jak i z włóknami szklanymi, wytrzymałość na ściskanie malała wraz ze wzrostem liczby warstw, choć różnice nie były statystycznie istotne. Podobne obserwacje poczynili Skibicki i in. [9], którzy, stosując wysokowartościową zaprawę z dodatkami mineralnymi, zaobserwowali spadek wytrzymałości na ściskanie od 75,42 MPa przy sześciu warstwach do 60,18 MPa przy dwudziestu warstwach, podczas gdy próbka normowa osiągnęła 85,72 MPa. Wskazuje to, że liczba warstw ma potencjalnie istotny wpływ na właściwości mechaniczne, choć jego zakres może zależeć od jakości i składu mieszanki.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest wpływ kierunku obciążenia na wytrzymałość próbek. Badania Le i in. [10] pokazały, że różnice w wytrzymałości na ściskanie w zależności od kierunku obciążenia były stosunkowo niewielkie, natomiast w przypadku badań wytrzymałości na zginanie kierunek ten odgrywał znaczącą rolę – próbki obciążane w kierunku podłużnym były nawet o połowę słabsze od próbek normowych. Z kolei wyniki Liu i in. [11] wskazały na zróżnicowanie wytrzymałości w zależności od orientacji próbki, przy czym najwyższe wartości uzyskano w kierunku podłużnym. Badania Wolfs i in. [12] oraz Rahul i in. [13] potwierdziły, że w wielu przypadkach różnice w wytrzymałości na zginanie są bardziej wyraźne niż w przypadku wytrzymałości na ściskanie, a próbki drukowane często osiągają niższe parametry niż próbki wykonywane metodami tradycyjnymi. Jednocześnie literatura podaje przykłady, gdzie w określonych warunkach próbki drukowane mogą przewyższać właściwości normowe [14].

Na szczególną uwagę zasługuje również zagadnienie adhezji międzywarstwowej. Jakość połączenia pomiędzy kolejnymi warstwami wprost wpływa na parametry mechaniczne elementów drukowanych, a czynnikiem kluczowym jest tutaj czas odstępu pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw [15]. Niedostateczna przyczepność może prowadzić do powstawania osłabionych stref, które stają się potencjalnymi miejscami inicjacji zarysowań i pęknięć. Problem ten nabiera znaczenia zwłaszcza w przypadku elementów poddawanych obciążeniom zginającym, gdzie lokalizacja strefy pękania nie została dotychczas dostatecznie dobrze rozpoznana.

Podsumowując, dotychczasowe badania dowodzą, że parametry mechaniczne kompozytów cementowych wytwarzanych techniką druku 3D zależą od czynników technologicznych i materiałowych, przy czym szczególnie istotne okazują się: liczba warstw, kierunek obciążenia oraz jakość adhezji międzywarstwowej. Jednocześnie literatura wskazuje na dużą zmienność wyników – w niektórych przypadkach próbki drukowane osiągają wytrzymałość porównywalną lub wyższą od próbek normowych, w innych zaś nawet o kilkadziesiąt procent niższą. Brak spójności wyników uzasadnia konieczność prowadzenia dalszych badań, które pozwolą lepiej zrozumieć mechanizmy odpowiedzialne za zachowanie kompozytów cementowych wytwarzanych metodą przyrostową.

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu strategii wydruku oraz zastosowania krótkich włókien poliolefinowych na podstawowe parametry mechaniczne kompozytu cementowego. Badania przeprowadzone w ramach artykułu potwierdzają, że sposób realizacji procesu drukowania może istotnie wpływać na właściwości stwardniałego kompozytu. Jednocześnie wykazano, że włókna poliolefinowe, choć nie oddziałują w sposób istotny na parametry mechaniczne w stanie stwardniałym, mają znaczenie w przypadku właściwości materiału świeżego, wpływając m.in. na skurcz oraz proces układania warstwowego.

2. Materiały oraz procedura badawcza

2.1 Skład mieszanki użytej do badań

Na podstawie wcześniejszych badań do druku 3D zastosowano mieszankę B800 [6]. Mieszanka ta charakteryzuje się stałym współczynnikiem wodno-cementowym równym 0.3. Sumaryczna ilość spoiwa w mieszance jest równa 800 kg /m³, w tym 70% cementu CEM I 52,5R, 20% popiołu lotnego oraz 10 % pyłu krzemionkowego. Przebadano dwa podstawowe typy mieszanek: mieszanka z włóknami ASTRA polyexmesh o długości 24 mm (oznaczana jako „F”) oraz mieszanka bez włókien (oznaczona jako „O”). Zastosowano kruszywo naturalne w postaci piasku do 2 mm. Skład chemiczny zastosowanego cementu, popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego przedstawiono w Tabl. 1.

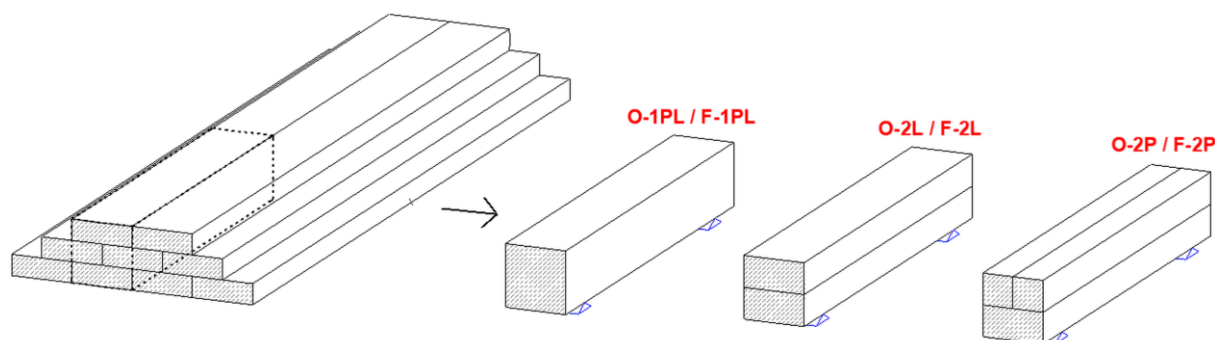
Tabl. 1. Skład chemiczny zastosowanego cementu, popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego

Skład chemiczny,%	CEM I 52.5 R	Popiół lotny krzemionkowy	Pył krzemionkowy
SiO ₂	19.70	54.00	94.00
Al ₂ O ₃	4.93	28.40	–
Fe ₂ O ₃	2.54	7.30	–
CaO	64.23	3.10	0.30
CaCO ₃	–	–	–
MgO	1.32	2.40	–
SO ₃	2.91	0.40	1.90
Na ₂ O	0.12	1.10	–
K ₂ O	0.76	2.90	–
	0.07	0.01	0.10
H ₂ O	–	–	0.70
Na ₂ Oeq	0.63	–	–
LOI	–	–	3.00

2.2 Metodologia badawcza – proces druku 3D oraz typy próbek

Wykonano próbki metodą druku 3D poprzez wytłaczanie. Do druku wykorzystano robota kartezjańskiego posiadającego 3 stopnie swobody zespolonego z pompą do betonu wyposażoną w specjalną głowicę drukującą. Proces wydruku i jego strategia były zaprojektowane przez autorów niniejszej pracy a następnie napisane za pomocą tzw. G-Code (urządzenie drukujące jest sterowane bezpośrednio za pomocą G-codu).

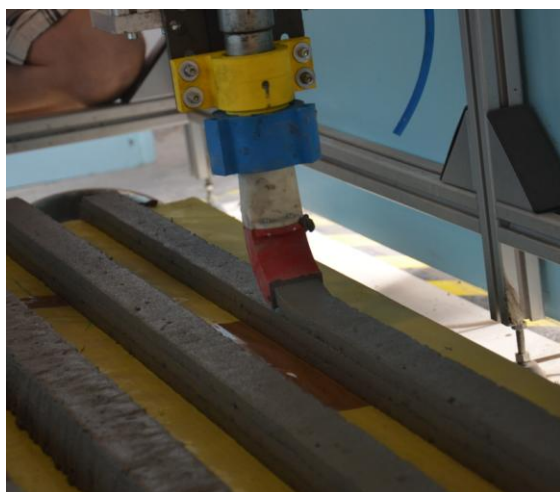
W ramach prac badawczych wykonano dwie główne topologie wydruku: próbki liniowe (L), próbki z przesuniętą warstwą (P). W przypadku próbek liniowych dokonano wielowarstwowego wydruku warstwa po warstwie – Rys. 1 W przypadku próbek z przesuniętą warstwą (P), druk został zaprojektowany tak by stworzyć przewiązanie między warstwami (próbki O-2P, F-2P – Rys. 1). Zestawienie wykonanych próbek przedstawiono w Tabl. 2. Próbkę podczas wydruku pokazano na Rys. 2.



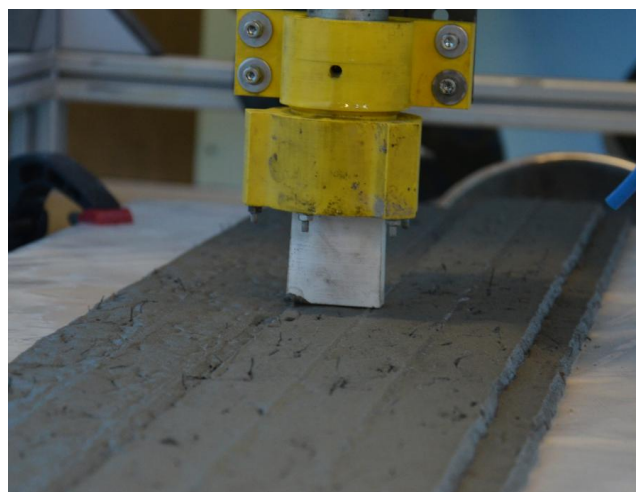
Rys. 1. Topologia próbek wykonanych w ramach prac przedstawionych w pracy.

Tabl. 2. Zestawienie wykonanych próbek do badań

Nazwa próbki	Opis	Czy mieszanka zawierała włókna ASTRA polyexmesh o długości 24 mm
REF	Próbki referencyjne formowane normowo	NIE
FIB		TAK
O-1PL	Próbki drukowane liniowe	NIE
F-1PL		TAK
O-2L	Próbki drukowane liniowe	NIE
F-2L		TAK
O-2P	Próbki drukowane o strukturze uwzględniającej przesunięciem warstw względem siebie – por. Rys. 1	NIE
F-2P		TAK



a)



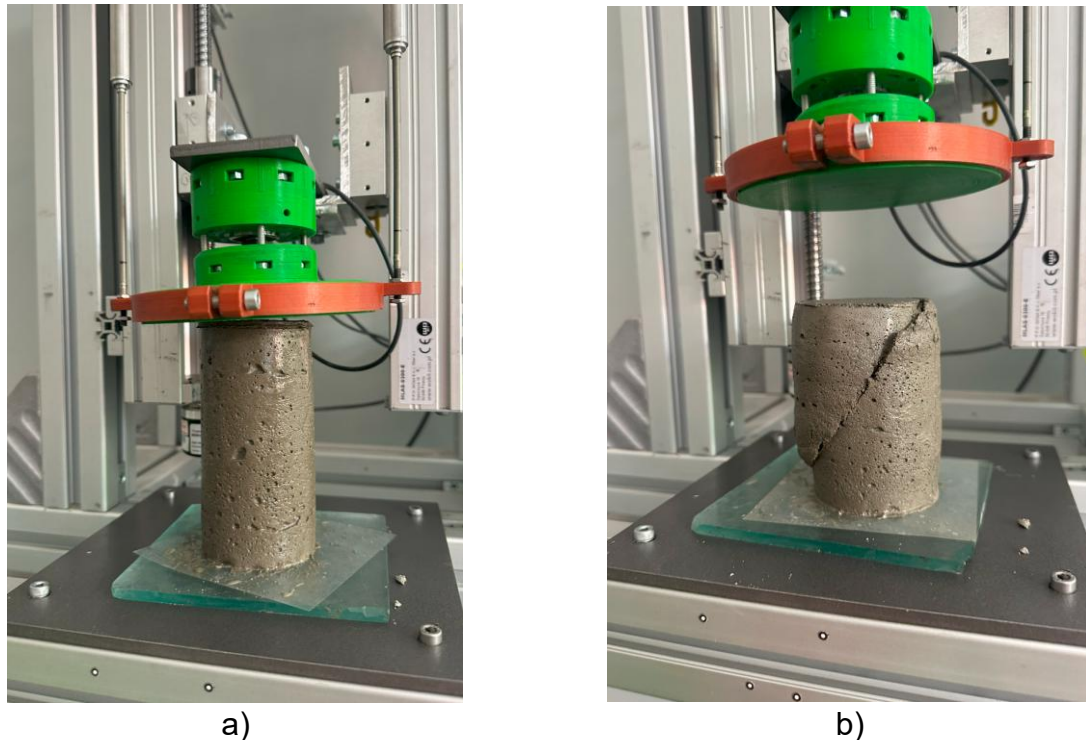
b)

Rys. 2. Wydruk próbek do badań: a) próbki liniowe; b) próbki z przesunięciem warstwa i włóknami.

2.3 Metodologia badawcza – zakres badań

2.3.1 Badania wytrzymałości niestwardniałej mieszanki betonowej – green strength i green Young Modulus

Wykonania badania wytrzymałości na ściskanie niestwardniałej mieszanki betonowej na próbkach walcowych o średnicy 60 mm i wysokości 120 mm. W tym celu wykonano badania na ściskania z możliwością rozszerzalności bocznej (ang. UUCT - uniaxial unconfined compressive test), opis podobnych badań znajduje się też w polskiej literaturze (np. w celu charakterystyki gruntu – por. [16]). Badania tego typu są powszechnie stosowane do oceny wytrzymałości świeżej mieszanki betonowej stosowanej do druku 3D kompozytów cementowych (por. [17,18]). W niniejszej pracy badawczej wykonano badania po czasie 30 i 60 minut od dolania wody do suchych składników. Badanie było prowadzone na autorskim stanowisku pomiarowym wykonanych w ramach projektu [19]. Badania wykonano przy przesuwie tłoka o wartości 15 mm / minutę i kontroli przemieszczeń za pomocą czujników LVDT, szczegółowy opis stanowiska znajduje się w pracach [17,19]. Wyniki badań przedstawiono w punkcie 3 opracowania. Przykłady próbek przed badaniem i po badaniu pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Badanie green strength i green Young Modulus: a) próbka przed badaniem; b) próbka pobadaniu.

2.3.2 Badanie skurczu liniowego elementów drukowanych

Badania wczesnych odkształceń skurczowych przeprowadzono metodą dylatometryczną, wykorzystując próbki liniowe w dwóch wariantach: 1) próbki uformowane poprzez wytłaczanie pojedynczych warstw materiału z maszyny przyrostowej, bez dodatkowych zabiegów zagęszczania, 2) próbki zaformowane w półokrągłych korytkach liniowych i zagęszczone z wykorzystaniem stolika wibracyjnego, Rys. 4. Geometria próbek w obu wariantach była zbliżona: wysokość 20 ± 5 mm, szerokość 40 ± 5 mm. Różnice dotyczyły długości oraz powierzchni wysychania – w wariantcie 1 próbka miała długość 135 cm i wysychała zarówno z powierzchni górnej, jak i bocznych, natomiast w wariantcie 2 długość próbki wynosiła 100 cm, a wysychanie następowało wyłącznie z powierzchni górnej. Stosunek objętości do powierzchni wysychania wynosił odpowiednio $V/S = 1,0$ dla wariantu 1 oraz $V/S = 1,57$ dla wariantu 2. Każdą serię badań wykonywano na trzech próbkach. W obu wariantach próbki formowano na dwóch warstwach folii, aby wyeliminować możliwość ograniczenia odkształceń wynikających z tarcia. Deformacje skurczowe rejestrowano na podstawie przemieszczeń końców próbek, mierzonych czujnikami laserowymi o rozdzielczości $2 \mu\text{m}$ [20]. Długość próbek umożliwiała rejestrację odkształceń z dokładnością $3 \mu\text{m/m}$. Pomiar odbywał się automatycznie co 5 minut przez okres 3 dni. Szczegółowe procedury formowania próbek w wariantcie 1 i 2 zostały opisane odpowiednio w publikacjach [21] i [22]. Celem badań było porównanie wpływu stosunku V/S oraz sposobu formowania próbek na rozwój wczesnych odkształceń skurczowych.



a)



b)

Rys. 4. Stanowiska badawcze do badania skurczu druku 3D: a) wariant 1 - próbki uformowane poprzez wytłaczanie pojedynczych warstw materiału z maszyny przyrostowej, bez dodatkowych zabiegów zagęszczania; b) wariant 2 - próbki zaformowane w półokrągłych korytkach liniowych i zagęszczone z wykorzystaniem stolika wibracyjnego.

2.3.3 Badanie parametrów mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na zginanie) stwardniałego kompozytu wykonanego w technologii druku 3D.

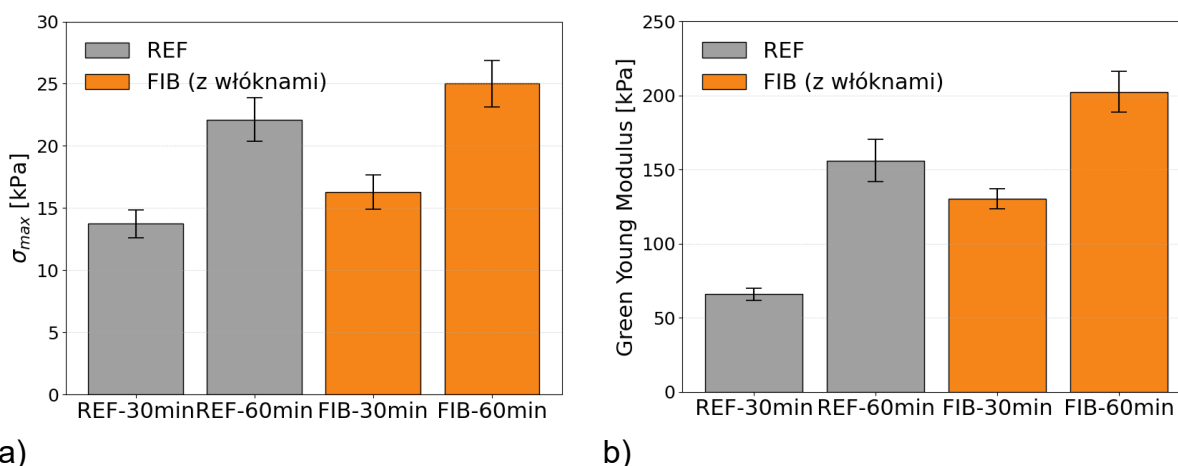
Wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na zginanie określono po 28 dniach dojrzewania, zarówno dla próbek normowych o wymiarach 40 × 40 × 160 mm, jak i próbek wykonanych techniką druku 3D. Badania wykonano w analogii do normy [23]. W przypadku elementów drukowanych badania prowadzono w dwóch układach obciążenia: w kierunku pionowym („v”), gdzie siła działała prostopadłe do warstw i kierunku druku od góry próbki, oraz w kierunku poziomym („h”), gdzie obciążenie przykładano od boku, równoległe do warstw. Próbki drukowane liniowe przygotowano w taki sposób, aby ich wymiary były jak najbardziej zbliżone do wymiarów normowych beleczek 40 × 40 × 160 mm. Dodatkowo wykonano także próbki w formie wyciętych elementów o przesuniętych warstwach (O-2P, F-2P), wyciętych bezpośrednio z większego bloku betonu drukowanego. Rozkład kierunków badania próbek można znaleźć w publikacji [6].

Dla każdego rodzaju próbek wytrzymałość na zginanie wyznaczano na podstawie trzech pomiarów, natomiast wytrzymałość na ściskanie określano na podstawie sześciu wyników. W celu oceny zmienności uzyskanych rezultatów obliczono współczynnik zmienności (CoV) dla każdej serii badań.

3. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań niestwardniałej mieszanki betonowej („green strength”) wykonano dla dwóch mieszanek bazowych REF oraz FIB. Wyniki przedstawiono na Rys. 5. Badania te wykazały, że dodatek włókien ASTRA polyemesh (FIB) zwiększa wartości naprężeń maksymalnych $\sigma_{\max}$ w porównaniu do mieszanki referencyjnej (REF) zarówno po 30 min (wynik dla FIB jest wyższy o 18,3%) jak i po 60 minutach (wzrost o 13%). Należy zauważyć, że skuteczność włókien jest większa po czasie 30 minut. Ponadto należy zauważyć, że włókna w sposób statystycznie istotny przyczyniły się

do wzrostu sztywności niestwardniałej mieszanki betonowej (Rys. 5 b). Po 30 minutach próbka z dodatkiem włókien (FIB) miała sztywność określoną modułem Younga („Green Young Modulus”) o 98% większą niż mieszanka bez włókien, po 60 minutach różnica ta równa była około 30%. Potwierdza to fakt skuteczności zastosowanie włókien ASTRA polyemesh to zwiększenia nośności i sztywności mieszanki betonowej wykonanej w technologii druku 3D szczególnie w wczesnym jej okresie dojrzewania.

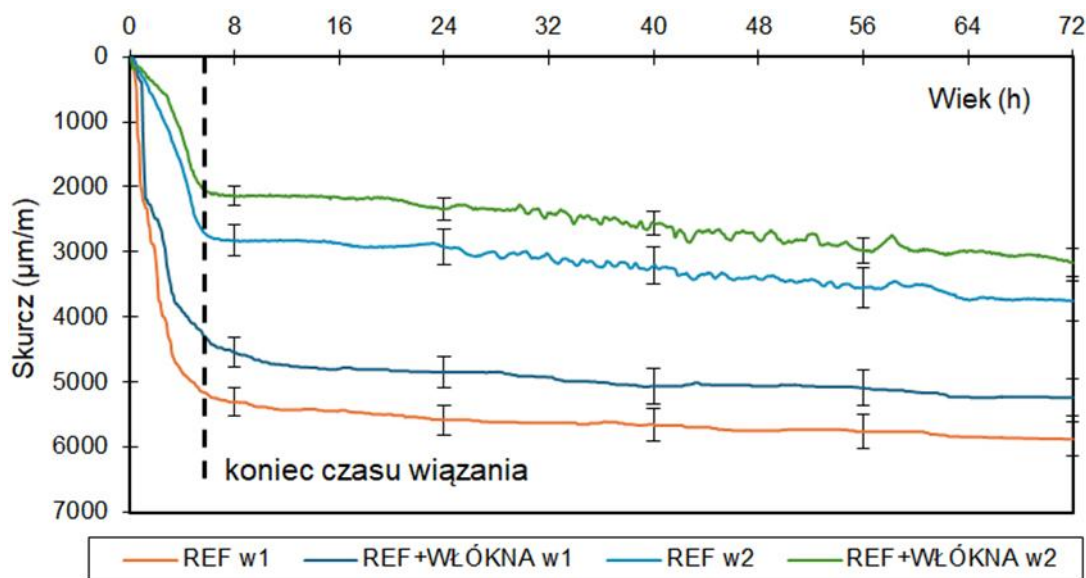


a) b)
Rys. 4. Wyniki wytrzymałości (a) oraz modułu Younga (b) niestwardniałej mieszanki betonowej

Wyniki badań wczesnych odkształceń skurczowych przedstawiono na Rys. 6. Na wykresie zaznaczono przerywaną linią moment końca czasu wiązania, określony zgodnie z normą ASTM C403. Największy przyrost skurczu plastycznego zaobserwowano dla próbek liniowych w wariancie 1. W tym przypadku zastosowanie włókien poliolefinowych ograniczyło odkształcenia o ok. 18%. Podobną tendencję odnotowano w wariancie 2, gdzie dodatek włókien zmniejszył skurcz plastyczny o ok. 24%. Stosunek skurczu plastycznego między wariantami wynosi ok. 49% dla kompozytu bez włókien i 52% dla kompozytu z włóknami. Dwukrotnie większe odkształcenia plastyczne w wariancie 1 wynikają z niższego stosunku V/S oraz większej powierzchni wysychania, związanej z bardziej porowatą teksturą górnej powierzchni próbki, powstałą w wyniku braku zagęszczenia podczas wytłaczania. Dodatkowo można zauważyć, że dynamiczny rozwój skurczu plastycznego występuje później w wariancie 2. Wynika to z faktu, że zagęszczanie prowadzi do uzyskania płaskiej powierzchni, a w następstwie osiadania składników pojawia się krótkotrwałe zjawisko bleedingu. Zjawisko to zabezpiecza górną powierzchnię przed wysychaniem i opóźnia rozwój skurczu plastycznego, co nie występuje w próbkach wytłaczanych.

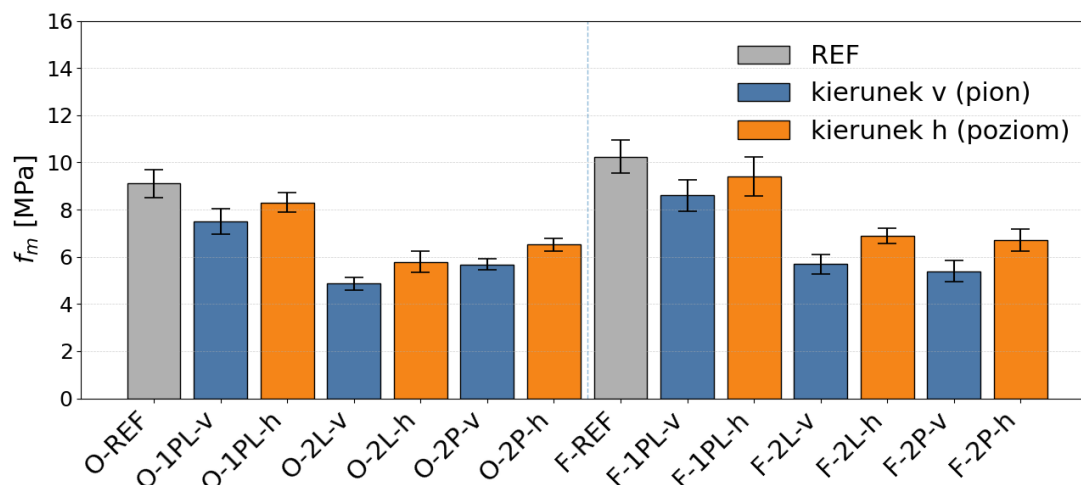
Moment końca czasu wiązania odpowiada punktowi przegięcia krzywej odkształceń, charakterystycznemu dla zmniejszenia dynamiki ich rozwoju. W fazie wczesnego twardnienia utrzymują się ogólne trendy obserwowane w stanie plastycznym, z tą różnicą, że próbki w wariancie 1 kurczą się mniej niż próbki w wariancie 2. Różnica ta zmniejsza się z 49 do 36% dla kompozytu bez włókien oraz z 52 do 40% dla kompozytu z włóknami. Większa stabilizacja rozwoju odkształceń wiąże się z ograniczoną utratą wody w próbkach, które intensywniej wysychały w fazie

plastycznej. Charakterystyczne fluktuacje odkształceń skurczowych obserwowane w próbkach wariantu 1 od ok 24 h są związane z rozwojem zjawiska curlingu, czyli podnoszenia się swobodnych końców próbek w wyniku ekspozycji wyłącznie powierzchni górnej oraz nierównomiernego wysychania materiału. Po 3 dniach wartość ugięcia wywołanego curlingiem w obu wariantach nie przekraczała 1 mm.



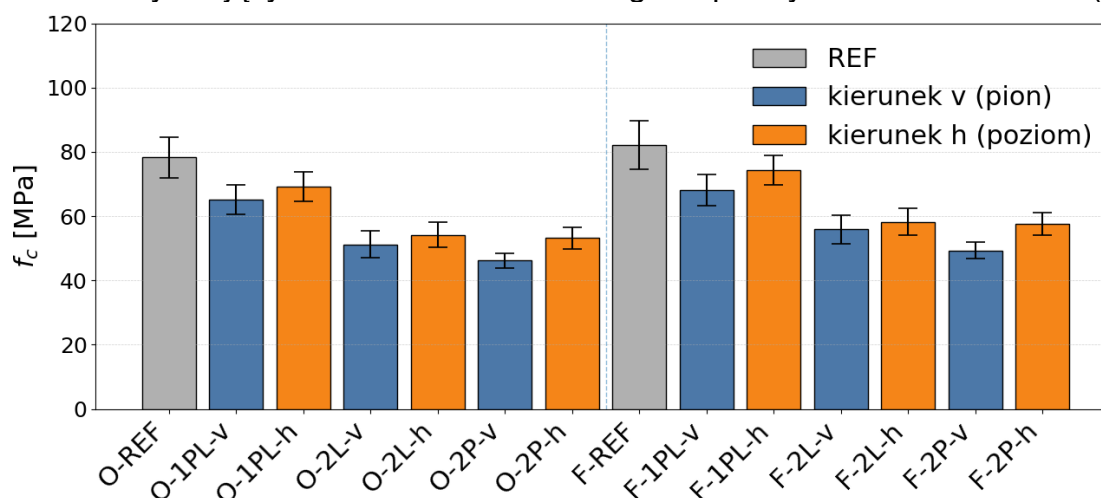
Rys. 6. Rozwój odkształceń skurczowych kompozytów cementowych z i bez włókien poliolefinowych w dwóch wariantach rejestracji wczesnych odkształceń.

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie próbek normowych oraz wykonanych w technologii druku 3D kompozytów cementowych. Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie uzyskano dla próbek referencyjnych: 9,10 MPa dla betonu zwykłego i 10,24 MPa dla betonu z dodatkiem włókien. W próbkach liniowych (O-1PL, F-1PL) wytrzymałość w kierunku poziomym (h) była większa niż w pionowym (v). Różnice wyniosły 10,7% dla betonu bez włókien (7,50 vs. 8,30 MPa) oraz 9,5% dla betonu z włóknami (8,60 vs. 9,42 MPa). W próbkach warstwowych (O-2L, F-2L) również odnotowano wyższe wartości w kierunku h. Różnice wyniosły 19,1% dla betonu zwykłego (4,86 vs. 5,79 MPa) oraz 20,9% dla betonu z włóknami (5,69 vs. 6,88 MPa). W próbkach typu „P” z przesunięciem warstw (O-2P, F-2P) kierunek h dawał lepsze rezultaty. Różnice wyniosły 14,6% dla betonu bez włókien (5,68 vs. 6,51 MPa) i 24,5% dla betonu z włóknami (5,39 vs. 6,71 MPa). Kompozyt cementowy zbrojony włóknami we wszystkich przypadkach charakteryzował się wyższą wytrzymałością na zginanie niż kompozyt bez włókien, jednak zwiększenie nośności było w granicach do 17%.



Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie próbek normowych i drukowanych

Na Rys. 8 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie próbek normowych i drukowanych. Na podstawie uzyskanych wyników najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie stwierdzono dla próbek referencyjnych przygotowanych tradycyjnie: 78,22 MPa dla betonu zwykłego oraz 82,15 MPa dla betonu z dodatkiem włókien. W próbkach liniowych (O-1PL, F-1PL) widoczna jest wyraźna zależność kierunkowa – w kierunku poziomym (h) wytrzymałość była większa niż w pionowym (v). Różnice wyniosły 6,1% dla betonu bez włókien (65,15 vs. 69,15 MPa) oraz 9,1% dla betonu z włóknami (68,19 vs. 74,37 MPa). W próbkach warstwowych (O-2L, F-2L) również odnotowano wyższe wartości w kierunku poziomym. Różnice wyniosły odpowiednio 5,9% dla betonu zwykłego (51,15 vs. 54,15 MPa) oraz 4,2% dla betonu z włóknami (55,85 vs. 58,18 MPa). W próbkach z przesunięciem warstw typu „P” (O-2P, F-2P) utrzymała się ta sama tendencja. Wytrzymałość w kierunku poziomym przewyższała pionową o 15,1% w betonie bez włókien (46,16 vs. 53,15 MPa) oraz 16,9% w betonie z włóknami (49,32 vs. 57,65 MPa). We wszystkich przypadkach materiał z dodatkiem włókien charakteryzował się większą wytrzymałością na ściskanie niż materiał bez włókien. Należy jednak zaznaczyć, że wzrost wytrzymałości mieści się w granicach wartości wynikających z rozrzutu oznaczonego współczynnikiem zmienności (CoV).



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie próbek normowych i drukowanych

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wyprowadzono następujące wnioski:

- a) Włókna poliolefinowe (ASTRA polymesh) o długości 24 mm wpływają na podniesienie wytrzymałości $\sigma_{\max}$ (green strength) i sztywności (green Young Modulus) niestwardniałej mieszanki na spoiwie cementowym. Wyniki badań wykazały, że dodatek włókien zwiększę $\sigma_{\max}$ od 13 do 18%, natomiast Moduł Younga niestwardniałej mieszanki betonowej został zwiększony nawet o 100%.
- b) Wprowadzenie w topologii wydruku przesunięcia międzywarstwowego wpłynęło na wytrzymałość na ściskanie, zmniejszając ją o około 8%. Należy jednak zwrócić uwagę w przypadku wytrzymałości na zginanie występują próbki w których ten parametr uzyskał wzrost wytrzymałości w stosunku do próbek drukowanych bez przesunięcia warstw oraz próbki gdzie nastąpiło zmniejszenie wytrzymałości. W nawiązaniu do uzyskanych współczynników zmienności (do około 9%) należy zwrócić uwagę, że nie istnieje silny związek między zmianą parametrów mechanicznych stwardniałego kompozytu cementowego na przesunięciem warstw.
- c) Zmiana ilości wydrukowanych warstwa wpłynęła w sposób statystycznie istotny na parametry mechaniczne stwardniałego kompozytu, zwiększenie ilości warstw spowodowało spadek wytrzymałości na zginanie nawet o 38 % a na ściskania nawet o 24%. Uzyskany wynik jest zgodny z literaturą przedmiotu [8].
- d) Wprowadzenie włókien do mieszanki betonowej przyczyniło się do wzrostu wytrzymałości na ściskanie w zakresie do 10 %, co można uznać za wartość statystycznie nieistotną w kontekście podobnych wartości współczynnika zmienności. Wytrzymałość na zginania została zwiększona o maksymalnie 17 % (występują próbki w których ten efekt nie jest widoczny).
- e) Dodatek włókien poliolefinowych skutecznie ogranicza odkształcenia skurczowe zarówno w stanie plastycznym, jak i we wczesnym etapie twardnienia, przy czym efekt redukcji jest silniejszy w próbkach zagęszczanych.
- f) Stosunek objętości do powierzchni wysychania próbki oraz sposób jej formowania mają istotny wpływ na rozwój odkształceń skurczowych – próbki wytłaczane (wariant 1) wykazują większe odkształcenia plastyczne, co wynika z większej powierzchni wysychania.

Podsumowując złożona topologia wydruku polegająca na przesunięciu warstwy nie wpłynęła w sposób statystycznie istotny na uzyskane parametry mechaniczne stwardniałej mieszanki. Jednak badania potwierdziły, że ilość warstw miała znaczenia w kontekście uzyskanych parametrów mechanicznych (różnice w wynikach nawet o 38%). Ponadto wykazano, że włókna o długości 24 mm w sposób pozytywny wpłynęły na skurcz i parametry mechaniczne niestwardniałej mieszanki do druku 3D kompozytów cementowych.

5. Finansowanie

Prace badawcze powstały m.in. w ramach realizacji projektu B+R nr LIDER13/0101/2022 pt.: Technologia inteligentnej pielęgnacji wewnętrznej niskoskurczowych kompozytów cementowych o obniżonym śladzie węglowym,

finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Zakres badawczy objęty projektem dotyczył zastosowania stanowiska do badań wczesnych odkształceń skurczowych w wariancie nr 2 wobec próbek wytłaczanych zgodnie z technologią przyrostową.

6. Literatura

- [1] Amin M, Agwa IS, Mashaan N, Mahmood S, Abd-Elrahman MH. Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. *Sustainability* 2023;15(4):3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>.
- [2] Skibicki S, Federowicz K, Hoffmann M, Chougan M, Sibera D, Cendrowski K et al. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. *Materials* 2024;17(11):2580. <https://doi.org/10.3390/ma17112580>.
- [3] Emad W, Salih Mohammed A, Kurda R, Ghafor K, Cavaleri L, M.A.Qaidi S et al. Prediction of concrete materials compressive strength using surrogate models. *Structures* 2022;46(6):1243–67. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.002>.
- [4] Girskas G, Kligys M. 3D Concrete Printing Review: Equipment, Materials, Mix Design, and Properties. *Buildings* 2025;15(12):2049. <https://doi.org/10.3390/buildings15122049>.
- [5] Sikora P, Techman M, Federowicz K, El-Khayatt AM, Saudi HA, Abd Elrahman M et al. Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens. *Case Studies in Construction Materials* 2022;17:e01320. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01320>.
- [6] Skibicki S, Dvořák R, Pazdera L, Topolář L, Kocáb D, Alexa M et al. Anisotropic mechanical properties of 3D printed mortar determined by standard flexural and compression test and acoustic emission. *Construction and Building Materials* 2024;452(20):138957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138957>.
- [7] Paul SC, Tay YWD, Panda B, Tan MJ. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2018;18(1):311–9. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.
- [8] Shakor P, Nejadi S, Sutjipto S, Paul G, Gowripalan N. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar. *Additive Manufacturing* 2020;32:101069. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101069>.
- [9] Skibicki S, Techman M, Federowicz K, Olczyk N, Hoffmann M. Experimental Study of Hardened Young's Modulus for 3D Printed Mortar. *Materials (Basel)* 2021;14(24). <https://doi.org/10.3390/ma14247643>.
- [10] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R, Gibb AGF et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 2012;42(3):558–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
- [11] Liu C, Yue S, Zhou C, Sun H, Deng S, Gao F et al. Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete. *J Mater Sci* 2021;56(30):16851–64. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>.

- [12] Wolfs RJM, Bos FP, Salet TAM. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research* 2019;119:132–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>.
- [13] Rahul AV, Santhanam M, Meena H, Ghani Z. Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials* 2019;227:116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>.
- [14] Nerella VN, Krause M, Näther M, Mechtcherine V. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D). In: 25th Conference on Rheology of Building Materials; 2016.
- [15] Skibicki S, Szewczyk P, Majewska J, Sibera D, Ekiert E, Chung S-Y et al. The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements. *Journal of Building Engineering* 2024;87(2):109093. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109093>.
- [16] Wiłun Z. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności; 2000.
- [17] Al-Noaimat YA, Chougan M, Albar A, Skibicki S, Federowicz K, Hoffman M et al. Recycled brick aggregates in one-part alkali-activated materials: Impact on 3D printing performance and material properties. *Developments in the Built Environment* 2023;16:100248. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100248>.
- [18] Casagrande L, Esposito L, Menna C, Asprone D, Auricchio F. Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete. *Construction and Building Materials* 2020;245:118286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118286>.
- [19] Skibicki S, Matyja M., Zieliński A, Federowicz K, Techman M, Filipowicz K et al. Projekt RPZP.01.01.00-32-0026/19, Prace badawczo-rozwojowe w zakresie rozwoju technologii przyrostowych oraz komercjalizacja wyników prac przez ORING-GUMY Małgorzata Aneta Matyja.
- [20] Federowicz K, Kaszyńska M, Zieliński A, Hoffmann M. Effect of Curing Methods on Shrinkage Development in 3D-Printed Concrete. *Materials* 2020;13(11):2590. <https://doi.org/10.3390/ma13112590>.
- [21] Zieliński A, Skibicki S. Wpływ składu kompozytów cementowych wykonanych w technologii druku 3D na rozwój odkształceń skurczowych. In: Deja J, Środa B, Gos P, Krechowiecki G, Konieczny D, Pilch Z, editors. *Monografie technologii betonu XII Konferencja Dni Betonu 2023*; 2023.
- [22] Zieliński A. Wpływ domieszek chemicznych zmniejszających napięcie powierzchniowe wody na wczesne odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych. *CONSTRUCTION MATERIALS* 2024;1(8):8–15. <https://doi.org/10.15199/33.2024.08.02>.
- [23] EN 1015-11:2020. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.