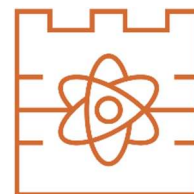
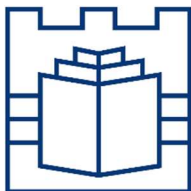




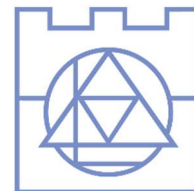
POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki



Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki



Katedra Inżynierii Materiałowej



ROZPRAWA DOKTORSKA

**Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym
o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających
drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą
addytywną**

mgr inż. Marcin Maroszek

Dyscyplina wiodąca: Inżynieria materiałowa

Dyscyplina dodatkowa: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

Promotor: dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK

Promotor 2: dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK

Praca zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, umowa DWD/5/0237/2021.
Partner przemysłowy doktoratu - ATMAT Sp. z o.o.

Kraków 2025

*Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi
Panu dr hab. inż. Markowi Hebdzie, prof. PK za cenne wsparcie merytoryczne,
inspirujące podejście do badań naukowych oraz zaangażowanie na każdym etapie
realizacji pracy doktorskiej.*

*Dziękuję również Pani dr hab. inż. Izabeli Hager, prof. PK
za nieocenioną pomoc i wsparcie w zakresie dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport.*

*Dziękuję firmie ATMAT Sp. z o. o. za możliwość realizacji doktoratu
wdrożeńiowego w dynamicznym środowisku przemysłowym oraz za wsparcie
organizacyjne, dostęp do nowoczesnych narzędzi i otwartość na innowacje, które miały
istotny wpływ na przebieg i efekty mojej pracy badawczej.*

Dziękuję także wszystkim bliskim, którzy wspierali mnie podczas realizacji tej pracy.

Najbardziej dziękuję mojej Żonie Julii - za obecność.



Spis treści

Spis treści	3
Streszczenie.....	4
Summary	6
Wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.....	8
Spis ważniejszych skrótów, symboli i oznaczeń stosowanych w pracy	10
Merytoryczna część rozprawy	12
1. Wprowadzenie	13
2. Cel i zakres pracy.....	26
3. Metodyka badawcza	29
3.1. Przebieg prac.....	29
3.2. Zastosowane materiały	31
3.3. Przygotowywanie materiałów i mieszanek.....	32
3.4. Infrastruktura testowa	33
3.5. Zastosowane metody badawcze.....	34
4. Uzasadnienie połączenia publikacji w cykl.....	38
5. Omówienie uzyskanych wyników badań	42
5.1. Charakterystyka materiału bazowego.....	42
5.2. Parametry procesu druku	47
5.3. Parametry elementów drukowanych.....	49
5.4. Wpływ geometrii elementu na parametry termoizolacyjne.....	53
5.5. Modyfikacja materiału surowcami odpadowymi	55
5.6. Wdrożeniowe aspekty uzyskanych wyników.....	63
6. Podsumowanie i wnioski	67
7. Perspektywy przyszłych badań.....	70
Bibliografia	72
Dorobek naukowy	80
Załączniki.....	84

Streszczenie

Wobec systematycznie rosnącego zapotrzebowania na beton oraz presji redukcji emisji gazów cieplarnianych, związanych przede wszystkim z energochłonnym procesem produkcji cementu portlandzkiego, obserwuje się intensyfikację badań nad rozwiązaniami materiałowymi i technologicznymi o obniżonym śladzie węglowym. Jednym z kierunków rozwoju jest technologia druku 3D z betonu (ang. 3D Concrete Printing, 3DCP), która wykazuje potencjał w zakresie skrócenia czasu realizacji obiektów budowlanych, minimalizacji ilości odpadów oraz swobodnego kształtowania złożonej geometrii elementów. Niemniej jednak mieszanki stosowane w 3DCP charakteryzują się wysoką emisyjnością, wynikającą z dominującego udziału cementu portlandzkiego w ich składzie.

Celem niniejszej pracy było opracowanie oraz ocena bazowej mieszanki betonowej przeznaczonej do technologii 3DCP, opartej na cemencie portlandzkim, a następnie weryfikacja możliwości jej modyfikacji poprzez zastosowanie surowców wtórnych, w kontekście poprawy zarówno charakterystyk środowiskowych, jak i właściwości użytkowych.

Badania przeprowadzono w trzech etapach: (I) opracowanie i walidację składu bazowej mieszanki oraz charakterystyk jej stanu świeżego, dobór parametrów procesowych (wydajność ekstruzji, prędkość druku, średnica dyszy) oraz zaprojektowanie głowicy roboczej wraz ze stanowiskiem badawczym; (II) porównanie właściwości mechanicznych i fizycznych elementów wytworzonych metodą druku 3D z próbkami formowanymi konwencjonalnie, z uwzględnieniem analizy anizotropii oraz wpływu strategii druku na parametry mechaniczne uzyskanych elementów; (III) weryfikację możliwości modyfikacji składu poprzez dodatek surowców odpadowych oraz lekkich kruszyw, wraz z oceną potencjalnych korzyści środowiskowych wynikających z takich rozwiązań.

W ramach przeprowadzonych badań opracowano mieszankę referencyjną przeznaczoną do 3DCP oraz parametry procesu zapewniające wysoką powtarzalność wyników. Analiza porównawcza wykazała, że elementy drukowane odznaczają się niższą wytrzymałością mechaniczną w stosunku do próbek formowanych tradycyjnie, przy czym szczególnie widoczna była anizotropia w zakresie wytrzymałości na zginanie, intensyfikowana przez wydłużone przerwy czasowej pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw. Zaprojektowane struktury przegród umożliwiły uzyskanie podwyższonej izolacyjności cieplnej poprzez kontrolę udziału materiału nośnego. Wprowadzenie surowców z recyklingu pozwoliło na utrzymanie właściwości reologicznych mieszanki na

poziomie zapewniającym drukowalność, jednak skutkowało obniżeniem parametrów mechanicznych (szczególnie wytrzymałości na zginanie). Zastosowanie lekkich kruszyw spowodowało natomiast obniżenie przewodności cieplnej elementów nawet o 70% w stosunku do wartości referencyjnej. Modyfikacje materiałowe umożliwiły również redukcję śladu węglowego sięgającą około 50% w odniesieniu do mieszanki bazowej.

Uzyskane wyniki potwierdzają techniczną wykonalność wytwarzania prefabrykatów w technologii 3DCP z zastosowaniem mieszanek modyfikowanych surowcami wtórnymi, wskazując jednocześnie na ich znaczący potencjał w procesach dekarbonizacji budownictwa. Zidentyfikowano jednak konieczność uwzględnienia spadku nośności oraz wzmożonej anizotropii w projektowaniu elementów konstrukcyjnych. Optymalizacja parametrów procesu (prędkość druku, średnica dyszy, czas przerw międzywarstwowych) oraz udziału składników mieszanki (materiały z recyklingu, lekkie kruszywa) powinna być zatem dostosowana do funkcji projektowanego elementu (nośnej bądź izolacyjnej), w celu zrównoważenia wymagań mechanicznych i środowiskowych.

Opracowana infrastruktura badawcza oraz zestaw wypracowanych wskaźników i parametrów oceny stanowią podstawę dalszych prac nad rozwojem niskoemisyjnych technologii druku 3D z betonu.

Summary

Amid steadily rising demand for concrete and mounting pressure to reduce greenhouse gas emissions- driven primarily by the energy-intensive production of Portland cement- there has been a marked intensification of research into material and process solutions with a reduced carbon footprint. One development pathway is 3D Concrete Printing (3DCP), which shows potential to shorten construction timelines, minimize waste, and enable the freeform shaping of complex geometries. However, mixes used in 3DCP are typically highly emissive due to the dominant share of Portland cement in their composition.

The aim of this study was to develop and assess a baseline concrete mix for 3DCP based on Portland cement, and subsequently to verify the feasibility of modifying it with secondary raw materials in order to improve both environmental metrics and functional performance.

The research methodology comprised three stages: (I) development and validation of the baseline mix design and fresh-state characteristics, selection of process parameters (extrusion efficiency, print speed, nozzle diameter), and the design of a printhead and test stand; (II) comparison of the mechanical and physical properties of elements produced by 3D printing with conventionally cast specimens, including analysis of anisotropy and the influence of printing strategy on mechanical parameters of the printed elements; (III) verification of composition modifications through the addition of waste-derived raw materials and lightweight aggregates, along with an assessment of the potential environmental benefits of such solutions.

The study yielded a reference mix for 3DCP and process parameters that ensured high repeatability of results. Comparative analysis showed that printed elements exhibited lower mechanical strength than traditionally cast specimens, with anisotropy particularly pronounced in flexural strength and exacerbated by prolonged interlayer intervals. The designed wall assemblies enabled enhanced thermal insulation by controlling the fraction of load-bearing material. Introducing recycled constituents allowed the rheological properties to be maintained at a level ensuring printability, but led to reductions in mechanical performance (especially flexural strength). The use of lightweight aggregates decreased the thermal conductivity of the elements by up to 70% compared to the reference values. Material modifications also enabled a reduction in the carbon footprint by approximately 50% relative to the baseline mixture.

The results confirm the technical feasibility of producing precast components via 3DCP using mixes modified with secondary raw materials, while highlighting their considerable potential for decarbonizing construction. At the same time, the need to account for reduced load-bearing capacity and heightened anisotropy in structural design was identified. Optimization of process parameters (print speed, nozzle diameter, interlayer waiting time) and mix constituents (recycled materials, lightweight aggregates) should therefore be tailored to the intended function of the element (load-bearing versus insulating), to balance mechanical requirements with environmental objectives.

The developed research infrastructure and the set of established metrics provide a foundation for further work on low-emission 3D concrete printing technologies.

Wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

Niniejsza rozprawa doktorska obejmuje cykl 5 tematycznie powiązanych publikacji, w których przedstawiono i szczegółowo omówiono wyniki przeprowadzonych badań. Artykuły opublikowano w recenzowanych czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports (JCR) oraz ujętych w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Pełne wersje publikacji, wraz z materiałami uzupełniającymi, zamieszczono na końcu rozprawy. Dla zapewnienia przejrzystości i czytelności opracowania przyjęto następujące oznaczenia publikacji:

1. Załącznik 1 - oznaczenie P1

Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hutyra, A.; Dziura, P.; Hebda, M.

Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency. Appl. Sci. 2024, 14, 11866.

<https://doi.org/10.3390/app142411866>

Impact Factor₂₀₂₄: 2.5

Punktacja MNiSW: 100 pkt.

2. Załącznik 2 - oznaczenie P2

Maroszek, M.; Hager, I.; Mróz, K.; Sitarz, M.; Hebda, M.

Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers. Materials 2025, 18, 3845.

<https://doi.org/10.3390/ma18163845>

Impact Factor₂₀₂₄: 3.2

Punktacja MNiSW: 140 pkt.

3. Załącznik 3 - oznaczenie P3

Dziura, P.; **Maroszek, M.;** Góra, M.; Rudziewicz, M.; Pławecka, K.; Hebda, M.

Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation. Materials 2023, 16, 5772.

<https://doi.org/10.3390/ma16175772>

Impact Factor₂₀₂₄: 3.2

Punktacja MNiSW: 140 pkt.

4. Załącznik 4 - oznaczenie P4

Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Rusin-Żurek, K.; Hager, I.; Hebda, M.

Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing. *Materials* 2025, 18, 4387. <https://doi.org/10.3390/ma18184387>

Impact Factor₂₀₂₄: 3.2

Punktacja MNiSW: 140 pkt.

5. Załącznik 5 - oznaczenie P5

Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hebda, M.

Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review. *Materials*, 18(19), 4517. <https://doi.org/10.3390/ma18194517>

Impact Factor₂₀₂₄: 3.2

Punktacja MNiSW: 140 pkt.

Spis ważniejszych skrótów, symboli i oznaczeń stosowanych w pracy

- 3DCP (ang. 3D Concrete Printing) technologia wytwarzania przyrostowego z zastosowaniem betonu
- ARM (ang. Alternative Raw Materials) surowce alternatywne
- CAD (ang. Computer Aided Design) projektowanie wspomagane komputerowo
- CC (ang. Contour Crafting) technologia wytwarzania przyrostowego z zastosowaniem betonu
- CCR (ang. Clinker-to-Cement Ratio) współczynnik klinkier-cement
- CDW (ang. Construction & Demolition Waste) odpady budowlane i rozbiórkowe
- D₁₀ średnica wyznaczająca 10% objętości zbioru cząstek, μm;
- D₅₀ średnica wyznaczająca 50% objętości zbioru cząstek, μm;
- D₉₀ średnica wyznaczająca 90% objętości zbioru cząstek, μm;
- EoL (ang. End-of-Life) koniec życia w ocenie cyklu życia (LCA)
- EoW (ang. End-of-Waste) moment, w którym materiał przestaje być traktowany jako odpad i staje się produktem, w ocenie cyklu życia (LCA)
- EPBD (ang. Energy Performance of Buildings Directive) charakterystyka energetyczna budynków
- EPD (ang. Environmental Product Declarations) deklaracje środowiskowe wyrobów
- EPS (ang. Expanded Polystyrene) polistyren ekspandowany
- ETICS (ang. External Thermal Insulation Composite System) systemy dodatkowych warstw ocieplenia
- FA (ang. Fly Ash) popiół lotny
- FDM (ang. Fused Deposition Modeling) technologia osadzania topionego materiału
- FEM (ang. Finite Element Method) metoda elementów skończonych
- GGBFS (ang. Ground Granulated Blast Furnace Slag) żużel wielkopiecowy
- GOZ gospodarka o obiegu zamkniętym
- GWP100 (ang. Global Warming Potential) globalny potencjał ocieplenia
- HPMC (ang. Hydroxypropyl Methylcellulose) hydroksypropylometyloceluloza

LC3	(ang. Limestone Calcined Clay Cement) cement z wapienia i gliny palonej
LCA	(ang. Life Cycle Assessment) analiza cyklu życia
LECA	(ang. Lightweight Expanded Clay Aggregate) keramzyt
MES	(ang. Finite Element Method) metoda elementów skończonych
MK	(ang. Metakaolin) metakaolin
PCE	(ang. Polycarboxylate Ethers) polikarboksylany
PCP	(ang. Progressive Cavity Pumps) typ pompy- pompa kawitacyjna
PCR	(ang. Product Category Rules) reguły kategorii produktowych
PLA	(ang. Polylactic Acid) polilaktyd
PUR	(ang. Polyurethane Foam) pianka poliuretanowa
RA	(ang. Recycled Aggregates) kruszywo z recyklingu
RBP	(ang. Recycled Brick Powder) sproszkowana cegła z recyklingu
RCA	(ang. Recycled Concrete Aggregate) kruszywa z recyklingu betonu
RFA	(ang. Recycled Fine Aggregates) drobne kruszywa z recyklingu
SCM	(ang. Supplementary Cementitious Materials) materiały uzupełniające spoiwo cementowe - dodatki mineralne o właściwościach pucolanowych lub hydraulicznych
SF	(ang. Silica Fume) pył krzemionkowy
SP	(ang. Superplasticizers) superplastyfikatory
SPC	Stowarzyszenie Producentów Cementu
TRL	(ang. Technology Readiness Level) poziomu dojrzałości technologicznej
U	współczynnik przenikania ciepła, $W/m^2 \cdot K$
VMA	(ang. Viscosity Modifying Agents) środki modyfikujące lepkość
w/s	(ang. water to solid ratio) stosunek wagowy cieczy do składników stałych,
WGP	(ang. Waste Glass Powder) proszek ze szkła odpadowego
WLC	(ang. Whole-Life Carbon) analiza śladu węglowego w całym cyklu życia
XRF	(ang. X-ray Fluorescence) rentgenowska analiza fluorescencyjna
ZEB	(ang. Zero Emission Buildings) budynki zeroemisyjne
λ	współczynnik przewodności cieplnej, $W/m \cdot K$

Merytoryczna część rozprawy

1. Wprowadzenie

W obliczu dynamicznego wzrostu liczby ludności, światowego rozwoju gospodarczego, a przez to postępującej urbanizacji, sektor budownictwa staje przed rosnącym zapotrzebowaniem na materiały konstrukcyjne, w szczególności kruszywa i beton. Szacuje się, że do 2030 roku globalne zużycie kruszyw osiągnie poziom 50–55 mld t [1], co generuje istotne obciążenie zarówno dla zasobów naturalnych jak i środowiska. W dalszej perspektywie prognozuje się, że obecna infrastruktura budowlana - rozumiana jako zasób obiektów mieszkalnych i niemieszkalnych oraz infrastruktura techniczna - będzie musiała zostać co najmniej podwojona, aby sprostać globalnemu zapotrzebowaniu prognozowanemu na rok 2050. Beton pozostaje kluczowym, najpowszechniej stosowanym materiałem budowlany, wytwarzanym z mieszanki kruszyw, spoiwa i wody. Jego globalna produkcja systematycznie wzrasta, szczególnie w krajach rozwijających się [2,3].

Według najnowszych informacji szacuje się, że przemysł cementowy odpowiada za około 7% całkowitego zużycia energii końcowej w przemyśle [4,5]. Roczna światowa produkcja cementu przekracza 4,1 mld t, z czego 51% wytwarzane jest w Chinach [6,7]. Emisja dwutlenku węgla związana z produkcją 1 tony cementu wynosi od 0,55–0,80 t CO₂, przy czym wartości te różnią się regionalnie, w zależności od udziału klinkieru, określanego współczynnikiem klinkier-cement (ang. Clinker-to-Cement Ratio, CCR), którego globalna wartość wynosi około 0,71. W strukturze emisji dominują emisje procesowe powstające w wyniku kalcynacji CaCO₃, (około 63% całości), które są nieuniknione z uwagi na charakter reakcji chemicznych. Pozostała część emisji pochodzi głównie ze spalania paliw w procesie wypalania klinkieru [8,9]. W zależności od przyjętych granic bilansu sektor cementowy odpowiada łącznie za około 7–8% globalnych emisji CO₂ [3,9]. W konsekwencji redukcja udziału klinkieru w cemencie oraz wdrażanie strategii materiałowych ukierunkowanych na jego zastępowanie stanowią kluczową dźwignię dekarbonizacji betonu.

Z punktu widzenia oceny oddziaływania środowiskowego istotne znaczenie ma analiza śladu węglowego w całym cyklu życia (ang. Whole-Life Carbon, WLC), obejmująca zarówno emisje związane z materiałami i procesami budowlanymi (ślad wbudowany), jak i emisje wynikające z użytkowania obiektu (ślad eksploatacyjny). Najczęściej stosowaną metodyką w tym zakresie jest analiza cyklu życia (ang. Life Cycle Assessment, LCA), w której podstawowym wskaźnikiem jest globalny potencjał ocieplenia (ang. Global Warming Potential, GWP100) wyrażony w jednostkach [kg CO₂-eq], przypisany do określonej jednostki funkcjonalnej (dla betonu najczęściej 1 m³ o określonych

właściwościach). Analizę prowadzi się w ramach modułów A-D, przy czym w etapie wyrobu (A1-A3) dominującym źródłem emisji pozostaje cement - spoiwo charakteryzujące się wysoką energochłonnością i znacznymi emisjami procesowymi. Kolejne etapy obejmują: budowę (A4-A5), użytkowanie (B), koniec życia obiektu (C) oraz potencjał poza granicami systemu (D) [10,11].

Największy, bezpośredni potencjał redukcji wartości wskaźnika GWP100 w etapie A1-A3 wynika z obniżania współczynnika CCR poprzez zastosowanie dodatków mineralnych o właściwościach pucolanowych lub hydraulicznych (ang. Supplementary Cementitious Materials, SCM). Zastępują one część klinkieru, ograniczając tym samym emisje procesowe. Do najczęściej stosowanych SCM należą: żużel wielkopiecowy (GGBFS)- umożliwiający wysokie poziomy substytucji i korzystnie wpływający na trwałość betonu; popiół lotny (FA)- zapewniający umiarkowane poziomy zastąpienia, poprawę urabialności i przyrost wytrzymałości w czasie; mączka wapienna- pełniąca funkcję materiału wypełniającego; kalcynowane ily oraz cement z wapienia i gliny palonej (ang. Limestone Calcined Clay Cement, LC3)- łączące ił i wapień, charakteryzujące się wysokim potencjałem redukcji emisji; pucolany naturalne; pył krzemionkowy (SF); drobno mielone szkło odpadowe (WGP) oraz selekcyjonowane frakcje drobne z recyklingu betonu. Dobór rodzaju dodatku i poziomu substytucji musi uwzględniać równowagę pomiędzy właściwościami reologicznymi (urabialność, pompowalność), kinetyką wiązania i przyrost wytrzymałości, a także trwałością w zakresie odporności na przenikanie chlorków, karbonatyzację czy reakcję alkalia-kruszywo [12–16]. Wymagania te definiują zarówno normy materiałowe, jak i wytyczne PCR/EPD (EN 15804+A2 [10], ISO 21930 [11]). W ujęciu praktycznym redukcja zawartości klinkieru przekłada się bezpośrednio na zmniejszenie emisji CO₂ w zakresie 0,55–0,80 t CO₂/t cementu, co skutkuje obniżeniem wartości GWP100 [kg CO₂-eq/m³] dla gotowej mieszanki betonowej [10,11,17,18].

W Polsce obserwuje się dynamiczny rozwój technologii cementów niskoemisyjnych oraz zwiększone wykorzystanie kruszyw z recyklingu w produkcji mieszanek betonowych. Według danych Stowarzyszenia Producentów Cementu (SPC) w 2024 r. do podbudów drogowych, produkcji betonów i cementu zastosowano około 1 mln ton kruszyw z recyklingu. Wzrost presji środowiskowej sprzyja nie tylko rozwojowi tzw. „zielonych cementów”, ale także kształtuje rosnące zapotrzebowanie na inne materiały budowlane o zrównoważonym charakterze. Przejście w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, opartej na recyklingu, racjonalnym gospodarowaniu odpadami i minimalizacji

oddziaływania na środowisko, znajduje odzwierciedlenie w nowych politykach sektorowych i regulacjach prawnych [19,20]

Zgodnie z raportem *Status and Prospects of Alternative Raw Materials in the European Cement Sector* opracowanym przez European Cement Research Academy [21] przemysł cementowy w Polsce w ostatnich latach przeszedł istotne transformacje w kierunku zrównoważonego rozwoju, czego przykładem jest systematyczny wzrost wykorzystania surowców alternatywnych (ang. Alternative Raw Materials, ARM).

W Polsce wykorzystanie ARM w przemyśle cementowym kształtuje się powyżej średniej europejskiej i wykazuje tendencję wzrostową. W 2018 roku do produkcji klinkieru, półproduktu cementowego, zastosowano 967 tys. ton ARM, co odpowiadało 4,3% całkowitej masy klinkieru. W porównaniu z rokiem 2013 (3,3% udziału, tj. 578 tys. ton przy produkcji 10,8 mln ton klinkieru) oznacza to wzrost o ponad 67%. W tym samym okresie produkcja klinkieru w Polsce zwiększyła się z 10,8 do 14,1 mln ton, natomiast produkcja cementu wzrosła z 14,5 do 18,8 mln ton. Z kolei do produkcji cementu, gotowego spoiwa budowlanego, w 2018 roku zastosowano 3,74 mln ton ARM, co odpowiadało 250 kg surowców alternatywnych na każdą wyprodukowaną tonę cementu i stanowiło 19,9% całkowitej masy surowców wykorzystywanych w procesie produkcji. Najczęściej stosowanymi dodatkami były: żużel wielkopiecowy (ang. Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) - 52%, popiół lotny (ang. Fly Ash, FA) - 28%, gips z odsiarczania spalin - 19%, oraz odpady gipsowe i popioły fluidalne [21,22].

Dynamiczny wzrost wykorzystania ARM obserwuje się również w produkcji betonu. W latach 2013 - 2020 całkowita produkcja betonu wzrosła z 32,1 mln m³ do 58,4 mln m³, tj. o ponad 80%. W tym samym czasie zużycie ARM zwiększyło się z 2,5 mln ton do 3,3 mln ton, przy czym zawartość ARM w jednostce objętości betonu zmalała z 78 kg/m³ do 56 kg/m³. Obecny poziom substytucji wynosi 2,3%, co jest nieco powyżej średniej unijnej (2,1%). Dominującym materiałem alternatywnym w betonie pozostaje popiół lotny, natomiast rosnący potencjał wykazują także kruszywa wtórne pochodzące z recyklingu m.in. odpady przemysłowe: guma z opon, tworzywa sztuczne, żużel stalowy, szkło z recyklingu [23–29]; odpady wydobywcze: poflotacyjne odpady miedzi i żelaza [30–34]; piasek eoliczny, pokruszone muszle [35–37]. Stosowanie ARM przynosi wymierne efekty środowiskowe. Szacuje się, że dzięki wykorzystaniu popiołów lotnych, żużli odlewniczych i konwertorowych w produkcji klinkieru w 2018 roku uniknięto emisji w zakresie od 69,9 - 134 tys. ton CO₂, co odpowiada średnio redukcji 4,9-9,5 kg CO₂ na każdą tonę klinkieru. Wyniki te mają istotne znaczenie zarówno w kontekście realizacji celów klimatycznych, jak

i ograniczenia kosztów emisji. W porównaniu do średniej wartości dla UE-28, Polska wykazuje wyższy poziom wykorzystania ARM zarówno w klinkierze (4,3% wobec 3,6%), cemencie (19,9% wobec 7,4%) jak i betonie (2,3% wobec 2,1%). Prognozuje się, że w kolejnych latach krajowy sektor cementowy będzie dysponował znaczącym potencjałem do dalszego zwiększania udziału surowców alternatywnych [21,38].

Rosnąca presja środowiskowa i regulacyjna kieruje uwagę sektora budowlanego na surowce wtórne pochodzące z recyklingu. W ujęciu makrostrukturalnym kluczowym strumieniem materiałowym są odpady budowlane i rozbiórkowe (ang. Construction & Demolition Waste, CDW), które stanowią jeden z największych składników całkowitego wolumenu odpadów w gospodarkach rozwiniętych [39–45]. Szacunki globalne są silnie zróżnicowane i wynoszą od 2–4 mld ton/rok do ponad 10 mld ton/rok, co wynika m.in. z różnic definicyjnych oraz odmiennego podejścia do ujęcia frakcji ziemnych w kategorii CDW. W przypadku UE-27 wiarygodne statystyki Eurostatu wskazują, że w 2022 r. całkowita generacja odpadów wyniosła około 2,2 mld ton, przy czym wskaźniki odzysku, recykling oraz niepełnego recykling materiałowego (backfilling) dla strumieni ogółem przekroczyły 60%. Dla samego strumienia CDW literatura podaje wartości odzysku na poziomie około 89%. Jednak tylko niewielka część tych materiałów trafia z powrotem do betonu w postaci kruszywa wtórnego. Udział takich surowców w podaży kruszyw w Europie wynosi średnio 9-10%, przy znacznym zróżnicowaniu krajowym. Sytuacja ta wskazuje na istniejącą przestrzeń do rozwoju wysokowartościowego recyklingu (upcycling) w sektorze budowlanym [46–48].

Z perspektywy środowiskowej znaczenie kruszyw bywa niedoceniane. Choć cement jest dominującym źródłem emisji w etapie A1-A3 mieszanki betonowej, to kruszywa, zwłaszcza frakcje grube, mogą odpowiadać za 13-20% emisji GWP typowego betonu. Wynika to głównie z energii elektrycznej zużywanej podczas procesów kruszenia i przesiewania oraz transportu masowego na duże odległości. Analizy LCA potwierdzają, że udział kruszyw w śladzie węglowym betonu rośnie szczególnie w sytuacjach, gdy zawartość cementu w mieszance jest umiarkowana, a dystanse transportowe kruszyw znaczące. Natomiast spada przy mieszankach o bardzo wysokim udziale spoiwa. Uzasadnia to włączanie kruszyw wtórnych wszędzie tam, gdzie ich lokalna dostępność i logistyka (moduł A2) pozwalają zminimalizować koszty środowiskowe i nie niweczą korzyści z obniżonego śladu w module A1 [49–51].

Wymagania normatywne dotyczące kruszyw do betonu określa przede wszystkim norma EN 12620 [52], obejmująca również surowce wtórne, w tym frakcje drobne do 4 mm.

Dokumenty powiązane, m.in. wytyczne krajowe, branżowe czy opracowania techniczne, precyzują wymagania dla kruszyw grubych z recyklingu, w tym dopuszczalne udziały frakcji betonowych (Rc), ceglanych (Rb), szklanych (Rg) oraz ograniczenia dotyczące zanieczyszczeń, zawartości gipsu czy materiałów rozpuszczalnych w wodzie. Uwzględniają również ich potencjalny wpływ na czas wiązania zaczynu i trwałość betonu. W praktyce projektowej kluczowe znaczenie mają ponadto odniesienia do normy EN 206 [53] (beton-wymagania, właściwości, produkcja i zgodność) oraz wytycznych branżowych, które wskazują bezpieczne obszary stosowania surowców wtórnych (np. elementy nienośne, niekrytyczne) oraz wymagane reżimy kontroli jakości (segregacja CDW, rozbiórka selektywna, oczyszczanie z zaprawy). Z perspektywy gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) włączenie kruszyw wtórnych ogranicza eksploatację surowców pierwotnych, redukuje dystanse transportowe i domyka pętlę materiałową. Warunkiem utrzymania rzeczywistych korzyści środowiskowych jest jednak zapewnienie odpowiednich standardów jakości, przejrzystości pochodzenia strumienia oraz właściwej organizacji logistyki i przetwarzania [52,54,55].

Aby w sposób wiarygodny wykazać korzyści środowiskowe wynikające z zastosowania materiałów z recyklingu oraz innych surowców alternatywnych, konieczne jest prowadzenie spójnej analizy LCA dla betonu. W praktyce badawczej oraz w deklaracjach środowiskowych wyrobów (ang. Environmental Product Declarations, EPD) stosuje się normę EN 15804+A2 [10], która określa ogólne zasady, oraz normę EN 16757 [56], stanowiącą zestaw reguł specyficznych dla betonu (ang. Product Category Rules, PCR). Dodatkowe wytyczne, takie jak programy EPD i narzędzia branżowe, wspierają zachowanie porównywalności danych. Do kluczowych decyzji modelowych w analizach LCA należą m.in.:

- Jak traktujemy odpady (alokacja): najczęściej stosuje się zasadę „odcięcia” (ang. cut-off) od momentu, gdy odpad staje się pełnoprawnym surowcem wtórnym (ang. End-of-Waste, EoW). Od tego punktu nowy wyrób nie przejmuje wcześniejszych obciążeń.
- Czy i gdzie uwzględnić karbonatyzację: zwykle w module B (użytkowanie) i module C (koniec życia, ang. End-of-Life, EoL), a czasem także w module D (efekty poza systemem), bo beton pochłania CO₂ w trakcie eksploatacji i po rozbiórce.
- Jak rozliczyć moduł D: zazwyczaj przez kredyty substytucyjne, gdy kruszywo z recyklingu (RA) zastępuje kruszywo pierwotne poza granicą systemu podstawowego.
- Jednostka funkcjonalna: najczęściej 1 m³ betonu o określonej klasie wytrzymałości/trwałości, aby wyniki dało się porównywać.

- Spójność danych wejściowych - te same założenia dla wszystkich wariantów: ten sam miks energetyczny, te same modele wytwarzania cementu i kruszyw oraz te same założenia transportowe.

Literatura porównawcza wskazuje, że bazowy ślad węglowy (GWP100) dla mieszanek standardowych, opartych na cemencie portlandzkim i kruszywach naturalnych, mieści się zazwyczaj w przedziale 320-340 kg CO₂-eq/m³ (A1-A3). Intensywna substytucja klinkieru w cemencie może obniżyć ten poziom nawet o 100-200 kg CO₂-eq/m³. Z kolei zastępowanie kruszyw naturalnych kruszywami wtórnymi (RA) prowadzi zazwyczaj do mniejszych redukcji emisji (głównie w modułach A1 i A2), jednak efekty te mogą się zwiększać przy skróceniu tras transportowych oraz właściwym przypisaniem kredytów w module D. Aby ułatwić praktyczne uwzględnianie takich działań w analizach środowiskowych, stosuje się narzędzia branżowe do sporządzania EPD (np. *GCCA Industry EPD Tool* dla kruszyw, cementu i betonu), zgodne z EN 15804 [10] oraz EN 16757 [56]. Umożliwiają one przyspieszenie kalkulacji, ujednoczenie raportowania oraz poprawę porównywalności wyników [10,18,56,57].

Rosnące znaczenie tych inicjatyw znajduje odzwierciedlenie w politykach Unii Europejskiej, które obejmują m.in. poprawę efektywności energetycznej budynków, ograniczenie zużycia surowców naturalnych oraz redukcję oddziaływania na środowisko, tworząc tym samym sprzyjające warunki dla wdrażania innowacyjnych technologii w sektorze budownictwa. Jedną z nich jest technologia wytwarzania przyrostowego z zastosowaniem betonu (ang. 3D Concrete Printing, 3DCP), definiowana jest jako zautomatyzowane i sterowane cyfrowo wytwarzanie przyrostowe struktur z materiałów bazujących na spoiwie cementowym. Analiza stanu wiedzy pozwala wyodrębnić trzy główne techniki druku. Pierwszą z nich jest Contour Crafting (CC) - jedna z pionierskich metod opracowanych na University of Southern California, charakteryzująca się zastosowaniem łopatek formujących przy dyszy [58–63]. Drugą technikę stanowi 3D Concrete Printing (3DCP), czyli klasyczna ekstruzja pozbawiona łopatek formujących [64–68]. Trzecim podejściem jest D-Shape, wykorzystujące selektywne nanoszenie spoiwa na pełne warstwy kruszywa, co umożliwia drukowanie skomplikowanych struktur bez stosowania materiałów podporowych [69–72]. Każda z metod charakteryzuje się odmienną architekturą sprzętową, zakresem parametrów procesowych oraz specyficznymi wymaganiami stawianymi mieszance. Równoległe liczne komitety i zespoły badawcze [73–76] podejmują prace nad standaryzacją terminologii i procedur badawczych, ponieważ obecnie brak jest obowiązujących norm regulujących zastosowanie technologii druku 3D

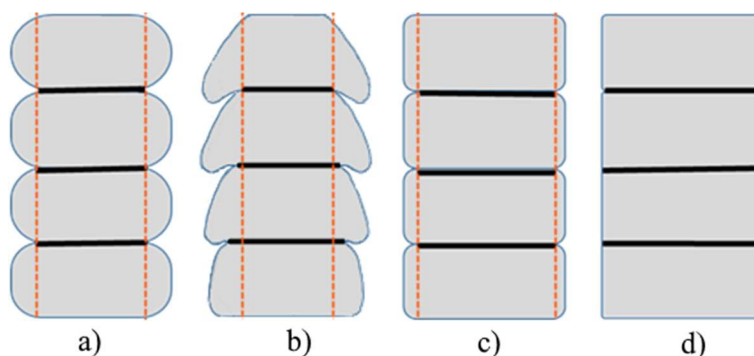
w budownictwie. Termin „druk 3D” jest potocznym określeniem grupy technik wykonywania konstrukcji, której techniczna nazwa brzmi „wytwarzanie przyrostowe”. W dziedzinie budownictwa jednak dużo częściej spotyka się potoczną nazwę „druk 3D” niż formalny termin „wytwarzanie przyrostowe”. W niniejszej pracy autor używa zamiennie obu terminów.

Znaczenie tej technologii wpisuje się w szerszy kontekst działań legislacyjnych i strategicznych Unii Europejskiej, ukierunkowanych na osiągnięcie neutralności klimatycznej sektora budowlanego. Przykładem jest zrewidowana Dyrektywa w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (ang. Energy Performance of Buildings Directive, EPBD), która nakierowuje państwa członkowskie na realizację koncepcji budynków zeroemisyjnych (ang. Zero Emission Buildings, ZEB), a także na podwyższanie efektywności energetycznej istniejących zasobów budowlanych [77].

Technologia 3DCP, rozwijana od lat 80. XX w., ugruntowała swoją pozycję jako pełnoprawny proces wytwórczy również w sektorze budowlanym. Oferuje ona skrócenie czasu realizacji inwestycji, redukcję kosztów oraz ograniczenie ilości odpadów, w tym deskowań, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego stopnia złożoności geometrycznej wytwarzanych elementów [70]. Jednocześnie obecnie stosowane mieszanki do druku często charakteryzują się wysoką zawartością cementu, co zwiększa energochłonność i ślad węglowy materiału, nierzadko przekraczający 500 kg CO₂/m³. Stąd potrzeba łączenia 3DCP ze zrównoważonymi materiałowymi, głównie przez obniżanie CCR (substytucja klinkieru przez SCM) oraz włączanie surowców wtórnych (CDW) w roli wypełniaczy lub kruszyw [78,79]. W tym aspekcie, poza standardowymi surowcami wtórnymi jak GGBFS czy FA, rośnie rola cementu z wapieniem i kalcynowanymi iłami (LC3). Jest to cement o zredukowanej emisyjności wynikającej z zastąpienia części klinkieru składnikami o niższej emisyjności. Drobnny wapień poprawia „smarowność” mieszanki, a płytkowe cząstki ładu zwiększają tiksotropię i wstępną wytrzymałość po wyekstrudowaniu [80]. Istotnie wykorzystywane są również surowce wtórne, typu sproszkowana cegła (ang. Recycled Brick Powder, RBP) jako substytut spoiwa, oraz inne drobne kruszywa (ang. Recycled Fine Aggregates, RFA) i żużel stalowniczy, które wykazują wpływ na reologię i nośność materiału drukowanego [30,39,81]. Dodatkowo pojawiają się strategie związane z gospodarką o obiegu zamkniętym, które zakładają ponowne wykorzystanie drobnej frakcji odpadowej 3DPC po klasyfikacji i modyfikacjach [78].

W trakcie procesu druku formowana jest liniowa ścieżka (ang. path), z której - poprzez sukcesywne nakładanie kolejnych warstw - powstaje trójwymiarowy element.

Warstwowa natura technologii skutkuje jednak obecnością stref połączeń międzywarstwowych, które zazwyczaj stanowią najsłabsze ogniwo konstrukcji [82,83]. Minimalizacja tej słabości wymaga odpowiedniego doboru geometrii ścieżki oraz parametrów druku. Wymiary przekroju wytłaczanej ścieżki zależą przede wszystkim od składu mieszanki, prędkości ruchu głowicy, wydatku ekstruzji, wysokości warstwy oraz geometrii dyszy. Za korzystny uznaje się przekrój zbliżony do prostokątnego, który maksymalizuje powierzchnię styku między sąsiednimi warstwami (rys. 3d). Natomiast występowanie nadmiernych podcięć i zagłębień prowadzi do obniżenia jakości połączenia i sprzyja odrywaniu się kolejnych warstw (rys. 3a,b,c). Analiza metod pozwalających na ocenę jakości połączenia międzywarstwowego była przedmiotem badań, których rezultaty opublikowano w artykule naukowym [84]. Na wytrzymałość połączeń międzywarstwowych i stabilności świeżej struktury wpływa również czasowy odstęp pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw, determinowany prędkością druku i gabarytami wytwarzanego elementu. Właściwy dobór tego interwału, a więc wyznaczenie maksymalnego czasu potrzebnego na wydruk pojedynczej warstwy, stanowi kluczowy warunek dla uzyskania wysokiej jakości połączenia. Nadmierne wydłużenie przerwy prowadzi do powstania tzw. „zimnych połączeń” (ang. cold joints) charakteryzujących się obniżoną nośnością [85]. Wpływ odstępu czasowego pomiędzy warstwami na jakość złącza została przeanalizowana w rozdziale 5.2.



Rysunek 1. Kształt przekroju poprzecznego elementów drukowanych: (a) zaokrąglone krawędzie; (b) deformacja przekroju- wyoblenia; (c) zmniejszony promień krzywizny krawędzi; (d) przekrój prostokątny [84].

Druk 3D z betonu to złożony proces wymagający mieszanki o precyzyjnie dostrojonych parametrach. Brakuje obecnie znormalizowanych, powszechnie przyjętych metod oceny „drukowalności”, dlatego wiele ośrodków stosuje własne protokoły, a nazwy i definicje parametrów bywają niespójne między zespołami [86,87].

Na podstawie dotychczasowych badań i przeglądów literaturowych [80,86–90]. wyróżnia się cztery główne grupy właściwości materiałowych istotnych w technologii 3DCP:

Właściwości mieszanki świeżej - obejmującej fazę po wymieszaniu i w trakcie transportu do głowicy drukującej: pompowalność (ang. pumpability), wytłaczalność (ang. extrudability), urabialność (ang. workability) oraz czas zachowania wymaganej konsystencji (ang. open time). Ocena tych właściwości realizowana jest z wykorzystaniem metod reometrii w tym pomiaru statycznego i dynamicznego naprężenia uplastyczniającego, lepkości plastycznej oraz tiksotropii, a także poprzez testy procesowe, takie jak metoda opadu stożka czy metoda stolika rozplywowego.

Właściwości technologiczne po ekstruzji - odnoszące się do materiału opuszczającego dyszę, obejmują przede wszystkim stabilność kształtu oraz budowlalność (ang. buildability), rozumianą jako zdolność kolejnych warstw do przenoszenia obciążeń bez występowania zjawiska wybożenia lub zapadania. W ocenie tych parametrów stosuje się wskaźniki budowlalności, takie jak maksymalna wysokość stabilnej konstrukcji (przez testowe drukowanie cylindra o maksymalnej wysokości), czy odkształcenie wytłoczonego materiału w czasie, a także pomiary tzw. „zielonej” wytrzymałości. Zakres tzw. „okna procesowego” regulowany jest poprzez stosowanie domieszek chemicznych o charakterze przyspieszającym (np. na bazie azotanu wapnia) lub opóźniającym (np. sacharoza). Dobór odpowiednich domieszek wymaga uwzględnienia kompromisu między szybkim przyrostem wytrzymałości strukturalnej, a zapewnieniem odpowiedniej adhezji międzywarstwowej.

Właściwości materiału w stanie stwardniałym - określane są na podstawie próbek referencyjnych przygotowanych poza procesem drukowania. Do kluczowych parametrów zalicza się m.in. wytrzymałość na ściskanie i zginanie po 1/7/28 dniach dojrzewania, moduł sprężystości, skurcz, gęstość objętościową oraz współczynnik przewodności cieplnej λ . Parametry te stanowią podstawę oceny nośności, trwałości oraz właściwości izolacyjnych materiału.

Właściwości wydruku (elementu końcowego) - obejmujące parametry użytkowe i konstrukcyjne wytworzonych elementów, takie jak nośność i sztywność z uwzględnieniem anizotropii kierunkowej, spójność międzywarstwowa (ang. interlayer bond), występowanie defektów na połączeniach warstw, dokładność wymiarowa oraz, w kontekście efektywności energetycznej, właściwości cieplne przegrody określane przez współczynnik przewodności cieplnej λ dla pojedynczego elementu lub współczynnik przenikania ciepła U dla gotowej geometrii.

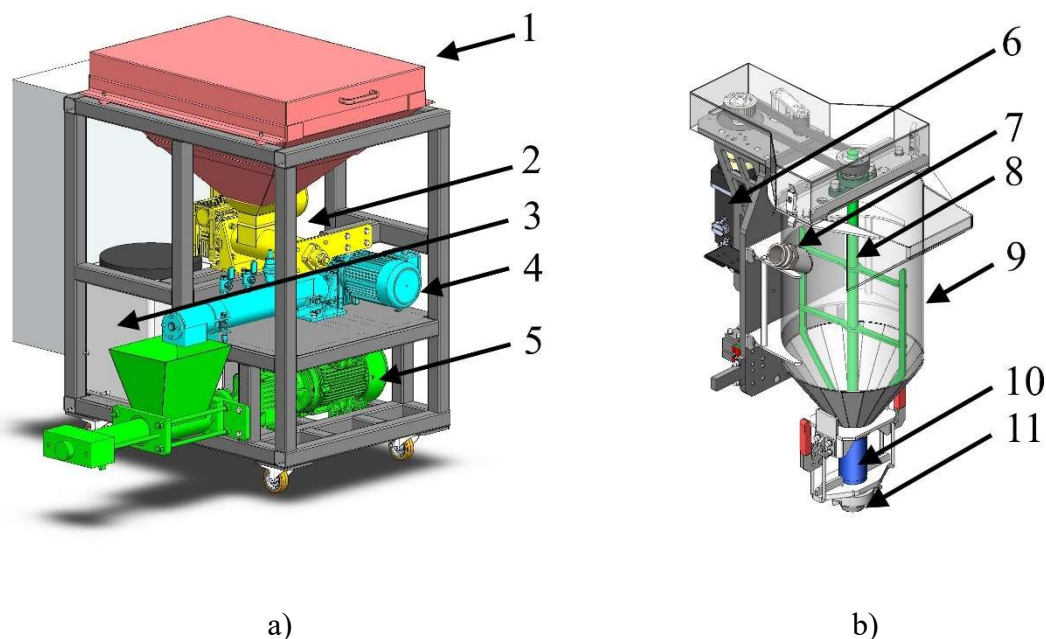
Tak zdefiniowana klasyfikacja właściwości materiałowych pozwala na powiązanie terminologii praktycznej (ang. pumpability, extrudability, buildability, open time) z mierzalnymi parametrami reologicznymi, co odpowiada aktualnemu stanowi badań i kierunkami rozwoju technologii 3DCP.

Właściwości mieszanek przeznaczonych do druku powinny być dostosowane do zastosowanych podzespołów i urządzeń wchodzących w skład instalacji drukującej, która zazwyczaj obejmuje mieszalnik, pompę, przewody transportujące oraz robota sterującego głowicą drukującą. Proces rozpoczyna się od przygotowania mieszanki w odpowiednim mieszalniku- talerzowym, planetarnym lub bębnowym. W technologii druku 3D coraz większe znaczenie zyskują również mieszalniki ślimakowe, umożliwiające wytwarzanie materiału w sposób ciągły, z zadaną wydajnością [12,91–93]. Następnie przygotowana mieszanka transportowana jest do głowicy za pomocą pomp różnego typu, takich jak ślimakowe, kawitacyjne (ang. Progressive Cavity Pumps, PCP) czy tłokowe (wyłaczarki) [93,94]. W wielu rozwiązaniach technicznych urządzenia przygotowujące mieszankę integrują funkcje mieszania i pompowania, co upraszcza instalację oraz ogranicza liczbę elementów wymagających synchronizacji (Rysunek 2a).

Wykonywanie zaprojektowanych ścieżek i geometrii drukowanych elementów jest możliwe dzięki precyzyjnemu pozycjonowaniu głowicy, które uzależnione jest od zastosowanego typu drukarki 3D oraz jej układu kinematycznego. Najczęściej stosowane są systemy oparte na robotach kartezyjskich lub manipulatorach (ramionach robotycznych) [64,94–96]. Roboty kartezyjskie, działające w zdefiniowanej przestrzeni roboczej, cechują się prostszym sterowaniem, podczas gdy manipulatory oferują większą mobilność, ale wymagają bardziej zaawansowanego oprogramowania. Rozwijane są również roboty samojezdne działające na zasadzie dźwigu, takie jak drukarka Apis Cor, które pozwalają na realizację dużych obiektów przy zachowaniu kompaktowych wymiarów urządzenia [12,97].

Kluczowym elementem systemu druku 3DCP jest głowica drukująca (Rysunek 2b), odpowiedzialna za wytłaczanie materiału przez dyszę, nadając mu bezpośrednio kształt w trakcie formowania warstwy. Dysze stosowane w tej technologii mogą posiadać przekrój okrągły lub prostokątny, a ich średnice mieszczą się zazwyczaj w zakresie od 6 do 50 mm. W wybranych rozwiązaniach konstrukcyjnych głowica wyposażona jest w komorę mieszającą, która pełni rolę niewielkiego zasobnika materiału oraz umożliwia wprowadzenie przyspieszacza wiązania tuż przed ekstruzją. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na szybkie utwardzenie mieszanki w ramach strategii „set-on-

demand”, polegającej na kontrolowanym inicjowaniu procesu wiązania poprzez dodanie odpowiednich domieszek bezpośrednio przed wytłoczeniem [93–95].



Rysunek 2. Elementy infrastruktury technologii 3DCP: a) mieszalnik do zapraw (1- zasobnik suchej mieszanki; 2- dozownik suchej mieszanki; 3- zbiornik wody; 4- mieszalnik ślimakowy; 5- pompa kawitacyjna (PCP)); b) głowica drukująca (6- napęd głowicy; 7- przyłącze węża z mieszanką; 8- wał napędowy ekstrudera z funkcją mieszania; 9- zasobnik materiału; 10- ekstruder; 11- dysza drukująca).

W ujęciu środowiskowym i procesowym technologia 3D Concrete Printing (3DCP) umożliwia redukcję zużycia materiałów poprzez projektowanie niepełnych przegród budynków, ograniczenie ilości odpadów, automatyzację i stabilizację jakości wytwarzania, a także integrację funkcji konstrukcyjnych i instalacyjnych, takich jak kanały prowadzenia instalacji, przestrzenie powietrzne czy warstwy izolacyjne [70,79]. Należy jednak podkreślić, iż technologia ta wiąże się z określonymi ograniczeniami. Do najistotniejszych należą: wąski zakres tzw. „okna drukowania” (kompromis pomiędzy pompowalnością a szybkim przyrostem wytrzymałości struktury), anizotropia właściwości mechanicznych oraz zmienna jakość wiązania międzywarstwowego. Parametry te pozostają w silnej zależności od czasu pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw oraz od geometrii i charakterystyki ścieżki drukowania. Wyniki badań eksperymentalnych z 2024 r. wskazują, że jakość połączenia międzywarstwowego ulega istotnym zmianom zarówno w funkcji czasu aplikacji kolejnych warstw, jak i w zależności od warunków procesowych. Z tego względu rekomenduje się uwzględnienie testów mechanicznych połączeń warstwowych jako integralnego elementu procedury walidacji projektowej [82,86,98].

Poza redukcją emisyjności samych materiałów budowlanych, istotnym zagadnieniem są również właściwości termoizolacyjne mieszanek stosowanych w 3DCP oraz ich wpływ na efektywność energetyczną i komfort cieplny budynków. Zgodnie

z założeniami Dyrektywy w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD), państwa członkowskie UE zobowiązane są do podejmowania działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej zasobu budowlanego. Według danych Eurostatu, aż 85% budynków w UE powstało przed rokiem 2000, z czego 75% charakteryzuje się niską efektywnością energetyczną [99]. W konsekwencji wdrożenie zapisów dyrektywy ma na celu zwiększenie udziału obiektów spełniających rygorystyczne wymagania energetyczne, a tym samym ograniczenie zużycia energii końcowej oraz emisji gazów cieplarnianych.

W budownictwie konwencjonalnym poprawa izolacyjności przegród realizowana jest zazwyczaj poprzez stosowanie dodatkowych warstw termoizolacyjnych, np. systemów ETICS (ang. External Thermal Insulation Composite System)- obejmujących warstwę izolacji, kleje, siatki zbrojące i tynki; okładzin elewacyjnych lub prefabrykowanych przegród warstwowych (płyty warstwowe, w których pomiędzy okładzinami z blachy umieszczona jest warstwa materiału izolacyjnego). Procesy te są wieloetapowe, pracochłonne i wymagają stosowania materiałów pomocniczych. W konsekwencji generują one znaczne ilości odpadów budowlanych, m.in. w postaci docinek materiałów izolacyjnych czy zużytych elementów montażowych [100,101].

Technologia 3DCP proponuje odmienną filozofię kształtowania izolacyjności przegród, polegającą na jej integracji w strukturze elementu już na etapie projektowania i wytwarzania. Dzięki modelowaniu możliwe jest zaprojektowanie wielowarstwowych przekrojów ścian z wypełnieniem o niskiej przewodności cieplnej, kontrolowanymi pustkami powietrznymi bądź zoptymalizowaną geometrią wewnętrzną ograniczającą przewodzenie ciepła. Tego typu rozwiązania umożliwiają znaczną redukcję współczynnika przenikania ciepła U w porównaniu z pełnymi przekrojami, co prowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na energię cieplną bez konieczności stosowania dodatkowych warstw izolacyjnych po wydruku. Dodatkowo, zastosowanie materiałów lekkich bądź porowatych (np. betonów spienionych, mieszanek o obniżonej gęstości) pozwala na obniżenie efektywnej wartości współczynnika przewodności cieplnej λ przy zachowaniu odpowiedniej drukowalności [102–104].

Z punktu widzenia organizacji procesu budowlanego, technologia 3DCP przyczynia się również do ograniczenia odpadów oraz nakładów pracy oferując m.in. precyzyjne dozowanie mieszanki redukujące straty materiałowe. Analizy ekonomiczne i środowiskowe wskazują, iż eliminacja form umożliwia usunięcie strumienia odpadów odpowiadającego w budownictwie tradycyjnym nawet za ok. 23% ogółu odpadów budowlanych. Z kolei zastosowanie technologii druku 3D może ograniczyć ilość odpadów materiałowych nawet

o kilkadziesiąt procent, w zależności od charakterystyki projektu i strategii procesu. Takie uwarunkowania sprawiają, iż 3DCP wpisuje się jednocześnie w cele EPBD (poprawa efektywności operacyjnej) oraz w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), poprzez ograniczenie odpadów procesowych oraz możliwość stosowania mieszanek o obniżonym wskaźniku CCR [105,106].

Praktyczną konsekwencją powyższych uwarunkowań jest możliwość integracji funkcji nośnych i izolacyjnych w jednym, drukowanym elemencie. Osiąga się to poprzez zastosowanie zrównoważonych materiałów (np. zapraw o obniżonym CCR z dodatkami SCM oraz lekkich kruszyw) oraz poprzez projektowanie zoptymalizowanej geometrii przegrody (liczba i układ żeber, grubość warstw, wzór wypełnienia, wielkość pustek powietrznych). Parametry te łącznie determinują zarówno efektywność energetyczną, jak i nośność elementu. Należy przy tym zapewnić równowagę funkcjonalną, obejmującą bezpieczeństwo konstrukcji, trwałość oraz odporność ogniową, a także zgodność z obowiązującymi regulacjami [102,104].

Podsumowując dotychczasowe ustalenia, mimo dynamicznego rozwoju badań nad 3DCP i rosnącej popularności tej technologii, nadal nie uzyskała ona szerokiego zastosowania w praktyce budowlanej. Najistotniejsze wyzwania obejmują:

- brak standaryzacji procedur oceny parametrów procesowych (pumpability, extrudability, buildability, open time) oraz ich jednoznacznego powiązania z właściwościami reologicznymi i kontrolą czasu wiązania,
- niewystarczające rozpoznanie zależności pomiędzy składem mieszanki, parametrami procesu (średnica dyszy, wysokość warstwy, prędkość drukowania, optymalny czas przerwy pomiędzy warstwami) a właściwościami mechanicznymi i adhezją międzywarstwową,
- brak spójnych analiz cyklu życia (LCA) uwzględniających redukcję CCR, wpływ transportu i przygotowania surowców wtórnych oraz kredyty modułu D,
- problemy związane ze skalowaniem procesu i powtarzalnością, wynikające z braku procedur kontroli jakości dla zastosowań przemysłowych oraz braku dedykowanych regulacji i wytycznych projektowych dla elementów drukowanych.

Powyższe uwarunkowania uzasadniają podjęcie w niniejszej pracy programu badawczego integrującego dobór składu mieszanki, parametry procesu technologicznego i geometrię elementu z walidacją mechaniczną, cieplną i środowiskową.

2. Cel i zakres pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz oceny aktualnego stanu wiedzy sformułowano tezy naukowe rozprawy:

Teza 1: Odpowiednie dostosowanie parametrów technologicznych procesu druku umożliwi produkcję prefabrykowanych elementów betonowych metodą druku 3D z wykorzystaniem w mieszankach surowców odpadowych jako dodatków mineralnych, które obniżają udział cementu portlandzkiego oraz ślad węglowy materiału.

Teza 2: Zastosowanie kruszyw lekkich jako częściowego zamiennika piasku kwarcowego pozwala na obniżenie współczynnika przewodności cieplnej materiału, a tym samym poprawę właściwości termoizolacyjnych prefabrykatów wytwarzanych metodą druku 3D.

Teza 3: Zastosowanie technologii druku 3D umożliwia wytwarzanie prefabrykatów o złożonej geometrii, pozwalającej na poprawę parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych.

Celem pracy było opracowanie betonu drobnoziarnistego na bazie cementu portlandzkiego przeznaczonego do zastosowania w procesie druku 3D, a także modyfikacja jego składu w celu redukcji udziału cementu portlandzkiego poprzez częściowe zastąpienie go składnikami mineralnymi będącymi odpadami procesów wysokotemperaturowych: popiół lotny i żużel wielkopieczowy, oraz odpadami rozbiórkowymi (Construction Demolition Wastes, CDW), w postaci kruszonych elementów betonowych, cegły odpadowej, stłuczki szklanej i mieszanego gruzu. Przyjęte podejście pozwala na obniżenie śladu węglowego materiału poprzez zmniejszenie udziału najbardziej energochłonnego składnika betonu, jakim jest cement, oraz jego częściowe zastąpienie surowcami pochodzenia odpadowego.

Ponadto w pracy zweryfikowano możliwość uzyskania materiałów o zwiększonej termoizolacyjności poprzez zastosowanie kruszyw lekkich, które obniżają współczynnik przewodności cieplnej betonu przeznaczonego do druku 3D. Wyniki badań doświadczalnych wykazały, że możliwe jest zastosowanie wypełniaczy w postaci pelitu ekspandowanego, keramzytu i polistyrenu ekspandowanego jako alternatywy dla piasku kwarcowego, co pozwala na poprawę parametrów termoizolacyjnych do 70% w porównaniu z materiałem bazowym.

Praca obejmowała swoim zakresem szeroko pojęte dopracowanie parametrów technologicznych procesu drukowania co wymagało zaprojektowania i wykonania

stanowiska drukującego wraz z głowicą drukującą z ekstruderem typu pompa kawitacyjna lub typu ślimak. Opracowanie infrastruktury badawczej wymagało również zaprojektowania stanowiska do przygotowywania mieszanek, wyposażonego w zestaw mieszający. Weryfikacja parametrów budowlaności, realizowana przez sekwencyjne obciążanie próbki materiału i pomiar jej odkształceń, była realizowana w opracowanym na potrzeby doktoratu stanowisku do symulacji procesu druku. Infrastruktura badawcza obejmowała ponadto zaprojektowanie i wykonanie stanowiska do oceny skurczu materiału drukowanego. Przygotowanie surowców odpadowych do zastosowania w mieszankach przeznaczonych do druku 3D możliwe było dzięki opracowanemu i skonstruowanemu w ramach pracy młynowi kulowemu wraz z zestawem sit, umożliwiającemu homogenizację i odpowiednie frakcjonowanie materiału.

W ramach przeprowadzonych badań dokonano weryfikacji wpływ kluczowych parametrów procesu druku 3D, takich jak konsystencja mieszanki, obecność włókien w mieszance, geometria dyszy, ilość materiału w zbiorniku głowicy oraz prędkość drukowania, na stabilność i powtarzalność wydajności ekstruzji realizowanej przez głowicę wyposażoną w ekstruder ślimakowy. Wyniki analiz umożliwiły określenie współczynników korekcyjnych stosowanych podczas przygotowywania próbek materiałowych oraz wykazały konieczność wyeliminowania włókien z modyfikowanych wariantów mieszanki. Ich obecność powodowała istotne ograniczenie wydajności ekstruzji, wynikające z akumulacji włókien na elementach wykonawczych głowicy drukującej.

W ramach pracy przeprowadzono weryfikację wpływu wybranych parametrów procesu druku 3D, takich jak: wysokość warstwy, średnica dyszy, czas przerwy pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw wydruku na jakość wytwarzanych elementów. Oceniono również wpływ zastosowanej metody wytwarzania, druku 3DCP lub konwencjonalnego formowania, na właściwości wytrzymałościowe elementów, z uwzględnieniem zjawiska anizotropii. Wyniki badań wskazały na konieczność precyzyjnej oceny jakości połączeń międzywarstwowych (spójności warstw). W ramach rozprawy dokonano także weryfikacji metodyki badawczej stosowanej w tym zakresie.

Przeprowadzono również weryfikację wpływu geometrii wewnętrznej ściany drukowanej w technologii 3D na jej właściwości termoizolacyjne. Przeprowadzono analizy numeryczne metodą elementów skończonych (MES) dla autorskich wariantów przegród, wykazując istotny wpływ geometrii na parametry przewodnictwa cieplnego. W celu walidacji modeli wykonano testy doświadczalne na próbkach z polilaktydu (PLA), uzyskując wysoką zgodność wyników z danymi z symulacyjnymi. Potwierdza to

skuteczność zastosowanego podejścia jako narzędzia wspomagającego wstępną optymalizację geometrii elementów budowlanych już na etapie projektowym. Dla pełnej oceny potencjału termoizolacyjnego wskazanych rozwiązań, konieczne jest przeprowadzenie badania przenikania ciepła w elementach wykonanych w skali rzeczywistej.

W celu oceny efektu środowiskowego wynikającego z modyfikacji materiałowych mieszanek przeznaczonych do druku 3D przeprowadzono analizę cyklu życia (Life Cycle Assessment, LCA). Zakres analizy obejmował obliczenia emisji w modułach A1+A2, a także oszacowanie wpływu karbonatyzacji (moduł B) oraz potencjalnych korzyści środowiskowych wynikających z recyklingu (moduł D). Analizie poddano siedem wariantów mieszanek opracowanych w ramach niniejszej rozprawy. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość redukcji śladu węglowego nawet o 50% w porównaniu z mieszanką referencyjną.

Zakres pracy obejmował również opracowanie i wytworzenie prefabrykatów ściennych. Geometria elementów typu A i B została zaprojektowana na podstawie analiz symulacyjnych, ukierunkowanych na poprawę właściwości termoizolacyjnych przegród. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły ponadto realizację elementów małej architektury, co dodatkowo zwiększa wartość aplikacyjną uzyskanych rezultatów poprzez rozszerzenie obszaru ich potencjalnego zastosowania.

Wdrożeniowy charakter rozprawy determinował jej główny cel, którym było opracowanie rozwiązań technologicznych oraz składu mieszanki cementowej z udziałem surowców odpadowych i/lub materiałów pochodzących z recyklingu, umożliwiających ich praktyczne zastosowanie w działalności przemysłowej firmy ATMAT sp. z o.o. Otrzymane wyniki zostały wykorzystane przez partnera przemysłowego stanowiąc podstawę do dalszych prac rozwojowych w obszarze technologii druku 3DCP.

3. Metodyka badawcza

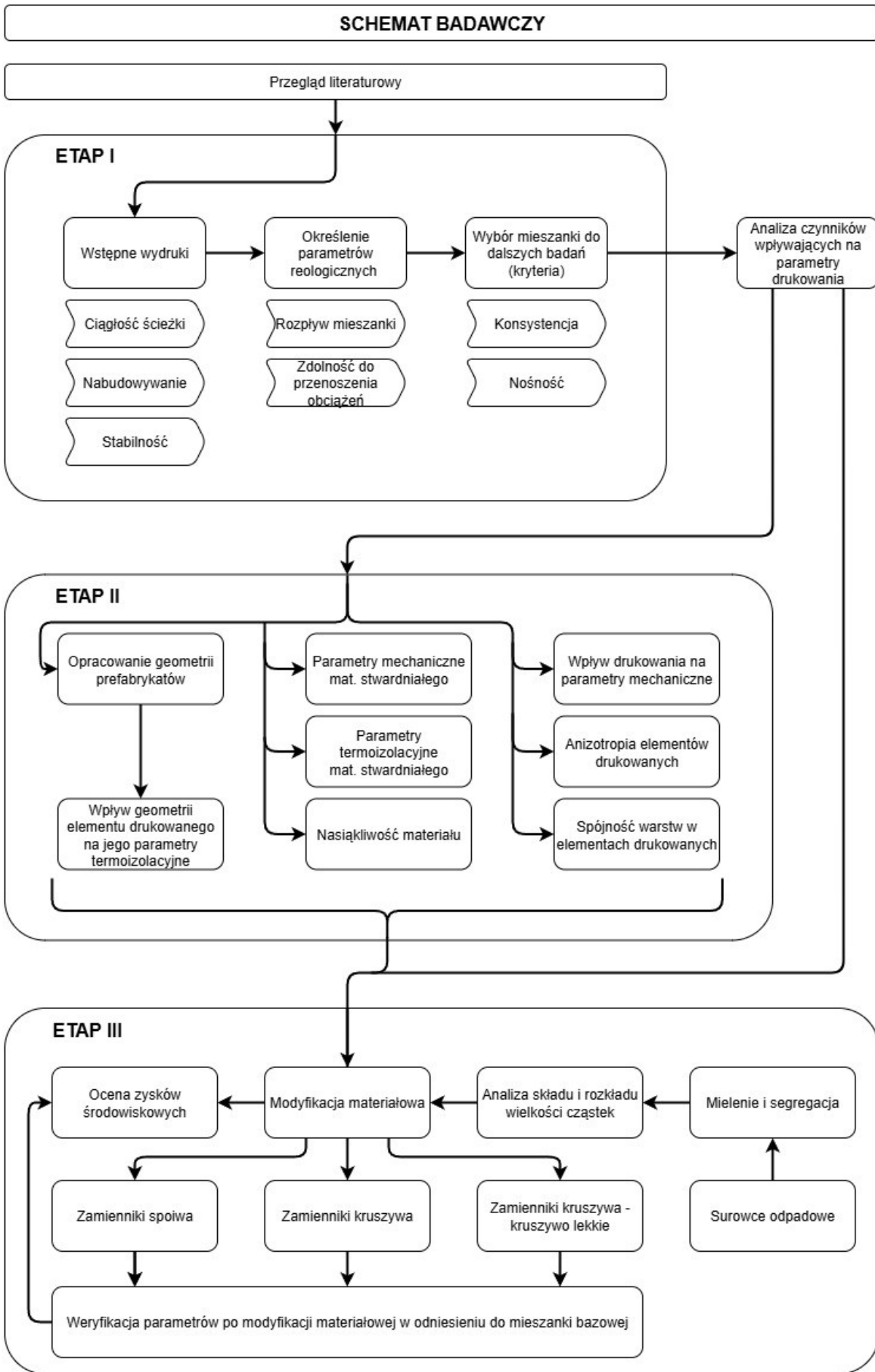
3.1. Przebieg prac

Program badań podzielono na trzy etapy (Rysunek 3):

I/ Opracowanie składu mieszanki na bazie cementu portlandzkiego. Prace w tym etapie obejmowały wyznaczenie właściwości mieszanki świeżej obejmujące głównie parametry reologiczne odnoszące się do mieszanek przeznaczonych do druku 3D (m.in. drukowalność, budowlalność czy czas otwarty). Składy testowanych mieszanek opracowano na podstawie literatury. Przeprowadzone analizy pozwoliły zidentyfikować parametry krytyczne mieszanki do druku 3D oraz samego procesu m.in. budowlalność, stabilność ścieżki, wydajność ekstruzji oraz jej sprzężenie z prędkością druku, wysokością warstwy i rozmiarem dyszy. Ponadto wyznaczono czynniki wpływające na wydajność i stabilność ekstruzji na autorsko opracowanym stanowisku testowym do druku 3DCP. Wyznaczono mierzalne wartości kontrolne mieszanek dedykowanych procesowi 3DCP, m.in. pomiar rozplywu mieszanki oraz pomiar odkształcenia próbek materiałowych poddanych obciążeniu symulującemu ciężar kolejnych nakładanych warstw. Etap ten obejmował również prace projektowe związane z opracowaniem głowicy drukującej.

II/ Analiza właściwości materiału stwardniałego oraz wpływu procesu druku 3DCP na te właściwości. Wykonano próbki drukowane z materiału bazowego i porównano je z próbkami formowanymi metodą konwencjonalną. Zakres badań objął parametry mechaniczne i fizyczne. Parametry próbek drukowanych przeanalizowano również w kontekście strategii procesu druku, poprzez symulację przerwy czasowej pomiędzy kolejnymi drukowanymi warstwami, oraz pod kątem anizotropii parametrów wytrzymałościowych. Etap II obejmował również opracowanie geometrii prefabrykatów ściany i ocenę ich parametrów termoizolacyjnych.

III/ Weryfikacja możliwości modyfikacji składu mieszanki na bazie cementu portlandzkiego przez wprowadzenie surowców odpadowych jako zamienników spoiwa lub kruszywa lub jako dodatków wypełniających zmniejszających gęstość materiału. Wytworzone próbki poddano weryfikacji, porównując je z materiałem referencyjnym, co pozwoliło na określenie potencjalnych korzyści środowiskowych wynikających z zagospodarowania odpadów.



Rysunek 3. Schemat przebiegu prac badawczych w zakresie opracowania materiału do druku 3DCP.

3.2. Zastosowane materiały

W ramach realizowanych badań zastosowano szereg różnego rodzaju materiałów, w których skład wchodziły materiały standardowe, tworzące mieszankę bazową oraz surowce odpadowe zastosowane w badaniach jako dodatki obniżające ślad węglowy i wpisujące się w założenia GOZ.

Do przygotowania mieszanki bazowej stosowano:

- piasek budowlany, kwarcowy o uziarnieniu 0,5-1,4 mm (producent: AXTON),
- cement CEM I 52,5R (Aalborg Portland),
- cement CEM II/A-LL 42,5R-NA (Cemex Vertua Plus),
- cement CEM I 42,5R (Góraźdże Cement S.A. Heidelberg Cement Group),
- mączka wapienna o uziarnieniu 0-0,2 mm (P.W. SIGMA Andrzej Jurecki, Euromar-PL sp. z o.o., Labtar Sp. z o.o.),
- mikrokrzemionka biała G95 (Mikrosilika Trade Natalia Wianecka),
- przyspieszacz wiązania, oparty na azotanie wapnia (SIKA),
- superplastyfikator PCE (SIKA).

Jako zamiennik spoiwa lub kruszywa stosowano surowce odpadowe:

- popiół lotny do betonu (PGE Ekoserwis S.A, z zakładu produkcyjnego PGE Energia Ciepła S.A. w Krakowie),
- popiół lotny (Elektrociepłownie w Wietnamie (3 różne lokalizacje),
- żużel, mieszanka popiołowo-żużłowa (Łęczyńska Energetyka Spółka z o.o. w Bogdance),
- odpad w postaci kruszonych elementów drukowanych 3D z zaprawy cementowej (źródło własne),
- odpadowa stłuczka szklana (pozyskany ze szkła odpadowego na składowisku odpadów budowlanych, uzupełnione odpadem ze szkła opakowaniowego),
- odpad ceglany (pozyskany ze składowiska odpadów budowlanych, Kraków),
- odpad budowlany mieszanych (pozyskany ze składowiska odpadów budowlanych, Kraków).

Natomiast jako lekkie dodatki wypełniające mieszanki, obniżające gęstość materiału, ograniczające ilość stosowanego cementu oraz poprawiające parametry izolacyjne materiału stosowano:

- perlit ekspandowany 0-2,5 mm (Jawar sp. z o.o., Glinojec),

- keramzyt 1-4 mm (Garden Stones, Ages Sp. z o.o., Źródła),
- polistyren ekspandowany (EPS), granulaty 3-4 mm (Sales Craft, Łętownia).

3.3. Przygotowywanie materiałów i mieszanek

Mieszanek bazową przygotowano z wykorzystaniem surowców handlowych, przechowywanych w pomieszczeniu o kontrolowanych warunkach środowiskowych: temperaturze (22 ± 3) °C oraz wilgotności względnej (45 ± 10) %. Surowce te nie wymagały dodatkowej obróbki wstępnej.

Surowce pochodzące z recyklingu poddano wstępnej obróbce granulometrycznej przed ich zastosowaniem w modyfikowanych mieszanek. Ograniczenia dotyczące maksymalnej dopuszczalnej wielkości cząstek wynikały z konieczności zapewnienia swobodnego przepływu materiału przez elementy instalacji podawania w procesie drukowania. Graniczna średnica ziarna dla stosowanej w badaniach drukarki 3DCP wynosiła 5 mm. Frakcje o większych wymiarach poddawano procesowi kruszenia i mielenia (w laboratoryjnym młynie kulowym; pojemność wsadu 10 l; młynki ceramiczne o średnicach 20, 30 i 50 mm; prędkość obrotowa młyna 12 obr/min, czas mielenia ok. 6 h na partię), a następnie klasyfikowano za pomocą sit. Obróbce tej poddano wszystkie surowce recyklingowe, z wyjątkiem popiołu lotnego, który dostarczono bezpośrednio z elektrociepłowni w postaci drobnego pyłu, niewymagającego dodatkowej przeróbki przed wprowadzeniem do mieszanki.

Przygotowanie mieszanek do testów realizowano sukcesywnie według następującego schematu:

- odważanie składników mieszanki dla danej formułacji na wadze laboratoryjnej;
- wstępne mieszanie składników suchych w mieszalniku laboratoryjnym planetarnym (ok. 3 min) oraz przygotowanie składników ciekłych w osobnym zbiorniku (ok. 30 s);
- mieszanie zasadnicze: połączenie mieszanki suchej i ciekłej w mieszalniku planetarnym (ok. 5 min);
- weryfikacja konsystencji na stoliku rozplwowym (wg EN 1015-3) [107];
- załadunek materiału do głowicy drukującej oraz jednoczesne formowanie próbek w formach trójdzielnych (wg EN 196-1) [108]. Po 48h wstępnego utwardzania próbek, pobierano je z pola roboczego drukarki i sezonowano w warunkach: 22 ± 3 °C, i wilgotności względnej 45 ± 10 % przez 28 dni. Analogicznie postępowano z próbkami formowanymi, które po 48h rozformowywano.

W celu ograniczenia degradacji lekkich dodatków izolacyjnych, perlitu ekspandowanego, keramzytu, granulatu EPS, w trakcie mieszania, dodatki te wprowadzano do uprzednio wymieszanej masy w połowie zaplanowanego czasu mieszania.

3.4. Infrastruktura testowa

Badania prowadzono z wykorzystaniem infrastruktury udostępnionej przez partnera przemysłowego, obejmującej zarówno zaplecze do przygotowania mieszanek, jak i dwa stanowiska do druku: urządzenie wielkogabarytowe, będące produktem komercyjnym zaadaptowanym do technologii 3DCP (drukarka ATMAT Saturn) (Rysunek 4a) oraz drukarkę laboratoryjną (Rysunek 4c) opracowaną w toku pracy. W systemie wielkogabarytowym wykorzystanym m.in. do weryfikacji pompowalności badanych mieszanek, zastosowano głowicę z buforowym zbiornikiem o pojemności 5 l oraz ekstruderem typu rotor-stator. Zbiornik umożliwiał zarówno dostarczenie manualne mieszanki bezpośrednio do głowic jak i zintegrowanie jej z urządzeniem mieszająco-pompującym, gdzie pełnił rolę stabilizatora zasilania mieszanką, ograniczając pulsacje, natomiast układ rotor-stator zapewniał wytłaczanie materiału. Drukarka laboratoryjna, zaprojektowana na potrzeby testowania mieszanek do technologii 3DCP, wyposażona była w głowicę z zasobnikiem ok. 20 l (Rysunek 4d) oraz ekstruder ślimakowy (Rysunek 4b). Konfiguracja ta pozwalała na szybkie iteracje receptur, testowanie okna procesowego i precyzyjne dostrajanie parametrów bez konieczności uruchamiania pełnej instalacji.

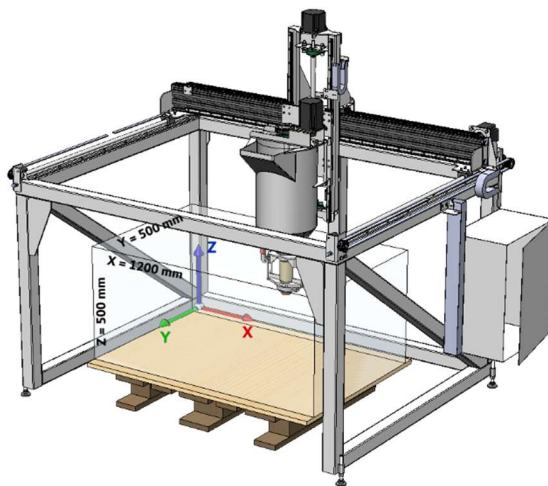
Oba stanowiska oferowały porównywalny zakres sterowania procesem: regulację prędkości drukowania (do 80 mm/s), dobór wysokości warstwy w relacji do średnicy dyszy i reologii mieszanki, a także kontrolę intensywności ekstruzji poprzez dopasowanie wydatku do posuwu. Wymienne zestawy dysz o zróżnicowanej średnicy i geometrii (przekrój kołowy lub prostokątny) umożliwiały kształtowanie przekroju ścieżki materiału zgodnie z założeniami geometrii warstw i wymaganiami reologicznymi. Dla zachowania niezawodności pracy głowic stosowano każdorazowe procedury płukania i czyszczenia po zakończonym cyklu druku.



(a)



(b)



(c)



(d)

Rysunek 4. Infrastruktura do druku 3D w technologii 3DCP stosowana podczas realizacji pracy: a) drukarka ATMAT Saturn zaadaptowana do technologii 3DCP; b) ekstruder typu ślimak opracowany w ramach prac projektowych nad konstrukcją głowicy drukującej; c) model graficzny opracowanego w ramach prac projektowych stanowiska testowego do druku w technologii 3DCP; d) głowica drukująca wchodząca w skład stanowiska testowego do druku 3DCP.

3.5. Zastosowane metody badawcze

Poniżej przedstawiono syntetyczny opis metod badawczych zastosowanych do charakterystyki zarówno surowców, jak i wytworzonych materiałów. Należy podkreślić, że zaprezentowane wyniki są efektem czteroletnich badań, prowadzonych przy zmiennym

dostęp do aparatury - m.in. w związku ze zmianami infrastruktury udostępnianej przez partnera przemysłowego oraz modernizacją wyposażenia badawczo-laboratoryjnego. Prace realizowano w dwóch dyscyplinach, co oznacza, że część pomiarów wykonano w odrębnych jednostkach, dysponujących różnym sprzętem. Szczegółowe protokoły, konfiguracje aparatury oraz przyjęte parametry pomiarowe znajdują się w publikacjach załączonych do rozprawy.

- **Obrazowanie i modelowanie 3D (CAD/MES).**
Geometrie próbek i elementów testowych modelowano w środowisku SolidWorks 2022. Analizy wytrzymałościowe prowadzono w module SolidWorks Simulation (MES). Warunki brzegowe i obciążenia dobierano zgodnie z docelowymi scenariuszami pracy elementów; parametry materiałowe przyjmowano na podstawie wyników badań mechanicznych oraz na podstawie danych literaturowych.
- **Skład chemiczny określono metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej (XRF).**
Analizy wykonano metodą rentgenowskiej fluorescencji przy użyciu spektrometru Bruker S2 PUMA (ED-XRF). Wyniki raportowano w postaci składu tlenkowego (wt.%). Próbki przygotowywano jako proszki jednorodne; stosowano powtarzalny czas akwizycji na liniach analitycznych pierwiastków głównych.
- **Rozkład wielkości cząstek (PSA).**
Zastosowano laserowy analizator dyfrakcyjny Anton Paar PSA 1190 LD (Anton Paar, Graz, Austria). Pomiaru prowadzono w ośrodku ciekłym, przy stałych parametrach dyspersji i odpowiednio dobranych współczynnikach załamania/absorpcji; dla każdego materiału rejestrowano co najmniej trzy przebiegi i raportowano wartości $D_{10}/D_{50}/D_{90}$ oraz krzywe skumulowane.
- **Badania reologiczne i konsystencja.**
Metodyka badawcza opisana w literaturze, dotycząca reologii mieszanek stosowanych w technologii druku 3D, jednoznacznie wskazuje na silną zależność uzyskiwanych wyników od przyjętej procedury pomiarowej. Brak ujednoczonych kryteriów porównawczych stanowi istotne utrudnienie w zakresie doboru adekwatnych narzędzi badawczych. Stolik rozpliwowy stanowi jedną z metod reologicznych (z grupy badań wibracyjnych) charakteryzujący się prostotą wykonania oraz szczególną przydatnością w analizach porównawczych właściwości mieszanek przeznaczonych do druku 3D. W kontekście zastosowań technologii 3DCP, zwłaszcza na etapie badań pilotażowych nad składem mieszanek, metoda stolika rozpliwowego stanowi zatem narzędzie umożliwiające szybką i wstępną klasyfikację mieszanek pod względem ich drukowalności oraz stabilności po

procesie wytłaczania. Właściwości mieszanki świeżej oceniano metodami normowymi: EN 1015-3 [107] (stolik rozplywowy dla zapraw), EN 12350-2 [109] (badanie konsystencji metodą opadu stożka), EN 12350-5 [110] (stolik rozplywowy dla mieszanek betonowych) oraz EN 196-3 [111] (czas wiązania, aparat Vicata). Procedury obejmowały zdefiniowany czas wstępnego mieszania, czasu wiązania, określenie konsystencji oraz wyznaczenie czasu przydatności mieszanki do drukowania (zmiana konsystencji w czasie od zarobienia).

➤ Gęstość (metoda hydrostatyczna).

Gęstość pozorną próbek określano metodą Archimedesesa z wykorzystaniem wagi precyzyjnej Radwag WLC/C2 (RADWAG, Radom, Polska). Rejestrowano masę na powietrzu i masę zanurzeniową w wodzie (20 ± 1 °C); dla każdej serii wykonywano min. trzy powtórzenia, a wyniki przedstawiano w postaci wartości średniej oraz odpowiadającego jej odchylenia standardowego.

➤ Parametry mechaniczne - wytrzymałość na zginanie.

Wytrzymałość na zginanie oznaczano na próbkach o wymiarach $160 \times 40 \times 40$ mm przygotowanych wg EN 196-1 [108] (zginanie trójpunktowe). Do badań użyto maszyn wytrzymałościowych MTS Criterion Model 43 (MTS Systems, Eden Prairie, USA) z oprogramowaniem MTS TestSuite 1.0 oraz ZwickRoell 50 kN (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Niemcy), wyposażonych w dedykowane uchwyty i osprzęt; oprogramowanie testXpert III. Próbkę badano po 28 dniach sezonowania w kontrolowanych warunkach (22 ± 3 °C, (45 ± 10) % wilgotności względnej). Dla każdego wariantu materiałowego badano co najmniej trzy próbki a wyniki przedstawiano w postaci wartości średniej oraz odpowiadającego jej odchylenia standardowego.

➤ Parametry mechaniczne - wytrzymałość na ściskanie.

Ściskanie wykonywano na połówkach belek uzyskanych po teście zginania lub na kostkach $40 \times 40 \times 40$ mm, zgodnie z EN 196-1 [108]. Próbkę badano po 28 dniach sezonowania w kontrolowanych warunkach. Dla każdego wariantu materiałowego badano co najmniej trzy próbki a wyniki przedstawiano w postaci wartości średniej oraz odpowiadającego jej odchylenia standardowego.

➤ Parametry mechaniczne - połączenie międzywarstwowe.

Ocenę jakości połączenia międzywarstwowego prowadzono z wykorzystaniem dwóch metod badawczych. Próby rozciągania realizowano na wydrukach zorientowanych prostopadle do kierunku nanoszenia warstw. Natomiast próby rozciągania przez rozłupywanie realizowano na próbkach ułożonych równoległe do

kierunku nanoszenia warstw. Badania wykonywano po 28 dniach sezonowania próbek w kontrolowanych warunkach (22 ± 3) °C, (45 ± 10) % wilgotności względnej. Pomiary przeprowadzono z co najmniej trzykrotnym powtórzeniem, a wyniki przedstawiano w postaci wartości średniej oraz odpowiadającego jej odchylenia standardowego.

➤ Analiza mikrostruktury (mikroskopia cyfrowa).

Obserwacje powierzchni i przekrojów próbek wykonano przy użyciu mikroskopu cyfrowego Techrebal Banito B2920 (Techrebal, Wilczyce, Polska). Rejestrację obrazu prowadzono za pomocą kamery Techrebal 48 MP, stosując powiększenie $100\times$. Dokumentowano morfologię warstw, strefy międzywarstwowe oraz występowanie defektów takich jak pustki czy rozwarstwienia.

➤ Nasiąkliwość (metoda grawimetryczna).

Nasiąkliwość próbek oznaczano metodą grawimetryczną, określając przyrost ich masy w funkcji czasu kontaktu z wodą, aż do osiągnięcia stanu bliskiego nasyceniu. Pomiary prowadzono z wykorzystaniem wagi precyzyjnej Radwag WLC/C2, w stałych interwałach czasowych, po uprzednim kondycjonowaniu próbek w warunkach laboratoryjnych. Wyniki przedstawiono w postaci nasiąkliwości masowej [%] oraz jako kapilarnego współczynnika absorpcji wody.

➤ Transport wilgoci (termowizja).

Rozkład wilgoci oraz przebieg jej wnikania monitorowano za pomocą kamery termowizyjną FLIR E96, rejestrując mapy temperatury powierzchni próbek podczas testów nasiąkliwości. W trakcie pomiarów utrzymywano stałą emisyjność oraz odległość rejestracji, a akwizycję obrazów prowadzono w równych odstępach czasowych. Na podstawie sekwencji termogramów analizowano zmianę gradientu temperatury traktowaną jako wskaźniki dynamiki transportu wilgoci, porównywanych zestawach próbek w zależności od składu lub sposobu ich wykonania.

➤ Przewodność cieplna (λ).

Współczynnik przewodzenia ciepła λ oznaczono przy użyciu miernika przepływu ciepła FOX 314 (LaserComp, New Castle, USA; nr ser. 1043), zgodnie z EN ISO 8301:1998 [112], EN 12667:2002 [113] oraz ASTM C518-91 [114]. Próbki przed badaniem kondycjonowano w ustalonych laboratoryjnych warunkach środowiskowych. Wyniki opracowywano jako wartości średnie z co najmniej trzech powtórzeń, wraz z odpowiadającym im odchyleniem standardowym.

4. Uzasadnienie połączenia publikacji w cykl

Poniżej przedstawiono uzasadnienie połączenia publikacji w spójny cykl stanowiący załącznik do rozprawy. Logika cyklu wynika z przyjętej ścieżki badawczej, obejmującej kolejne etapy: od doboru materiału, poprzez proces wytwarzania i geometrię wydruków, aż po ocenę ich właściwości mechanicznych oraz termoizolacyjnych.

Etap 1 – Charakterystyka mieszanki bazowej i czynniki procesu druku [P1].

W pierwszym etapie badań zdefiniowano oraz zweryfikowano skład mieszanki bazowej przeznaczonej do technologii 3DCP, a następnie przeanalizowano wpływ kluczowych parametrów procesu, takich jak konsystencja mieszanki, obecność włókien w mieszance, geometria dyszy, ilość materiału w zbiorniku głowicy, prędkość drukowania, na stabilność i powtarzalność wydajności ekstruzji realizowanej przez głowicę wyposażoną w ekstruder ślimakowy.

Nowość naukowa: Wskazanie istotnych czynników determinujących stabilność oraz poziom wydajności ekstruzji w głowicy drukującej ze zbiornikiem materiału i ekstruderem typu ślimak, przy zastosowaniu bazowej mieszanki cementowej.

Mój wkład w powstanie publikacji P1 obejmował: sformułowanie problemu badawczego oraz opracowanie koncepcji i planu badań. Zaprojektowanie programu testów obejmującego warianty mieszanki (P1- Tabela 1, P1- Rysunek 1) i ustawień procesu druku. Przygotowanie i wstępna kontrola jakości mieszanek. Przygotowanie stanowiska pomiarowego, w tym zaprojektowanie osprzętu w postaci części ekstrudera oraz dysz głowicy drukującej (P1- Rysunki 2-4). Organizacja i realizacja serii testów ekstruzji na stanowisku 3DCP. Badanie konsystencji mieszanki cementowej metodą stolika rozpliwowego. Opracowanie narzędzi do akwizycji i przetwarzania danych. Porządkowanie danych oraz przygotowanie opracowań tabelarycznych (P1- Tabele 2-3) i graficznych (P1- Rysunki 5-17) wyników. Interpretacja wyników w kontekście wpływu właściwości materiału i geometrii układu podającego. Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu. Przygotowanie ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.

Etap 2 – Weryfikacja właściwości elementów drukowanych [P2, P3].

Stosując skład mieszanki referencyjnej opracowanej w etapie 1 rozszerzono badania o analizę właściwości mechaniczno-mikrostrukturalnych elementów wytwarzanych metodą 3DCP, porównując je z próbkami formowanymi tradycyjnie. Przeprowadzono ocenę anizotropii wynikającą z warstwowej struktury druku oraz jakości połączenia międzywarstwowego. Dysponując zweryfikowanymi właściwościami mechanicznymi

i charakterystyką połączeń międzywarstwowych, skoncentrowano się następnie na wpływie geometrii wewnętrznej elementów (układ przegród, wzór wypełnienia, obecność pustek powietrznych) na parametry termiczne, w szczególności na współczynnik przenikania ciepła U . Analiza wykazała, że projektowanie geometryczne może zarówno kompensować jak i wzmacniać efekty materiałowe, jednocześnie pozwalając na redukcję zużycie materiału bez konieczności stosowania dodatkowych warstw ocieplenia ETICS.

Nowość naukowa: Scharakteryzowano wpływ procesu druku na właściwości wytwarzanych elementów oraz opisano anizotropię 3DCP w funkcji przerwy czasowej między nakładanymi warstwami. W badaniach połączono parametry procesowe z nośnością oraz jakością połączenia międzywarstwowego, określając zależność parametrów mechanicznych na wydłużenie przerwy czasowej między warstwami. Równolegle przeprowadzono ilościową walidację wpływu wzoru wypełnienia (ang. in-fill) na właściwości termoizolacyjne ścian drukowanych 3D. Opracowano i porównano osiem wariantów geometrii, weryfikując modelowanie CAD/FEM z pomiarami strumienia ciepła w skalowanych próbkach. Pozwoliło to zhierarchizować analizowane warianty względem wartości współczynnika przenikania ciepła U oraz sformułować regułę projektową dotyczącą wydłużania ścieżek przewodzenia ciepła w materiale nośnym. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość osiągnięcia wysokiej izolacyjności termicznej przegród z zastosowanie technologii 3DCP.

Wkład w powstanie publikacji P2 obejmował: sformułowanie problemu badawczego oraz zaprojektowanie metodyki badań ukierunkowanej na ocenę wpływu przerw czasowych między warstwami i kierunku obciążenia na anizotropię właściwości (P2- Rysunki 1-4). Przygotowanie narzędzi programistycznych do akwizycji i przetwarzania danych. Zaprojektowanie i budowa stanowiska do badania skurczu materiału drukowanego (P2- Rysunek 5). Przygotowanie mieszanek oraz kontrola właściwości materiału świeżego metodą stolika rozplýwowego (P2- Tabela 1, P2- Rysunki 6-8). Wykonanie próbek materiałowych (P2- Rysunki 9-12). Organizacja i realizacja badań parametrów mechanicznych na próbkach drukowanych i referencyjnych (P2- Rysunki 13, 15, 17). Opracowanie i nadzór nad danymi pomiarowymi oraz wynikami (P2- Tabele S1-S8, P2- Rysunki 14, 16, 18-22). Walidacja wyników oraz koordynacji pracy. Przygotowanie materiałów graficznych. Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu. Przygotowanie ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.

Wkład w powstanie publikacji P3 obejmował: sformułowanie problemu badawczego oraz opracowanie metodyki postępowania badawczego. Przygotowanie i obsługa

oprogramowania wspierającego obliczenia i analizę danych. Obsługa oprogramowania do projektowania graficznego testowanych geometrii– wykonanie modeli 3D analizowanych wariantów przegród, wymaganych w analizie MES oraz w badaniu doświadczalnym. Wsparcie w doborze parametrów do przeprowadzenia symulacji komputerowej, w tym warunków brzegowych, parametrów materiałów oraz typu i rozmiaru siatki. Realizacja badań oraz interpretacja uzyskanych wyników. Przygotowanie materiałów graficznych obejmujące wizualizacje analizowanych wariantów przegród, tabelaryczne (P3- Tabele 1, 3-7) i graficzne przedstawienie wyników (P3- Rysunki 4-8). Współautorstwo wstępnej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu i redakcji ostatecznej wersji manuskryptu.

Etap 3 – Weryfikacja możliwości modyfikacji materiałowej surowcami odpadowymi [P4, P5].

W ostatnim etapie badań przeanalizowano wpływ wprowadzenia składników odpadowych i lekkich dodatków izolacyjnych jako dodatków do zrównoważonych mieszanek do druku 3DCP. Na podstawie przeglądu literaturowego przeanalizowano możliwości przeprowadzenia modyfikacji materiałowej z zastosowanie surowców odpadowych. Do materiału bazowego dodano surowce wtórne jako substytuty części spoiwa i/lub kruszywa drobnego. Następnie oceniono wpływ tych modyfikacji na drukowalność mieszanki oraz właściwości mechaniczne i termoizolacyjne wytworzonych elementów. Etap ten wykazał, że połączenie materiałów z recyklingu z optymalizacją geometrii elementów umożliwia realną redukcję śladu węglowego przy jednoczesnym zachowaniu wymagań procesu druku oraz funkcjonalności detali.

Nowości naukowe: Usystematyzowanie wiedzy w zakresie stosowanych surowców odpadowych w mieszankach do druku 3DCP. Charakteryzacja autorskich mieszanek przeznaczonych do druku 3DCP zawierających dodatek surowców odpadowych i lekkich dodatków izolacyjnych na parametry procesowe, właściwości mechaniczne i termoizolacyjne elementów drukowanych. Analiza wpływu modyfikacji materiałowej na emisyjność opracowanych mieszanek.

Wkład w powstanie publikacji P4 obejmował: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie koncepcji i planu badań. Opracowanie metodyki postępowania i przygotowanie narzędzi programistycznych do archiwizacji oraz przetwarzania danych. Pozyskanie i obróbka surowców odpadowych poprzez kruszenie, mielenie oraz segregację rozmiarową. Przygotowanie mieszanek z udziałem surowców wtórnych i lekkich dodatków izolacyjnych (P4- Tabele 1-2, P4- Rysunek 1). Kontrola właściwości materiału świeżego przez analizę konsystencji przy pomocy stolika rozplływowego (P4- Rysunek 2). Wykonanie

próbek drukowanych w technologii 3DCP (P4- Rysunek 3). Walidacji przyjętych rozwiązań, przeprowadzenie badań doświadczalnych i kontrola uzyskanych wyników (P4- Tabela 3, P4- Rysunki 5-21, S1-S7). Udział w administracji projektu. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu oraz opracowanie wizualizacji wyników. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.

Wkład w powstanie publikacji P5 obejmował:

Sformułowanie problemu badawczego i określenie zakresu przeglądu. Opracowanie metodyki postępowania i podziału zagadnień. Weryfikacja luk badawczych. Udział w analizie formalnej, pozyskaniu i uporządkowaniu źródeł oraz w kuracji danych. Udział w administracji projektu. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu wraz z opracowaniem rysunków, schematów i zestawień (P5- Tabele 1-11, P5- Rysunki 1-5). Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.

Spójność i komplementarność cyklu.

Każdy kolejny etap badań wykorzystuje wyniki uzyskane w etapach wcześniejszych. Etap 1 dostarczał referencji procesowych oraz podstawowych parametrów opisujących mieszankę do druku 3D. Etap ten zakończył się opracowanie mieszanki bazowej zastosowanej w badaniach w kolejnych etapach. Etap 2 umożliwił ocenę nośności i jakości połączenia międzywarstwowego w elementach drukowanych. Wiedza ta została następnie wykorzystana do projektowania geometrii elementów pod kątem wymagań termoizolacyjnych. W końcowym Etapie 3 wprowadzono składniki odpadowe, zamykając w ten sposób ramę badań obejmującą aspekt materiałowy, procesowy, geometryczny, funkcjonalny oraz środowiskowy. Uzyskane wyniki potwierdzają spójność przeprowadzonych badań oraz dowodzą, że mieszanki na bazie cementu portlandzkiego z dodatkiem surowców z recyklingu obniżających udział cementu portlandzkiego a przez to obniżając ich ślad węglowy, po dostosowaniu parametrów technologicznych procesu druku 3D mogą znaleźć zastosowanie do wytwarzania elementów architektonicznych technologią druku 3DCP.

5. Omówienie uzyskanych wyników badań

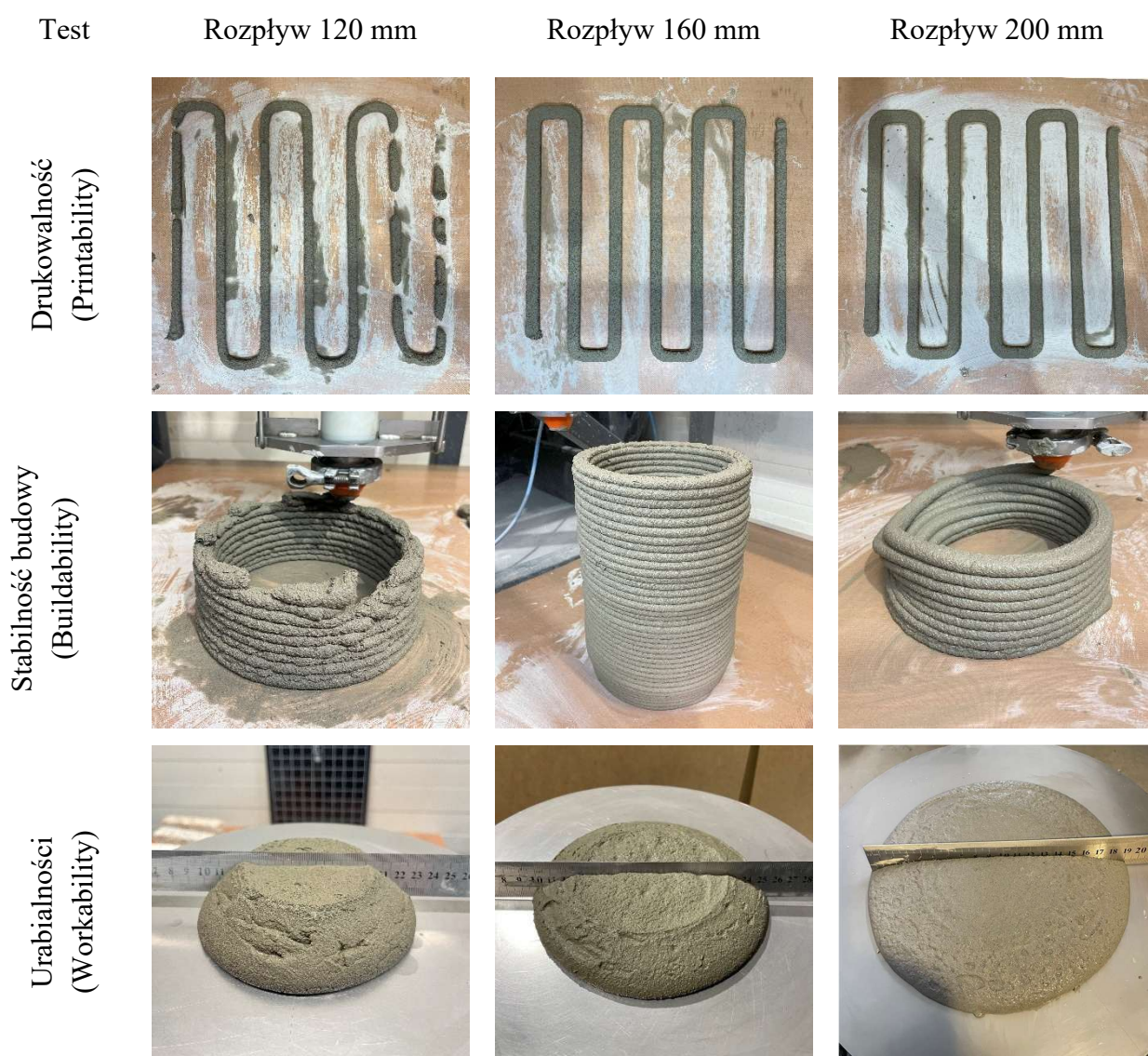
W niniejszym rozdziale w sposób syntetyczny przedstawiono i omówiono uzyskane wyniki badań, porządkując je zgodnie z logiką cyklu publikacji. Zaprezentowano kolejno: (5.1) charakterystykę materiału bazowego; (5.2) parametry procesu druku i ich wpływ na wyznaczenie okna technologicznego; (5.3) właściwości elementów drukowanych, z uwzględnieniem anizotropii i aspektów trwałościowych; (5.4) zależność parametrów termoizolacyjnych od geometrii elementu; (5.5) efekty modyfikacji mieszanki surowcami odpadowymi; oraz (5.6) uwarunkowania wdrożeniowe uzyskanych rezultatów. Szczegółowe dane pomiarowe, opisy procedury badawcze, analizy statystyczne i pełne odniesienia literaturowe zawarto w publikacjach składających się na cykl, dołączonych do rozprawy jako załączniki.

5.1. Charakterystyka materiału bazowego

Na podstawie przeglądu literatury opracowano i zweryfikowano eksperymentalnie mieszankę bazową do technologii 3DCP. Testowano warianty obejmowały następujące zakresy udziałów poszczególnych składników: CEM I 52,5 R – 20-40%, piasek kwarcowy 0-2 mm – 60-75%, mączka wapienna 0-0,2 mm – 0-5%, mikrokrzemionka 0-0,02 mm – 0-5%, superplastyfikator – 0-3%, przyspieszacz wiązania – 0-2%, przy współczynniku w/s w zakresie 0,18-0,35. Konfiguracje dobierano w taki sposób, by uzyskać kompromis pomiędzy ciągłością procesu ekstruzji a zdolnością mieszanki do zachowania nadanego kształtu po wytłoczeniu. Dla każdej receptury wykonano podstawowe badania mieszanki umożliwiające ocenę jej drukowalności. W tym celu przeprowadzano pomiar konsystencji oraz test ścieżki, polegający na wytłoczeniu pasa materiału o długości 3 m i ocenie stabilności geometrycznej, a także obecności ewentualnych defektów i nieciągłości. W celu określenia przydatności mieszanki do budowy wielowarstwowych struktur przeprowadzano ponadto test drukowania walca o średnicy 180 mm i wysokości 300 mm. Uzupełniająco zastosowano symulator druku, odwzorowujący krokowe obciążanie przez kolejne warstwy, co pozwoliło ocenić podatność mieszanki na odkształcenia i osiadanie oraz wyznaczyć graniczną wysokość stabilnej budowy (buildability). Uzyskane wyniki badań oraz testów pilotażowych umożliwiły określenie optymalnego okna drukowalności i opracowanie mieszanki bazowej przeznaczonej do dalszych etapów badań (Tabela 1).

Tabela 1. Skład mieszanki bazowej.

Skład mieszanki	Udział [kg/m ³]
Cement CEM I 52,5 R	470
Piasek kwarcowy (0-2 mm)	1277
Mączka wapienna (0-0,2 mm)	94
Mikrokrzemionka (0-0,02 mm)	38
Superplastyfikator	4.7
Przyspieszacz wiązania	9
Woda	375



Rysunek 5. Wybrane rezultaty testów drukowalności, stabilnej budowy oraz urabialności w zależności od rozpliwu mieszanki.

Przeprowadzone testy dotyczące drukowalności, przydatności mieszanki do stabilnego układania kolejnych warstw oraz urabialności umożliwiły określenie zakresu

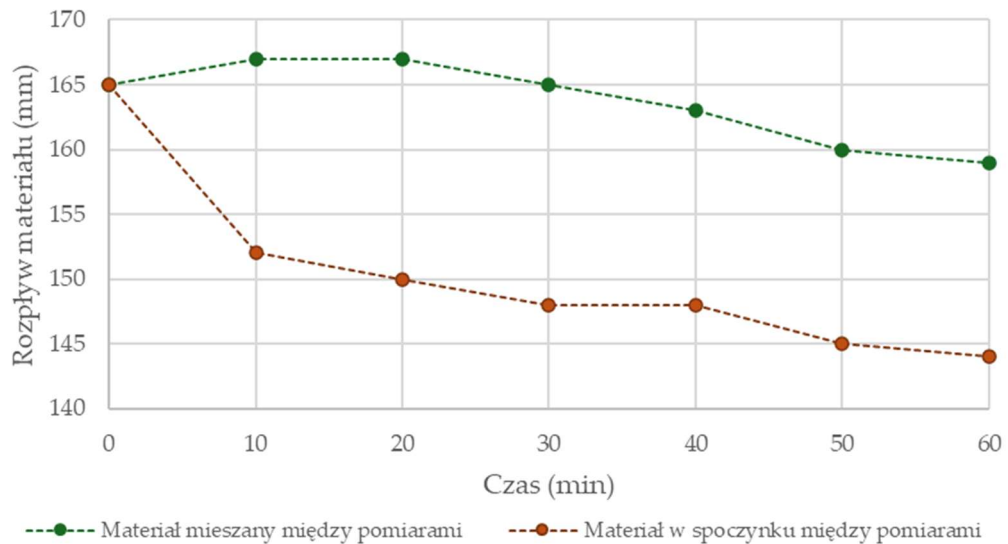
rozpływu mieszanki, który pozwala na skuteczne prowadzenie procesu druku. Stwierdzono, że mieszanka o rozplýwie wynoszącym około 120 mm cechuje się ograniczoną stabilnością ekstruzji, co skutkuje przerwami w ciągłości ścieżki materiału. Natomiast mieszanka charakteryzująca się nadmiernym rozplýwem, mimo poprawnej ekstruzji bez widocznych nieciągłości, wykazuje niewystarczającą przydatność do nadbudowywania kolejnych warstw, co ogranicza stabilność konstrukcji wielowarstwowej.

Chociaż metoda stolika rozplýwowego nie dostarcza bezpośrednich, ilościowych parametrów reologicznych, możliwe jest pośrednie wyznaczenie takich wartości jak granica płynięcia, przy zastosowaniu opracowanych modeli analitycznych oraz zależności między rozplýwem mieszanki a granicą płynięcia. Takie zależności, m.in. przedstawione przez Jayathilakage [115], wskazują, że rozplýw na poziomie 120 mm odpowiada granicy płynięcia wynoszącej 1,89 kPa.

Przeprowadzone pomiary rozplýwu mieszanki w czasie (Rysunek 6a) pozwalają dowodzić, że mieszanka zachowuje odpowiednią urabialność przez ponad godzinę, pod warunkiem zapewnienia ciągłego mieszania materiału przed ekstruzją. Zastosowana aparatura do druku umożliwia realizację tego warunku dzięki obecności mieszadła w zbiorniku głowicy drukującej. Natomiast ten sam materiał pozostawiony w spoczynku (bez mieszania), wykazuje istotne ograniczenie rozplýwu, co jest zjawiskiem pożądanym po ekstruzji, gdyż materiał powinien w tym momencie cechować się szybkim wzrostem stabilności oraz wstępnej wytrzymałości.

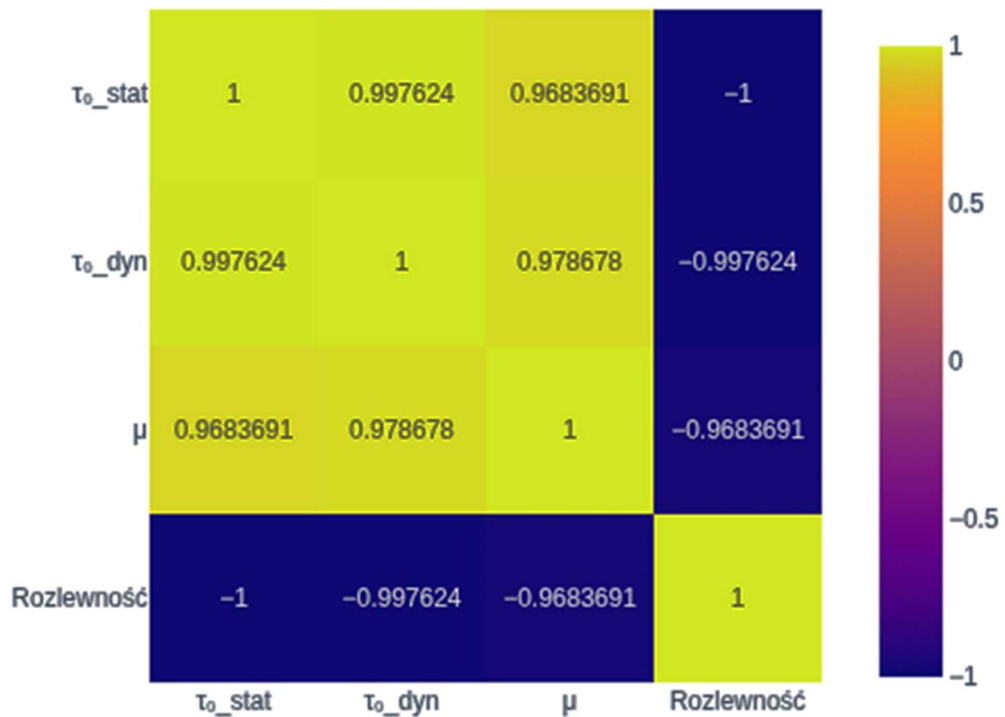
Przeprowadzona analiza (Rysunek 6b) wykazała bardzo silną ujemną korelację pomiędzy rozlewnością mieszanek, a kluczowymi parametrami reologicznymi. Współczynniki korelacji wynoszą odpowiednio:

- dla naprężenia plastycznego statycznego (τ_{0_stat}): -1,00,
- dla naprężenia plastycznego dynamicznego (τ_{0_dyn}): -0,998,
- dla lepkości plastycznej (μ): -0,968.



a)

Macierz korelacji parametrów

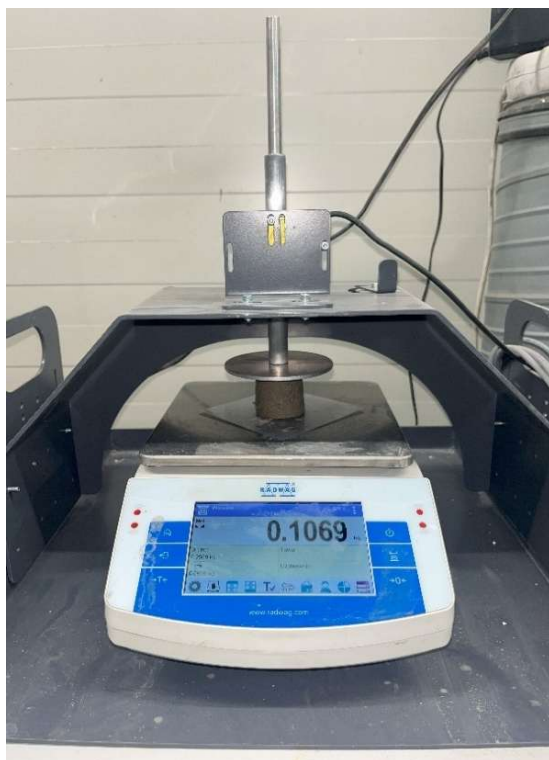


b)

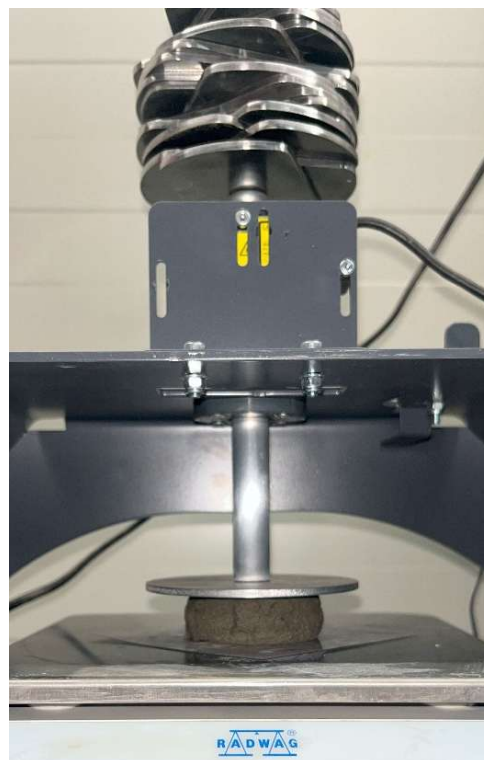
Rysunek 6. a) Zmiana wartości rozpływu materiału (EN 1015-3 [107]) w funkcji czasu uwzględniająca wpływ obecności lub braku mieszania przed ekstruzją; b) Macierz korelacji pomiędzy parametrami reologicznymi (τ_{0_stat} , τ_{0_dyn} , μ) a rozlewnością mieszanek.

Zależności wskazują, że wzrost wartości naprężeń plastycznych oraz lepkości prowadzi do istotnego obniżenia płynności układu, co jest zgodne z mechanizmem zagęszczania struktury zawiesiny i ograniczenia jej zdolności do rozpływu. Wyniki potwierdzają, że kontrola parametrów reologicznych, poprzez dobór wielkości i kształtu cząstek oraz stosunku w/c, ma kluczowe znaczenie dla utrzymania odpowiedniej konsystencji i urabialności mieszanek w czasie.

Weryfikacja budowlaności mieszanki, oprócz prób pilotażowych druku, obejmowała również testy z wykorzystaniem autorskiego stanowiska do oceny odporności materiału na deformacje spowodowane ciężarem kolejnych warstw nakładanych w procesie druku (Rysunek 7). Cylindryczną próbkę o wymiarach $\varnothing 40$ mm i wysokości 40 mm stopniowo obciążano ciężarkami o masie 50 g, co odpowiada obciążeniu generowanemu przez dwie warstwy wydrukowanego materiału (próbka $\varnothing 40$ mm i wysokość 20 mm). Pod wpływem obciążenia, symulującego nacisk kolejnych warstw, próbka ulegała odkształceniu. Do rejestracji deformacji wykorzystano laserowy czujnik odległości Philips HG-C1100-P, połączony ze sterownikiem Beckhoff. Jednocześnie monitorowano siłę działającą na próbkę za pomocą wagi Radwag WLC/C2, na której była ustawiona próbka. Dzięki połączeniu pomiarów odkształceń i siły możliwe było wyznaczenie zależności naprężenie-odkształcenie dla badanych wariantów materiałowych (Rysunek 8).

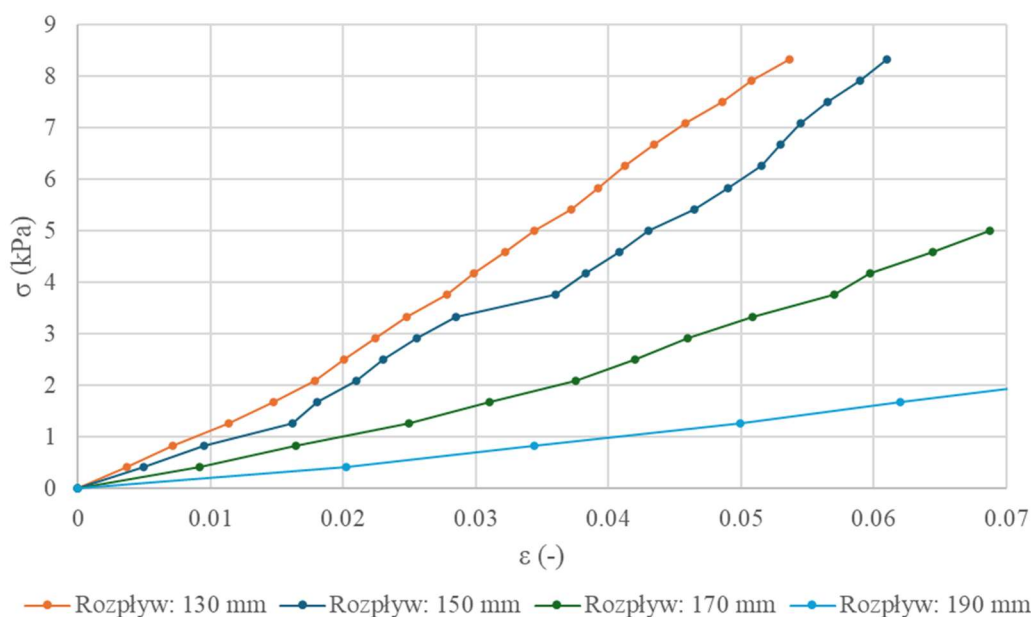


a)



b)

Rysunek 7. Autorski stanowisko do symulacji druku: a) próbka przed testem; b) próbka pod maksymalnym obciążeniem.



Rysunek 8. Zależność naprężeń od odkształceń próbek materiału analizowanych przy użyciu autorskiego symulatorze druku.

Zauważalna jest zależność pomiędzy rozptywem mieszanki a jej wytrzymałością strukturalną. Próbki materiału o rozptywie w zakresie 130-150 mm poddane obciążeniu generującemu naprężenia na poziomie 8 kPa, ulegały odkształceniu rzędu 5-6%. Takie naprężenia odpowiadają obciążeniu jakie wywierałby materiał o wysokości 400 mm (40 warstw po 10 mm). W przypadku mieszanek o większym rozptywie zaobserwowano większe odkształcenia przy analogicznych obciążeniach, co wskazuje na ograniczoną przydatność materiału o takiej konsystencji do nabudowywania kolejnych warstw.

5.2. Parametry procesu druku

Uzyskiwanie powtarzalnych elementów drukowanych na etapie weryfikacji ich parametrów fizycznych i mechanicznych było kluczowe dla uzyskania miarodajnych wyników. W ramach badań prowadzonych pomiędzy etapem I i II, przeprowadzono testy, których głównym celem była szczegółowa analiza czynników, które mają wpływ na wydajność procesu ekstruzji w technologii druku 3D z betonu (3DCP). Wyniki tych badań przedstawiono w publikacji P1.

W obliczu dynamicznego rozwoju tej technologii, jej standaryzacja staje się kluczowa dla bezpiecznego i efektywnego zastosowania w budownictwie. Fundamentalnym aspektem tego procesu jest zapewnienie wysokiej powtarzalności i jakości produkowanych elementów, niezależnie od ich geometrii czy składu mieszanki. Powstanie lokalnych nieciągłości lub defektów może wynikać z niedopasowania wydajności ekstruzji ($Q_{ekstruzji}$) do prędkości ruchu głowicy ($v_{głowicy}$), błędów w recepturze mieszanki lub niewłaściwego

doboru geometrii dyszy. W praktyce obserwuje się zjawiska takie jak „filament tearing” (lokalne rysy i rozerwania powierzchni) oraz „filament splitting” (przerwanie ciągłości całej ścieżki), które można ograniczać poprzez korekcję zależności $Q_{\text{ekstruzji}}-V_{\text{głowicy}}$ lub modyfikacją składu mieszanki [116]. Celem badań było zidentyfikowanie, w jaki sposób najczęściej modyfikowane parametry procesu wpływają na wydajność ekstruzji. Analiza miała na celu eliminację wad strukturalnych, takich jak osłabione połączenia międzywarstwowe, które mogą zagrażać stabilności konstrukcji. Ostatecznym zamierzeniem było opracowanie podstaw do określenia współczynników korygujących, umożliwiających zwiększenie powtarzalności druku i ułatwiających wdrożenie technologii 3DCP w sektorze budowlanym.

Metodyka badawcza opierała się na pomiarze masy wytłaczanego materiału w jednostce czasu przy użyciu laboratoryjnej drukarki 3D oraz precyzyjnej wagi. W eksperymentach zastosowano standardową mieszankę do druku 3D, zgodną z mieszanką bazową opracowaną w etapie I. Przed każdym testem weryfikowano konsystencję mieszanki za pomocą testu na stoliku rozplwowym, dążąc do wartości około 150 mm. Analizowano wpływ czterech kluczowych zmiennych: prędkości obrotowej ekstrudera (37,3, 32,8 oraz 30,0 obr./min), konsystencji mieszanki (rozplw 150 mm vs 130 mm), średnicy dyszy (12 mm i 20 mm) oraz dodatku włókien polipropylenowych (PP) o długościach 6 mm i 12 mm. Procedura obejmowała przygotowanie partii materiału o masie 12 kg (lub 6 kg w testach z włóknami), wymieszanie składników, weryfikację konsystencji, załadowanie mieszanki do zbiornika drukarki i cykliczny pomiar masy wytłaczanego materiału co 20 sekund.

Uzyskane wyniki wykazały, że proces ekstruzji nie jest w pełni stabilny i liniowy, a jego wydajność zależy od wielu czynników. Stwierdzono, że wydajność ekstruzji nie wzrasta proporcjonalnie do prędkości obrotowej ślimaka; przykładowo, przy prędkości 30,0 obr./min spadek wydajności względem wartości oczekiwanej wyniósł 10,5%. Zmiana konsystencji mieszanki miała stosunkowo niewielki wpływ - zmniejszenie rozplwu ze 150 mm do 130 mm spowodowało spadek wydajności o 4,5% (z 12,11 g/s do 11,57 g/s). Znaczący wpływ wykazał natomiast rozmiar dyszy: zmniejszenie średnicy z 20 mm do 12 mm obniżyło wydajność o około 15%, przy czym spadek ten wynosił 14,3% przy wyższej prędkości obrotowej i 17,9% przy niższej.

Największy wpływ na ograniczenie wydajności procesu ekstruzji miał dodatek włókien polipropylenowych, co było związane ze wzrostem spójności i lepkości mieszanki. W przypadku dyszy o średnicy 20 mm spadek wydajności wyniósł od 8,8% do 12,6%, natomiast dla mniejszej dyszy 12 mm był większy i wynosił od 18% do 28%. Dłuższe

włókna (12 mm) powodowały większe ograniczenia w wydajności, co sugeruje ryzyko zapychania układu przy tej konfiguracji. Dodatkowo, przeprowadzone testy pilotażowe z zastosowaniem mieszanek zawierających włókna, obejmujące m.in. próby budowlności (wydruk cylindra), potwierdziły występowanie zjawiska akumulacji włókien na elementach wykonawczych głowicy, w szczególności w obrębie ekstrudera, m.in. na piórach ślimaka oraz łożysku podpierającym ekstruder. Zjawisko to prowadziło do stopniowego zmniejszenia przekroju przepływu mieszanki, co w konsekwencji powodowało dodatkowe obniżenie wydajność ekstruzji.

Istotną obserwacją było również to, że wydajność procesu systematycznie malała wraz z ubywaniem materiału w zbiorniku, a gwałtowne załamanie wydajności następowało, gdy pozostawało w nim mniej niż 4 kg mieszanki. Skutkowało to niskim stopniem wykorzystania wsadu w zbiorniku głowicy drukującej, który wyniósł średnio zaledwie 68%, co oznacza, że około 4 kg materiału jest niezbędne do wypełnienia i zapewnienia odpowiedniego ciśnienia w układzie.

Realizacja badań w zakresie wydajności i stabilności ekstruzji wykazała, że prędkość obrotowa ekstrudera, zmiany konsystencji mieszanki, rozmiar zastosowanej dyszy oraz dodatek włókien zbrojących stanowią krytyczne czynniki determinujące spadki wydajności. Podsumowując, wyniki jednoznacznie wskazują, że dla zapewnienia druku wysokiej jakości, powtarzalnych elementów o zróżnicowanej geometrii i z różnych materiałów, konieczne jest zdefiniowanie i wdrożenie odpowiednich współczynników korekcyjnych ekstruzji. Przykładem jest wprowadzenie w stanowisku testowym współczynnika o wartości 1,15 (wprowadzany jest podczas przygotowania parametrów procesu druku - przygotowanie g-code), podnoszącego zadaną wydajność ekstruzji w celu kompensacji strat wynikających ze zmiany dyszy drukującej z rozmiaru 20 na 12 mm. W celu zapewnienia powtarzalności procesu drukowania, na dalszym etapie badań przyjęto strategię drukowania obejmującą utrzymywanie wypełnienia zbiornika głowicy powyżej 15% objętości całkowitej. Wyniki badań wykazały również konieczność wyeliminowania włókien w modyfikacjach materiałowych, ze względu na znaczące ograniczenie wydajności ekstruzji spowodowane ich akumulacją na elementach wykonawczych głowicy drukującej.

5.3. Parametry elementów drukowanych

Kolejnym etapem po opracowaniu bazowej mieszanki oraz ustaleniu powtarzalnych parametrów procesu drukowania było zweryfikowanie wpływu techniki wytwarzania elementów na ich parametry mechaniczne. Głównym celem badań była ocena wpływu

procesu drukowania oraz zastosowanych przerw czasowych między nakładaniem kolejnych warstw na właściwości mechaniczne i anizotropię elementów drukowanych. Badania obejmowały również porównanie różnych metod testowania mechanicznego w kontekście oceny jakości wiązania międzywarstwowego w warunkach symulujących druk na dużą skalę. Analiza mechanizmów powstawania i degradacji wiązań międzywarstwowych stanowi kluczowy kierunek badań nad anizotropią struktur drukowanych.

Badania przedstawione w publikacji P2, przeprowadzono z zastosowaniem mieszanki bazowej. Konsystencję świeżego materiału weryfikowano za pomocą stolika rozplwowego zgodnie z normą EN 1015-3 [107], uzyskując średnicę rozplwu na poziomie 165 mm, co zapewniało stabilne wytłaczanie.

Próbki do badań wykonano dwiema metodami: drukiem 3D oraz tradycyjnym formowaniem (odlewaniami) w formach zgodnych z normą EN 196-1 [108], co umożliwiło ocenę wpływu samego procesu drukowania na właściwości końcowe materiału. Próbki drukowane przygotowano w trzech wariantach różniących się przerwą czasową między nakładaniem kolejnych warstw: brak przerwy, 25 minut i 50 minut. Dobór tych interwałów oparto na oszacowaniu czasu potrzebnego do wydrukowania jednej warstwy ścian budynku o powierzchni około 80 m² przy zastosowaniu dyszy 40 mm i prędkości druku 50 mm/s.

Po 28-dniowym okresie dojrzewania w kontrolowanych warunkach (22 ± 2 °C), próbki przycięto do wymiarów wymaganych dla testów mechanicznych (40x40x160 mm do badania zginania i 40x40x40 mm do badania ściskania) i poddano badaniom wytrzymałościowym na maszynie ZwickRoell 50 kN, obejmującym:

- Wytrzymałość na zginanie (metoda trójpunktowa).
- Wytrzymałość na ściskanie.
- Wytrzymałość na rozciąganie osiowe (bezpośrednie).
- Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (metoda brazylijska).

Dla próbek drukowanych testy przeprowadzono w dwóch kierunkach obciążenia: prostopadłym i równoległym do płaszczyzny warstw, aby zbadać anizotropię właściwości. Wyniki badań przedstawiono w trzech głównych aspektach:

- a) Wpływ procesu drukowania na właściwości próbek (porównanie próbek formowanych i drukowanych).

Porównanie właściwości próbek wykonanych metodą tradycyjnego formowania i druku 3D pozwoliło na ocenę wpływu samego procesu produkcyjnego:

- Gęstość: Średnia gęstość próbek formowanych wyniosła 1969 kg/m³, natomiast próbek drukowanych była o około 2,5% niższa i wynosiła 1919 kg/m³. Różnica ta wynika z obecności mikroporów i pustek międzywarstwowych powstających podczas nakładania warstw bez dodatkowego zagęszczania mechanicznego.
- Wytrzymałość na ściskanie: Zaobserwowano największą różnicę między próbkami formowanymi a drukowanymi. Próbki formowane osiągnęły średnią wytrzymałość na ściskanie 35,77 MPa, natomiast próbki drukowane uzyskały wartości 3-4 razy niższe, w zakresie 7,65-9,31 MPa, w zależności od orientacji i przerwy czasowej między nakładaniem kolejnej warstwy. Redukcja wytrzymałości na ściskanie jest charakterystyczna dla technologii 3DCP i wynika z braku pełnej spójności strukturalnej, obecności porów oraz osłabionych stref międzywarstwowych.
- Wytrzymałość na zginanie: Średnia wytrzymałość na zginanie próbek formowanych wyniosła 4,34 MPa. Dla próbek drukowanych bez przerwy czasowej (0 min) i badanych w kierunku prostopadłym do warstw odnotowano nieznacznie wyższą średnią wytrzymałość - 4,76 MPa, co mogło wynikać z niedostatecznego zagęszczenia materiału w próbkach formowanych. Natomiast, próbki drukowane badane równoległe do warstw wykazały znacznie niższą wytrzymałość, średnio 2,55 MPa dla 0 min, czyli o około 60% niższą w porównaniu do próbek formowanych.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że proces drukowania 3D znacząco obniża wytrzymałość materiału na ściskanie, o 70-75%, w porównaniu do tradycyjnego formowania. Wpływ procesu na wytrzymałość na zginanie jest zależny od kierunku obciążenia: przy obciążeniu prostopadłym do warstw wartości są porównywalna z próbkami formowanymi, natomiast przy obciążeniu równoległym wytrzymałość jest istotnie niższa. Różnice te wskazują, że jakość wiązania międzywarstwowego oraz geometria przekroju (liczne przewężenia w próbkach drukowanych) mają kluczowe znaczenie dla nośności elementów.

b) Anizotropia właściwości elementów drukowanych

Anizotropia, czyli zależność właściwości materiału od kierunku badania próbki, jest jedną z głównych wad struktur wytwarzanych metodami addytywnymi. W badaniach anizotropię oceniano poprzez porównanie wyników testów wytrzymałościowych w kierunkach prostopadłym i równoległym do warstw wydruku, uzyskując następujące rezultaty:

- Wytrzymałość na zginanie: Parametr ten wykazał najbardziej wyraźną anizotropię. Dla próbek drukowanych bez przerwy czasowej (0 min), średnia wytrzymałość w kierunku prostopadłym wyniosła 4,76 MPa, natomiast w kierunku równoległym zaledwie 2,55 MPa, co oznacza spadek o około 60%.
- Wytrzymałość na ściskanie: Anizotropia była mniej wyraźna pod względem wartości wytrzymałości. Dla próbek bez przerwy czasowej, średnia wytrzymałość w kierunku prostopadłym wyniosła 9,24 MPa, a w kierunku równoległym 9,31 MPa. Pomimo zbliżonych wartości, mechanizmy zniszczenia były odmienne: próbki obciążane prostopadłe pękały w losowych kierunkach, natomiast te obciążane równolegle ulegały zniszczeniu głównie wzdłuż połączeń międzywarstwowych.

Wyniki te potwierdzają, że materiał drukowany wykazuje silną anizotropię, bezpośrednio związaną z warstwowym charakterem procesu produkcji. Największą anizotropię obserwuje się w wytrzymałości na zginanie, co czyni ten parametr kluczowym wskaźnikiem do oceny spójności strukturalnej elementów w praktycznych zastosowaniach 3DCP. Wytrzymałość na ściskanie jest mniej wrażliwa na kierunek obciążenia pod względem wartości, jednak mechanizm zniszczenia pozostaje zależny od orientacji warstw.

c) Wpływ czasu pomiędzy warstwami na właściwości wydruków

Jednym z kluczowych parametrów procesowych jest czas przerwy między nakładaniem kolejnych warstw. Wydłużenie tego czasu może prowadzić do powstawania tzw. "zimnych złączy" na skutek utraty wilgoci z powierzchni poprzedniej warstwy, co osłabia wiązanie międzywarstwowe i przekłada się na obniżenie parametrów mechanicznych całej struktury. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- Wytrzymałość na zginanie (kierunek prostopadły do warstw): Zaobserwowano wyraźny spadek wytrzymałości wraz ze wzrostem przerwy czasowej. Średnia wartość spadła z 4,76 MPa (0 min) do 4,39 MPa (25 min) i 3,56 MPa (50 min). Wydłużenie przerwy do 50 minut spowodowało spadek wytrzymałości o 25% w porównaniu do próbek drukowanych bez przerw.
- Wytrzymałość na zginanie (kierunek równoległy do warstw): W tym kierunku wartości wytrzymałości pozostawały prawie stałe niezależnie od przerwy czasowej: 2,55 MPa (0 min), 2,23 MPa (25 min) i 2,55 MPa (50 min). Oznacza to, że wytrzymałość na zginanie w tej orientacji jest w większym stopniu determinowana właściwościami samej mieszanki, a nie jakością połączeń międzywarstwowych wnikającą z przerwy czasowej pomiędzy kolejnymi warstwami.

- Wytrzymałość na ściskanie: W kierunku prostopadłym średnia wytrzymałość spadła z 9,24 MPa (0 min) do 8,15 MPa (25 min) i 7,65 MPa (50 min), co stanowi redukcję o około 17%. W kierunku równoległym spadek był łagodniejszy: z 9,31 MPa (0 min) do 8,95 MPa (25 min) i 8,36 MPa (50 min), czyli około 10%.
- Wytrzymałość na rozciąganie (bezpośrednie): Ten test okazał się najbardziej wrażliwy na jakość wiązania międzywarstwowego. Średnia wytrzymałość zmniejszyła się z 1,31 MPa (0 min) do 0,77 MPa (25 min), co oznacza redukcję o ponad 40%. Wynik ten wskazuje na krytyczny punkt utraty przyczepności spowodowanej wysychaniem powierzchni poprzedniej warstwy.
- Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (metoda brazylijska): Redukcja była bardziej umiarkowana i równomierna. Średnia wytrzymałość obniżyła się z 1,26 MPa (0 min) do 1,07 MPa (25 min) i 1,01 MPa (50 min), co stanowi spadek o około 20%.
- Analiza strukturalna: Badania przekrojów próbek potwierdziły powyższe obserwacje. Próbkę drukowaną bez przerwy czasowej charakteryzowały się zwartą strukturą. Wzrost przerwy do 25 i 50 minut skutkowało zwiększeniem liczby porów i pojawieniem się nieciągłości, takich jak mikropęknięcia i separacje na granicach warstw, świadczących o pogorszeniu spójności strukturalnej.

Wydłużenie przerwy czasowej między nakładaniem warstw wyraźnie obniża większość właściwości mechanicznych, szczególnie w kierunku prostopadłym do nakładanych warstw. Aby zapewnić wysoką jakość i bezpieczeństwo konstrukcji drukowanych z betonu, czas przerwy między nałożeniem kolejnej warstwy powinien być minimalizowany (z zachowaniem odpowiedniego tempa przyrostu konstrukcji, wynikającego z budowlanością zastosowanego materiału), szczególnie gdy wymagana jest wysoka wytrzymałość w kierunku prostopadłym do warstw.

5.4. Wpływ geometrii elementu na parametry termoizolacyjne

Wraz z intensywnym rozwojem technologii 3DCP, rośnie potrzeba projektowania geometrii przegród budowlanych, które jednocześnie minimalizuje zużycie materiałów (szczególnie cementu portlandzkiego, którego produkcja jest istotnym czynnikiem negatywnie wpływającym na środowisko) oraz zapewnia wysoką izolacyjność termiczną. Analizowano właściwości zintegrowanego elementu ściennego, łączącego funkcję nośną i termoizolacyjną w ramach jednego, zautomatyzowanego procesu wytwarzania. Tradycyjne technologie budowlane wymagają montażu dodatkowej warstwy izolacyjnej, na ścianach

zewnątrznych, co zwiększa pracochłonność, generuje odpady i podnosi koszty. Technologia 3DCP umożliwia eliminację tego etapu dzięki zastosowaniu złożonej geometrii wewnętrznej. Celem badań było zaprojektowanie i ocena takich wewnętrznych wzorów wypełnienia przegrody, pozwalających osiągnąć wymagany przez polskie przepisy budowlane (WT 2021) wartość współczynnika przenikania ciepła $U_{c(max)}$ na poziomie 0,20 W/(m²K), bez konieczności zwiększania obrysu budynku.

W badaniach przedstawionych w publikacji P3 wykorzystano zarówno symulacje komputerowe, jak i weryfikację eksperymentalną. Prace obejmowały projektowanie graficzne wraz z analizą udziału materiału nośnego w objętości przegrody. Opracowano osiem autorskich koncepcji geometrii wypełnienia przegrody pionowej. Głównym założeniem projektowym było maksymalne wydłużenie drogi przepływu ciepła przez materiał nośny (beton), co pozwalało ograniczyć powstawanie mostków termicznych.

Uzyskane wyniki symulacji MES dla wariantu z betonem jako materiałem nośnym wskazały, że najlepszą izolacyjność termiczną zapewniał wariant 6, osiągając współczynnik przenikania ciepła $U = 0,183$ W/m²K. Geometryczna konfiguracja tego wariantu, przypominająca połączenie pustaka z warstwą izolacyjną, skutecznie redukowałą mostki termiczne dzięki eliminacji bezpośrednich połączeń między powierzchnią wewnętrzną a zewnętrzną w przekroju przegrody. Drugi w kolejności pod względem izolacyjności był wariant 7 z wartością $U = 0,238$ W/m²K, natomiast wariant 5, charakteryzujący się silnie pofałdowanym wypełnieniem, wykazał najgorsze właściwości izolacyjne ($U = 0,3415$ W/m²K). Różnica w wartości współczynnika U między najlepszym a najgorszym rozwiązaniem wyniosła 61%. Wyniki badań eksperymentalnych z zastosowaniem próbek wykonanych z PLA potwierdziły hierarchię wyników z symulacji (wartości uzyskane eksperymentalnie były wyższe średnio o 6,5% od wartości z symulacji).

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ geometrii wewnętrznej ściany drukowanej w technologii 3D na jej izolacyjność termiczną. Odpowiednie projektowanie wzorów wypełnienia pozwala znacząco ograniczyć straty ciepła. Według przeprowadzonej analizy MES, wariant 6 może spełniać wymagania polskiego prawa budowlanego, określające maksymalną wartość współczynnika przenikania ciepła na poziomie 0,2 W/m²K. Dla pełnego potwierdzenia potencjału termoizolacyjnego takiego wariantu geometrii, konieczne jest przeprowadzenie badania przenikania ciepła elementu wykonanego w skali rzeczywistej, co będzie przedmiotem dalszych badań w tym obszarze. Przeprowadzone testy i uzyskana zgodność wyników symulacji MES z pomiarami eksperymentalnymi dla próbek wykonanych z PLA potwierdzają, że analiza komputerowa stanowi wiarygodne i skuteczne

narzędzie wstępnej optymalizacji geometrii elementów budowlanych na etapie projektowania.

5.5. Modyfikacja materiału surowcami odpadowymi

Kolejnym etapem badań była modyfikacja materiałowa mieszanek do druku 3D oraz ich weryfikacja pod kątem możliwości ekstruzji, właściwości mechanicznych oraz termoizolacyjnych. Głównym celem prowadzonych badań była ocena potencjału zastąpienia konwencjonalnych składników mieszanek 3DCP materiałami pochodzącymi z recyklingu. Badania koncentrowały się na dwóch kierunkach:

1/ Zastąpienie części kruszywa naturalnego odpadami budowlanymi i przemysłowymi, takimi jak: zmielone odpady z druku 3D, gruz ceglany, stłuczka szklana, mieszany gruz budowlany, popiół lotny (FA) i mielony granulowany żużel wielkopiecowy (GGBFS).

2/ Zastosowanie lekkich dodatków izolacyjnych, obejmujących perlitu ekspandowanego, keramzytu (LECA) i spienionego polistyrenu (EPS), w celu redukcji gęstości mieszanek oraz poprawy właściwości termoizolacyjnych drukowanych elementów.

W badaniach przedstawionych w publikacji P4 wykorzystano mieszankę referencyjną na bazie cementu portlandzkiego CEM I 52.5R, opracowaną w etapie I, którą modyfikowano poprzez częściowe zastąpienie kruszywa naturalnego różnymi materiałami z recyklingu w ilości 20% i 40% masowo. W przypadku lekkich wypełniaczy, stosowano różne poziomy dozowania w celu uzyskania coraz niższej gęstości elementu.

Analiza uziarnienia materiałów z recyklingu przeprowadzona za pomocą laserowego analizatora wykazała, że popiół lotny (FA) i zmielone odpady z druku 3D charakteryzowały się wąskim rozkładem cząstek ($D_{50} = 15\text{-}26 \mu\text{m}$), co przekładało się na stabilną konsystencję mieszanek modyfikowanych tymi dodatkami. Z kolei stłuczka szklana, mieszany gruz i żużel wykazywały szerszy rozkład ziaren, co według literatury mogło zwiększać ryzyko problemów z ekstruzją. Mimo różnic w uziarnieniu, wszystkie mieszanki mieściły się w oknie drukowalności, a rozptyw mieszanki referencyjnej wynosił ok. 165 mm (EN 1015-3). Większość dodatków z recyklingu powodowała jego zmniejszenie (najbardziej gruz ceglany - poniżej 150 mm), natomiast stłuczka szklana zwiększała rozptyw do ok. 170 mm.

Właściwości mechaniczne próbek modyfikowanych materiałami wtórnymi zależały od rodzaju użytego surowca. Dla próbek drukowanych badania na ściskanie wykonywano w kierunku prostopadłym i równoległym do warstw wydruku w celu oceny anizotropii

materiału. Wytrzymałość na zginanie w większości przypadków malała po dodaniu surowców wtórnych, z wyjątkiem mieszanki z mieszanym gruzem (T2-4), która osiągnęła 5,72 MPa. Największy spadek, o ok. 60%, odnotowano dla dodatków ceglanych. Wytrzymałość na ściskanie wzrosła w mieszankach o szerszym uziarnieniu (15,5-16,0 MPa), co tłumaczono lepszym upakowaniem cząstek. Typowa dla druku 3D anizotropia właściwości mechanicznych była zauważalna - wytrzymałość na ściskanie przy obciążeniu prostopadłym do warstw była o 13% wyższa niż przy obciążeniu równoległym.

Analiza nasiąkliwości wykazała, że mieszanki z surowcami wtórnymi generalnie charakteryzowały się niższym przyrostem masy próbek w czasie. Najniższą nasiąkliwość wykazały próbki z mieszanym gruzem ($1,12-1,25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) oraz ze stłuczką szklaną ($1,35-1,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$).

W ramach badań nad termoizolacyjnością materiału drukowanego przygotowano dziewięć receptur z lekkimi wypełniaczami, dostosowując ich udział do zachowania drukowalności. Dodatek lekkich materiałów znacząco poprawiał izolacyjność kosztem wytrzymałości mechanicznej. EPS obniżył przewodność cieplną do $0,271 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (redukcja ok. 71%) przy gęstości 890 kg/m^3 , jednak wytrzymałość na zginanie spadła do $0,62 \text{ MPa}$, a na ściskanie do $1,3 \text{ MPa}$. Keramzyt (LECA) zapewniał najlepszy kompromis, osiągając wytrzymałość na ściskanie $9,41 \text{ MPa}$ i przewodność cieplną $0,535 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, a perlit prezentował właściwości pośrednie.

Mieszanki z lekkimi dodatkami cechowały się wyższą i dłużej utrzymującą się nasiąkliwością wodną - średnie wartości po 24 h były znacząco wyższe niż w przypadku mieszanek z recyklingu ($>2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) i próbki referencyjnej. Najwyższą nasiąkliwość odnotowano dla perlitu przy największym udziale (średnio $4,89 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$), co związane było z kruszeniem się cząstek i otwieraniem porów. Analiza mikrostrukturalna wykazała, że ziarna perlitu nie miały ostro zarysowanych krawędzi, natomiast keramzyt cechował się wyraźnymi krawędziami i otwartą strukturą, umożliwiającą penetrację matrycy cementowej. Granulat EPS wypełniał znaczną część przekroju próbki, jednak obserwowano mikropęknięcia na granicy faz, powstałe wskutek niskiej przyczepności hydrofobowej, co negatywnie wpływało na wytrzymałość elementów.

W ramach badań nad zastosowaniem surowców odpadowych w mieszankach przeznaczonych do technologii druku 3D przeprowadzono również eksperyment obejmujący zastosowanie popiołu lotnego jako częściowego substytutu cementu portlandzkiego (15%) oraz gruzu ceglanoego jako zamiennika kruszywa drobnego (20%). Wprowadzone modyfikacje skutkowały obniżeniem wartości rozplywu mieszanki do

poziomu 140-150 mm, mieszczącego się w zakresie uznawanym za optymalny dla technologii przyrostowego wytwarzania elementów betonowych, co umożliwiło prawidłowe wykonanie próbek badawczych. Dla każdego wariantu materiałowego przygotowano zarówno próbki formowane konwencjonalnie, jak i próbki drukowane.

Pomiary nasiąkliwości wykazały jej wzrost zarówno w przypadku mieszanek z dodatkiem gruzu ceglanego, jak i popiołu lotnego. Jednocześnie stwierdzono, że próbki wytworzone techniką druku 3D charakteryzowały się istotnie wyższą nasiąkliwością w porównaniu z próbkami odlewanyymi, niezależnie od składu mieszanki. Zjawisko to należy wiązać z anizotropową mikrostrukturą materiału drukowanego, zwiększoną porowatością oraz obecnością osłabionych wiązań międzywarstwowych, które tworzą preferencyjne ścieżki dla migracji wody. Różnice te zostały jednoznacznie potwierdzone metodą grawimetryczną oraz przy zastosowaniu termografii w podczerwieni (kamera termowizyjna FLIR E96).

Analiza wytrzymałości mechanicznej wykazała, że wprowadzenie popiołu lotnego jako substytutu cementu w ilości 15% oraz gruzu ceglanego jako zamiennika kruszywa drobnego w ilości 20% spowodowało wyraźny spadek właściwości mechanicznych badanych kompozytów. Wytrzymałość na zginanie próbek modyfikowanych była o około 50% niższa w stosunku do materiału referencyjnego i kształtowała się średnio na poziomie 2,05 MPa w przypadku próbek formowanych oraz 1,75 MPa w przypadku próbek drukowanych. Podobną zależność zaobserwowano dla wytrzymałości na ściskanie, która uległa redukcji o około 30% względem mieszanki bazowej, osiągając wartości 9,7 MPa dla próbek formowanych i 6,5 MPa dla próbek drukowanych. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na niekorzystny wpływ zastosowanych modyfikacji na właściwości mechaniczne mieszanek cementowych przeznaczonych do technologii 3DCP. Redukcja wytrzymałości była szczególnie wyraźna w odniesieniu do próbek drukowanych, co potwierdza kluczową rolę kontroli procesu i jego roli na anizotropię oraz słabych wiązań międzywarstwowych w kształtowaniu wytrzymałości wytwarzanych elementów.

Badania jednoznacznie wykazały, że możliwe jest skuteczne włączenie niereaktywnych składników z recyklingu oraz lekkich wypełniaczy izolacyjnych do mieszanek przeznaczonych do druku 3D bez utraty drukowalności. Kluczowym czynnikiem dla zamienników kruszywa jest kontrola uziarnienia; wąskie rozkłady cząstek są korzystniejsze dla reologii mieszanki i ograniczają zapotrzebowanie na wodę. Lekkie wypełniacze poprawiają izolacyjność termiczną, jednak odbywa się to kosztem właściwości mechanicznych. Keramzyt (LECA) zapewnia optymalny kompromis między

wytrzymałością a izolacyjnością, natomiast EPS cechuje się najlepszymi właściwościami termoizolacyjnymi, lecz powinien być stosowany głównie w elementach nienośnych z uwagi na słabą przyczepność do matrycy cementowej. Porównanie próbek drukowanych i odlewanych potwierdziło, że technologia druku 3D prowadzi do powstania materiału o wyższej anizotropii, niższej wytrzymałości oraz większej nasiąkliwości wodnej, wynikającej z obecności porowatych połączeń międzywarstwowych. W projektowaniu konstrukcyjnym należy uwzględniać najslabszy kierunek obciążenia, tj. równoległy do warstw wydruku. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość tworzenia bardziej zrównoważonych materiałów budowlanych, ograniczających zużycie surowców naturalnych i redukujących wpływ budownictwa na środowisko.

W celu weryfikacji efektu środowiskowego uzyskanego przez modyfikacje materiałową mieszanek do druku 3D, przeprowadzono analizę LCA na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego w tematyce obliczeń śladu węglowego (publikacja P5). Zakres analizy obejmował obliczenie emisji w modułach (A1+A2) oraz oszacowanie wpływu karbonatyzacji (moduł B) i korzyści z recyklingu (moduł D). Analizie poddano siedem wariantów mieszanek opracowanych w ramach niniejszej rozprawy. W przypadku mieszanek z lekkimi wypełniaczami przyjęto warianty z największym udziałem dodatków. Składy analizowanych mieszanek przedstawiono w tabeli 2, natomiast przyjęte współczynniki emisyjności EF, w tabeli 3.

Tabela 2. Składy grup mieszanek opracowanych w ramach rozprawy. Wartość w nawiasach dotyczy dystansu transportowania [km] składnika mieszanki w miejsce wytwarzania.

Wariant materiałowy	Cement [kg/m ³]	Kruszywa kluczowe [kg/m ³]	SCM / wypełniacz [kg/m ³]	Domieszki [kg/m ³]
W1 Mieszanka bazowa	470 (600 km)	Piasek 1277 (270 km), Mączka 94 (35 km)	SF 38 (190 km)	SP 4,7 (285km), ACC 9 (285km)
W2 Mieszanka bazowa + 20% odpad cegl. +15%FA	317	Odpad ceglany 372 (20 km), Piasek 860, Mączka 63	FA 280 (20 km), SF 26	SP 3, ACC 6
W3 Mieszanka bazowa + 20% kruszywo RFA	448	RFA 359 (20 km), Piasek 975,5, Mączka 71,5	SF 28.5	SP 4,5, ACC 9
W4 Mieszanka bazowa + 40% kruszywo RFA	430	RFA 690, Piasek 700, Mączka 51	SF 20	SP 4,3, ACC 8,5
W5 Mieszanka bazowa + 3,75% perlit ekspandowany	297	Perlit 47 (370 km), Piasek 807, Mączka 59	SF 23	SP 3, ACC 6

Wariant materiałowy	Cement [kg/m ³]	Kruszywa kluczowe [kg/m ³]	SCM / wypełniacz [kg/m ³]	Domieszki [kg/m ³]
W6 Mieszanka bazowa + 16.6% keramzyt	283	Keramzyt 225 (290 km), Piasek 768, Mączka 57	SF 23	SP 3, ACC5,5
W7 Mieszanka bazowa + 0,75% granulatu EPS	207	EPS 6,7 (70 km), Piasek 564, Mączka 42	SF 17	SP 2, ACC 4,1

FA – popiół lotny; RFA – drobne kruszywo z recyklingu; SF-mikrokrzemionka; EPS – polistyren ekspandowany; SP – superplastyfikator; ACC – przyspieszacz wiązania.

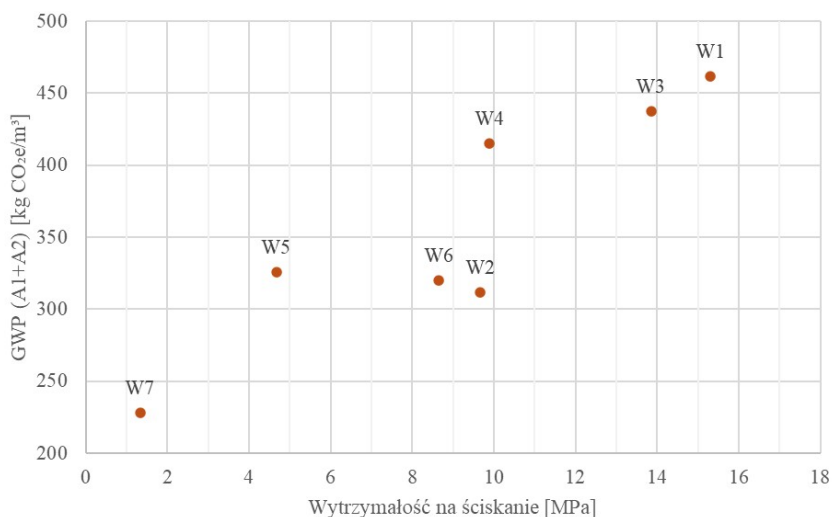
Tabela 3. Zestawienie współczynników emisyjności użytych w obliczeniach [78,117–120].

Składnik / grupa	EF [kg CO ₂ -eq / t]	Składnik w kalkulacji
Cement CEM I	803	Spoivo główne
Kruszywo naturalne	2,44	Kruszywa naturalne
Kruszywo z recyklingu (RFA)	1,14	Recyklat drobny
Popiół lotny (FA)	0,01	SCM (FA)
Mikrokrzemionka (SF)	1,22	SCM (SF)
Woda	0,246	Woda zarobowa
Superplastyfikator (SP)	2732	Domieszka SP
Przyspieszacz wiązania	2732	Domieszka (przyjęty jak SP)
Perlit ekspandowany	680	Kruszywo lekkie - perlit
Keramzyt	163	Kruszywo lekkie - keramzyt
EPS (granulat - przyjęto wartość dla płyt)	3620	Kruszywo lekkie - EPS
Transport ciężarówką >32 t (EURO 6)	0,068 kg CO ₂ -eq/(t·km)	Współczynnik A2 dla wszystkich składników

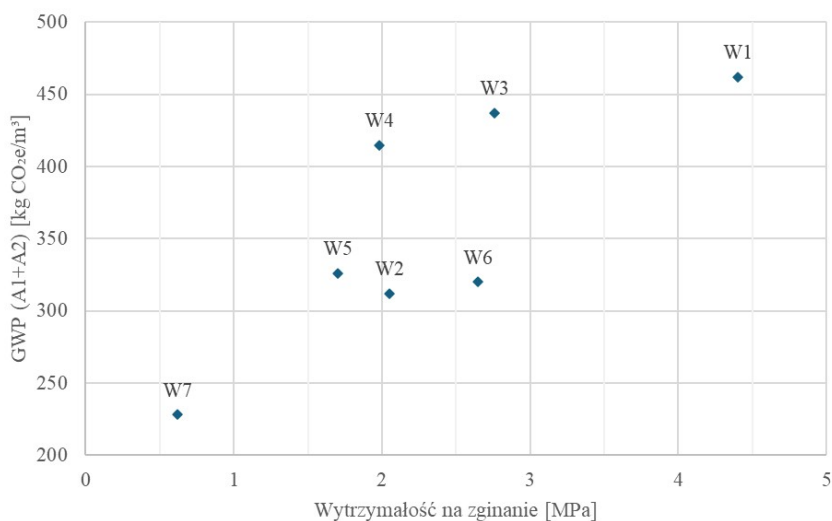
Wyniki analizy śladu węglowego w modułach (A1+A2) mieszczą się w zakresie od 228 do 462 kg CO₂-eq/m³. Najwyższą wartość GWP odnotowano dla wariantu referencyjnego W1 (ok. 462 kg CO₂-eq/m³), przyjętego jako punkt odniesienia dla pozostałych mieszanek. Najniższy wynik osiągnął wariant W7 (ok. 228 kg CO₂-eq/m³, redukcja o 50,7% względem W1). Kluczowym czynnikiem była w tym przypadku mała zawartość cementu (207 kg/m³) wynikająca z zastosowania lekkiego wypełniacza (granulatu EPS) znacząco obniżającego gęstość materiału. Pozostałe warianty z dodatkiem lekkich wypełniaczy (W5, W6) wykazały wartości GWP na poziomie 320-326 kg CO₂-eq/m³. Natomiast wariant W2, obejmujący jednoczesną substytucję spoiwa i kruszywa, osiągnął 312 kg CO₂-eq/m³ (redukcja o 32,5%). Wprowadzenie wyłącznie zamienników kruszywa naturalnego (W3, W4) przyniosło oczekiwany, lecz niewielki efekt redukcyjny śladu węglowego (5-10% względem W1), co wynika z utrzymującego się wysokiego udziału cementu - składnika o najwyższej emisyjności.

Niezależnie od wariantu, czynnikiem dominującym w całkowitym GWP pozostaje cement i jego logistyka, odpowiadające łącznie za 75-90% emisji. Udział kruszyw w bilansie emisyjnym nie przekracza zwykle kilkunastu procent ze względu na znacznie niższe współczynniki emisyjności. W praktyce najsilniejszym narzędziem ograniczania śladu węglowego jest redukcja zawartości klinkieru poprzez zastosowanie dodatków mineralnych (SCM: FA, GGBFS, RCP) oraz skrócenie dystansu transportu cementu. Szacuje się, że każda redukcja dawki cementu o 50 kg/m³ obniża ślad węglowy mieszanki o ok. 40 kg CO₂-eq/m³ w module A1 oraz o kilka dodatkowych kilogramów w module A2 (dla przyjętego dystansu transportu 600 km).

W celu ukazania zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi a środowiskowymi, zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych z analizą GWP dla poszczególnych wariantów (Rysunki 9 i 10).



Rysunek 9. Zależność śladu węglowego (GWP w modułach A1+A2) od wytrzymałości na ściskanie wariantów materiałowych.



Rysunek 10. Zależność śladu węglowego (GWP w modułach A1+A2) od wytrzymałości na zginanie wariantów materiałowych.

Wyniki jednoznacznie wskazują na klasyczny kompromis pomiędzy parametrami mechanicznymi a śladem węglowym. Mieszanka referencyjna W1 osiągnęła najwyższe wartości wytrzymałości (15,3 MPa na ściskanie i 4,40 MPa na zginanie), jednak kosztem największego GWP. Zastosowanie kruszyw z recyklingu (RFA) w wariantach W3 i W4 obniżyło wytrzymałość na ściskanie o 10-35%, a na zginanie o 37-55% względem W1, przy zaledwie 5-10% redukcji emisyjności.

Interesującym kompromisem pozostaje wariant W2, w którym jednoczesna substytucja spoiwa i kruszywa pozwoliła uzyskać wytrzymałość na ściskanie ok. 9,7 MPa i na zginanie ok. 2,05 MPa, przy znaczącej redukcji GWP do ok. 312 kg CO₂-eq/m³. Zbliżone rezultaty daje wariant W6 z dodatkiem keramzytu (ok. 8,7 MPa przy GWP ok. 320 kg CO₂-eq/m³), który może znaleźć zastosowanie w lekkich elementach nośnych, szczególnie tam, gdzie wymagane są podwyższone parametry termoizolacyjne. Wariant W5 z perlitem ekspandowanym należy traktować przede wszystkim jako rozwiązanie lekkie/izolacyjne, a nie nośne. Podobnie wariant W7, który dzięki zastosowaniu EPS uzyskał najniższą emisyjność, lecz ze względu na wytrzymałość na ściskanie na poziomie ok. 1,33 MPa ma wyłącznie charakter wypełniająco-izolacyjny.

Powyższą analizę potwierdzają wskaźniki względne „GWP na 1 MPa wytrzymałości na ściskanie”, wynoszą odpowiednio: W1 ≈ 30, W3 ≈ 31,6, W2 ≈ 32,2, W6 ≈ 37,0, W4 ≈ 42,0, W5 ≈ 69,8 oraz W7 ≈ 171 (kg CO₂-eq·m³/MPa). Wynika z tego, że w zakresie nośności rzędu 12-15 MPa mechanicznie najefektywniejsze emisyjnie pozostają warianty W1, W3 i W4. Jeśli jednak celem jest redukcja śladu węglowego w okolice 300-320 kg CO₂-eq/m³ przy zachowaniu wytrzymałości zbliżonej do 10 MPa, najkorzystniejszy jest wariant W2. W zastosowaniach wymagających nośności 8-9 MPa korzystnie wypada W6, łączący podobny ślad środowiskowy z niższą gęstością i potencjalnymi korzyściami termoizolacyjnymi oraz akustycznymi. Natomiast w projektach, w których priorytetem jest niska masa i izolacyjność, przewagę uzyskują warianty W5 i W7.

W module B przyjęto scenariusz karbonatyzacji odniesiony do 1 m³ materiału w ścianie o grubości 43 cm, eksponowanej z obu stron, bez powłok ochronnych i bez rys, dla okresu odniesienia 50 lat. Należy pamiętać, że przedstawione wyliczenia są wrażliwe na wiele czynników, np. geometrię i ekspozycję dlatego dokładniejsze wartości można uzyskać na podstawie danych projektowych oraz badań doświadczalnych. Głębokość frontu karbonatyzacji obliczono zgodnie ze wzorem: $x(t) = k\sqrt{t}$, gdzie współczynnik k zróżnicowano ze względu na skład (wyższy dla układów z lekkimi kruszywami, niższy dla mieszanek z FA), a udział zkarbonatyzowanej objętości określono jako $\phi = 2x/t$. Potencjał chemiczny

wiązania CO₂ wyprowadzono ze składu spoiwa $CAP_{CO_2} \approx 0,3444 \cdot m_{\text{cementu}}$ [kg/m³] (ang. Carbonation (CO₂) Absorption Potential, CAP_{CO_2}), co pozwala oszacować pochłanianie jako $B1 = -CAP_{CO_2} \cdot \phi$ [kg CO₂eq/m³]. W tych warunkach największe pochłanianie uzyskano dla wariantów o wysokiej zawartości cementu: W1 i W3, odpowiednio około -31,9 i -30,5 kg CO₂eq/m³. Dla układów z obniżonym cementem i/lub z kruszywami lekkimi (W2, W5, W6, W7) wartości mieszczą się w przedziale od ok. -16 do -24 kg CO₂eq/m³.

W module D ujęto wyłącznie korzyści materiałowe z recyklingu „poza granicą systemu”, liczone jako uniknięta produkcja materiału pierwotnego pomniejszona o emisje procesu i transportu. Wartości modułu D zależne są od rzeczywistych tras i środków transportu, energochłonności linii recyklingu, jakości frakcji wtórnych (k-factor) oraz przyjętej ścieżki zagospodarowania EPS oraz weryfikacji scenariuszy końca życia. Założono 80% uzysku frakcji wtórnych, emisję z kruszenia z przesiewem na poziomie 5 kg CO₂eq/t oraz transport gruzu 30 km do miejsca przeróbki i 20 km na miejsce docelowe (pojazdy >32 t, EURO 6), przy substytucji kruszyw naturalnych o wskaźniku 2,44 kg CO₂eq/t. Jakościowy współczynnik *k* równym 0,9 dla recyklingu z betonu (W1, W3, W4, komponent mineralny W7), 0,8 dla mieszanego recyklatu cegła+beton (W2) i 0,85 dla mieszanek z LWA (W5–W6). W tych warunkach bilans dla strumieni mineralnych jest niewielki i zwykle ujemny (koszt procesu i logistyki przewyższa korzyść substytucji): rzędu -9 do -6 kg CO₂eq/m³ zależnie od wariantu. Istotny pozytywny kredyt pojawia się w W7 dzięki regranulacji EPS (przyjęto 60% zbiórki i 10% strat), co daje około +7,9 kg CO₂eq/m³ „unikniętego” obciążenia.

Tabela 4 Zestawienie wyników emisyjności opracowanych w ramach rozprawy mieszanek do zastosowania w technologii 3DCP.

Wariant	A1+A2 [kg CO ₂ eq/m ³]	B1 (karbonatyzacja) [kg CO ₂ eq/m ³]	D (recykling) [kg CO ₂ eq/m ³]	Suma (A1+A2+B1-D) [kg CO ₂ eq/m ³]
W1 Mieszanka bazowa	461,9	-31,9	-9,3	439,3
W2 Mieszanka bazowa + 20% odpad cegl. +15%FA	311,8	-16,1	-9,9	305,6 (-30,4% W1)
W3 Mieszanka bazowa + 20% kruszywo RFA	437,2	-30,5	-9,3	416,0 (-5,3% W1)
W4 Mieszanka bazowa + 40% kruszywo RFA	415,0	-26,8	-9,4	397,6 (-9,5% W1)
W5 Mieszanka bazowa + 3,75% perlit ekspandowany	326,0	-23,6	-6,2	308,6 (-29,8% W1)

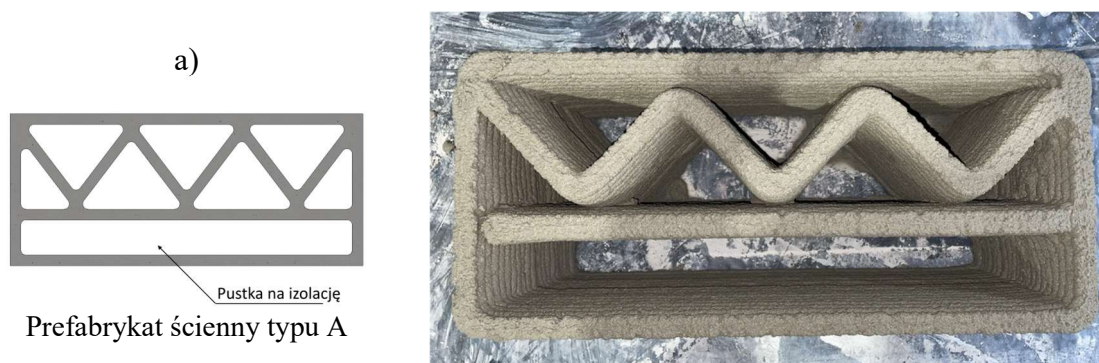
Wariant	A1+A2 [kg CO ₂ eq/m ³]	B1 (karbonatyzacja) [kg CO ₂ eq/m ³]	D (recykling) [kg CO ₂ eq/m ³]	Suma (A1+A2+B1-D) [kg CO ₂ eq/m ³]
W6 Mieszanka bazowa + 16.6% keramzyt	320,0	-20,8	-6,9	306,0 (-30,3% W1)
W7 Mieszanka bazowa + 0,75% granulaty EPS	228,0	-18,8	7,9	201,3 (-54,2% W1)

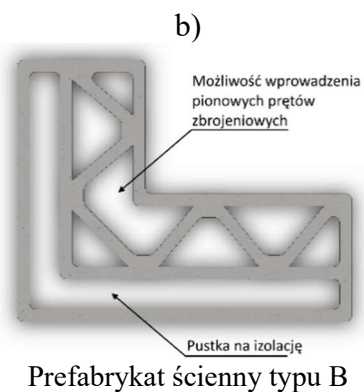
Analiza przeprowadzonych obliczeń parametrów LCA wykazała możliwość efektywnego obniżenia emisji CO₂ poprzez modyfikację składu mieszanek betonowych z zastosowaniem kruszyw lekkich. Uwzględniając wymóg zapewnienia nośności na poziomie 8-9 MPa najkorzystniejszym rozwiązaniem okazała się mieszanka z udziałem kruszywa keramzytowego, która łączy podobny ślad środowiskowy z niższą gęstością oraz wyraźną poprawą właściwości termoisolacyjnych w porównaniu z mieszanką referencyjną. Natomiast w projektach, w których priorytetem są niska masa i wysoka izolacyjność, przewagę uzyskują warianty mieszanek z perlitem i granulatem EPS, umożliwiające redukcję emisji CO₂ odpowiednio o około 30 i 54 %.

5.6. Wdrożeniowe aspekty uzyskanych wyników

Realizacja niniejszej rozprawy umożliwiła opracowanie zestawu rozwiązań technologicznych, obejmujących materiał, głowicę drukującą i parametry procesowe, które pozwalają na druk 3D z wykorzystaniem mieszanek na bazie spoiwa cementowego. Możliwość zastosowania surowców odpadowych w mieszankach do druku 3D dodatkowo podnosi znaczenie przedstawionych rozwiązań, wpisując je w koncepcje zrównoważonego budownictwa i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Przeprowadzone prace umożliwiły wykonanie prefabrykatów ściennych typu A i B (Rys. 11), których geometria wypełnienia odpowiadała wariantom opracowanym w ramach artykułu P3. Dodatkowo wytworzono prefabrykat całej ściany, przeznaczony do realizacji prototypowego budynku w technologii 3DCP.





Rysunek 11 Prefabrykaty ścienne: a) typ A, b) typ B- wykonane w technologii druku 3DCP z opracowanego w ramach pracy betonu drobnoziarnistego.

Wykorzystując opracowane rozwiązania zrealizowano również liczne projekty małej architektury (Rys. 12), które potwierdziły potencjał technologii wytwarzania elementów o złożonej geometrii i indywidualnym charakterze. Możliwość personalizacji projektów oraz tworzenia struktur o wysokim stopniu skomplikowania przekłada się na rosnące zainteresowanie tą technologią. Prognozuje się, że jej popularność będzie systematycznie wzrastać w nadchodzących latach, zarówno dzięki zwiększającej się świadomości rynku, jak i kontynuacji badań nad dalszym rozwojem metod addytywnego wytwarzania w budownictwie.



a)



b)



c)



d)

Rysunek 12 Wybrane realizacje małej architektury: a) donica po procesie produkcji, b) donica po instalacji w miejscu docelowym, c) krzesło, d) ławka- wykonane z użyciem technologii druku 3DCP opracowanej w niniejszej rozprawie.

Opracowane innowacje przyczyniły się do rozszerzenia oferty handlowej firmy ATMAT poprzez wprowadzenie do produkcji głowic drukujących dedykowanych do wielkogabarytowych drukarek 3D partnera przemysłowego. Ponadto, opracowane rozwiązania stanowią podstawę dalszego rozwoju technologii druku 3D z betonu w ramach projektów badawczo-rozwojowych ukierunkowanych na opracowanie kompleksowej infrastruktury przyrostowego wytwarzania elementów betonowych. Wdrożenie opracowanych rozwiązań w bieżącą działalność rozwojową partnera przemysłowego potwierdza załączone zaświadczenie (strona 66).

Kraków, 12.10.2025

Rekomendacje

Do kogo może dotyczyć,

reprezentując **ATMAT Sp. z o.o.**, pragnę podkreślić, że wyniki badań prowadzonych przez mgr inż. **Marcina Maroszka** w ramach jego doktoratu wdrożeniowego mają **bezpośrednie i bieżące zastosowanie w działalności rozwojowej naszej firmy.**

Opracowane przez Doktoranta receptury i metody oceny właściwości mieszanek cementowych przeznaczonych do technologii druku 3D stanowią podstawę doboru i kalibracji układów wytłaczania w nowo projektowanych urządzeniach ATMAT. Wyniki jego pracy są obecnie wykorzystywane m.in. przy:

- opracowywaniu **głowic drukujących do betonu** o regulowanej geometrii kanału przepływowego i zmiennej lepkości roboczej materiału,
- rozwoju **systemów sterowania i dozowania materiałów półsuchych**, w których parametry przepływu i czas wiązania są kluczowe dla stabilności procesu,
- przygotowywaniu **technologii druku elementów konstrukcyjnych i architektonicznych** z zastosowaniem modyfikowanych mieszanek o niższym śladzie węglowym,
- wstępnych badaniach nad **recyklingiem drobnych frakcji kruszyw i popiołów** jako składników materiałów do druku.

Warto podkreślić, że praca mgr inż. Marcina Maroszka ma charakter **wyraźnie wdrożeniowy**, a opracowane rozwiązania są sukcesywnie implementowane w urządzeniach ATMAT przeznaczonych dla sektora budowlanego. Z perspektywy przedsiębiorstwa badania prowadzone przez Doktoranta wniosły istotną wartość dodaną w zakresie zrozumienia zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi mieszanki a parametrami pracy systemu drukującego, co bezpośrednio przekłada się na jakość i powtarzalność procesu druku 3D betonu. **Efekty badań stanowią realny fundament technologiczny** dla wdrażanych w ATMAT rozwiązań w zakresie druku konstrukcji z betonu.

W imieniu firmy potwierdzam, że prace badawcze i opracowane przez mgr inż. Marcina Maroszka rozwiązania będą mogły być rozwijane w dalszych **projektach badawczych i rozwojowych**. Z pełnym przekonaniem rekomenduję pozytywne przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka, która stanowi istotny wkład w rozwój technologii addytywnego wytwarzania elementów betonowych w skali przemysłowej.

Z poważaniem,

dr inż. Mateusz Góra
 Prezes Zarządu
ATMAT Sp. z o.o.

ATMAT
 Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością
 ul. Leśna 28, 32-590 Libiąż
 e-mail: info@atmat.pl
 NIP: 6282264077 REGON: 361576192

6. Podsumowanie i wnioski

Głównym celem niniejszej rozprawy była identyfikacja oraz analiza wpływu dodatków w postaci surowców pochodzących z recyklingu, stosowanych jako częściowy substytut spoiwa cementowego oraz kruszywa drobnego, na właściwości fizyczne, mechaniczne i termiczne mieszanek na bazie cementu portlandzkiego, dedykowanych technologii przyrostowego wytwarzania elementów betonowych (3DCP). Prace badawcze obejmowały również optymalizację parametrów procesu druku oraz opracowanie geometrii prefabrykowanych elementów w taki sposób, aby uzyskać korzystne parametry wytrzymałościowe i termoizolacyjne. Cel użytkowy rozprawy obejmował opracowanie oraz wdrożenie rozwiązań technologicznych umożliwiających wytwarzanie prefabrykatów z mieszanek cementowych modyfikowanych poprzez zastosowanie surowców odpadowych i materiałów wtórnych.

Proces badawczy podzielono na trzy etapy. Etap I obejmował opracowanie mieszanki bazowej na bazie cementu portlandzkiego do druku 3D oraz określenie kluczowych parametrów jej stanu świeżego. Zdefiniowano krytyczne parametry procesu, takie jak stabilność ścieżki, wydajność ekstruzji, prędkość druku, wysokość warstwy oraz średnica dyszy. Ustalono wartości kontrolne, m.in. rozplływ i odkształcenie pod obciążeniem warstw, a także opracowano głowicę drukującą oraz autorskie stanowisko badawcze do 3DCP. W etapie II analizowano właściwości próbek drukowanych z próbkami formowanymi konwencjonalnie w zakresie parametrów mechanicznych i fizycznych. Zbadano wpływ strategii druku, w tym przerw czasowych między nakładaniem kolejnych warstw, na właściwości wytrzymałościowe oraz przeanalizowano anizotropię materiału. Równolegle opracowano geometrię prefabrykatów ściennych i dokonano oceny ich parametrów termoizolacyjnych. Badania zrealizowane w etapie III potwierdziły możliwość modyfikacji składu mieszanki poprzez zastosowanie surowców odpadowych jako częściowych zamienników spoiwa i/lub kruszywa drobnego. Uzyskane wyniki porównano z materiałem referencyjnym, co umożliwiło ocenę wpływu modyfikacji na właściwości użytkowe oraz identyfikację potencjalnych korzyści środowiskowych związanych z zagospodarowaniem odpadów.

Zrealizowane badania oraz analiza wyników umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

- Opracowano mieszankę bazową na cemencie portlandzkim, stanowiącą punkt wyjścia do dalszych badań nad właściwościami elementów drukowanych oraz do modyfikacji materiałowych z udziałem surowców wtórnych.
- Czynniki takie jak prędkość druku, średnica dyszy oraz obecność włókien w mieszance wpływają na wydajność ekstruzji powodując odchylenia od wartości zadanej w zakresie 5-28% i wymagają zastosowania współczynników korekcyjnych w celu zapewnienia powtarzalnych rezultatów.
- Druk 3DCP prowadzi do obniżenia parametrów mechanicznych próbek o 70-75% w porównaniu z próbkami formowanymi konwencjonalnie, co wynika z warstwowej struktury oraz osłabionych połączeń międzywarstwowych. Zjawisko to należy uwzględniać przy projektowaniu elementów konstrukcyjnych wykonywanych tą technologią.
- Warstwowy charakter procesu 3DCP powoduje anizotropię właściwości mechanicznych, szczególnie w zakresie wytrzymałości na zginanie, gdzie próbka badana w kierunku równoległym do układania warstw była o około 60% słabsza niż w wariancie badanym prostopadle.
- Czas przerwy pomiędzy nakładaniem kolejnych warstw, zależny od wielkości elementu i prędkości druku, istotnie wpływa na właściwości mechaniczne prefabrykatów, prowadząc do ich osłabienia przy dłuższych odstępach czasowych nawet do 25%.
- Możliwości technologii 3DCP w zakresie projektowania i wytwarzania wewnętrznych struktur przegród budowlanych umożliwiają uzyskanie wysokich parametrów termoizolacyjnych na poziomie $U = 0,183 \text{ W/m}^2\text{K}$, co spełnia wytyczne budowlane w zakresie efektywności energetycznej budynków. Udział materiału nośnego w objętości przegrody może być kontrolowany i dostosowywany do zakładanej funkcji konstrukcyjnej.
- Modyfikacja mieszanki poprzez zastosowanie surowców odpadowych pozwala na zachowanie drukowalności, lecz prowadzi w większości do obniżenia parametrów mechanicznych, zwłaszcza wytrzymałości na zginanie, gdzie zarejestrowano spadek do 60% względem materiału bazowego. Kilka wariantów materiałowych (z odpadowym szkłem, gruzem i cegłą) pozwoliło utrzymać wytrzymałość na ściskanie na poziomie mieszanki bazowej.

- Dodatek lekkich kruszyw umożliwia obniżenie przewodności cieplnej materiału do około 70% wartości referencyjnej. Należy jednak podkreślić, że warianty o najlepszych właściwościach termoizolacyjnych odznaczały się niską wytrzymałością, co może ograniczyć ich zastosowanie.
- Modyfikacje materiałowe z użyciem surowców wtórnych i lekkich kruszyw pozwoliły na redukcję śladu węglowego do 50%. Poziom redukcji jest jednak powiązany ze spadkiem parametrów mechanicznych, co wymaga dostosowania składu do planowanej funkcji elementu, nośnej bądź izolacyjnej.
- Opracowane rozwiązania konstrukcyjne stanowiska do 3DCP wraz z kompatybilną głowicą drukującą umożliwiły wytwarzanie prefabrykatów ściennych typu A i B oraz przeprowadzenie badań zarówno nad wpływem technologii druku na ich właściwości, jak i nad skutecznością modyfikacji materiałowych.
- Zdefiniowany zestaw parametrów procesu druku pozwala na stabilne i powtarzalne prowadzenie procesu w warunkach dostępnej infrastruktury badawczej.

Pełny opis zastosowanych materiałów, ich charakterystyki, metod badawczych, wyników wraz z dyskusją oraz przeglądem literatury przedmiotu zawarto w załącznikach [P1-P5]

7. Perspektywy przyszłych badań

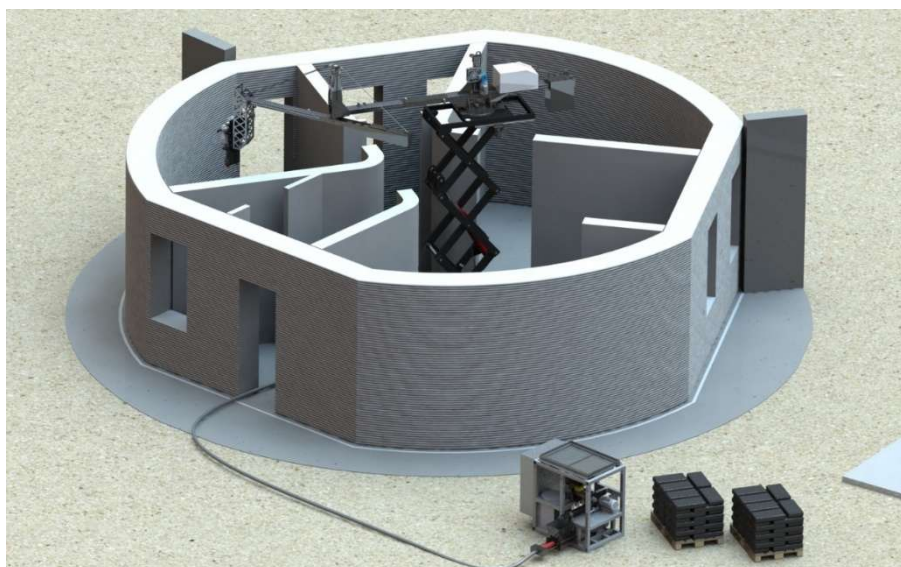
Plan dalszych badań zakłada kontynuację prac w obszarze rozwoju mieszanek materiałowych dedykowanych technologii 3DCP. Szczególny nacisk zostanie położony na standaryzację rozwiązań materiałowych oraz zwiększenie udziału surowców odpadowych zarówno w frakcji kruszywowej, jak i - w kontrolowanym zakresie - w spoiwie. Głównym celem tych działań będzie dalsza redukcja śladu węglowego, przy jednoczesnym zachowaniu okna drukowalności i wymaganych parametrów użytkowych materiału. Badania ukierunkowane będą na zapewnienie stabilności procesu oraz minimalizację zmienności wynikającej z niejednorodności strumieni odpadów. Jednocześnie podejmowane prace będą miały na celu wypełnienie obecnych luk badawczych, obejmujących brak standardów w zakresie stosowalności technologii 3DCP oraz brak kompleksowych analiz LCA odnoszących się zarówno do technologii, mieszanek, jak i samych elementów drukowanych.

Istotnym kierunkiem badań będzie ocena trwałości długookresowej materiałów cementowych z recyklingu wykorzystywanych w technologii 3DCP, w szczególności pod kątem odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz przenikanie chlorków. Parametry te mają kluczowe znaczenie w kontekście potencjalnych zastosowań konstrukcyjnych. Konieczne będzie opracowanie strategii projektowania mieszanek ukierunkowanych na ograniczenie porowatości otwartej oraz poprawę wiązania międzywarstwowego, m.in. poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków mineralnych (SCM) oraz optymalizację krzywych uziarnienia. Równolegle wskazane jest opracowanie standardów umożliwiających weryfikację powyższych właściwości drukowanych elementów, np. na podstawie badań pośrednich, takich jak oznaczanie nasiąkliwości czy porowatości otwartej.

Plan dalszych prac badawczych obejmie walidację technologii w skali rzeczywistej poprzez druk prefabrykatu ściennego o zaprojektowanej geometrii wewnętrznej. Celem tych działań będzie kompleksowa ocena opracowanych rozwiązań na obiekcie referencyjnym, obejmująca: przygotowanie przebiegu ścieżek materiału nośnego i strategii wypełnienia, kontrolę odchyłek wymiarowych oraz czasu cyklu, a także weryfikację kluczowych parametrów użytkowych elementu, takich jak nośność, izolacyjność cieplna, szczelność, odporność ogniowa i akustyczna. Równolegle prowadzone będą badania nad drukiem dwumateriałowym, w którym materiał nośny stanowiłby obrys, a lekki materiał izolacyjny pełniłby funkcję wypełnienia. Wymaga to opracowania zarówno odpowiedniej infrastruktury sprzętowej, jak i strategii prowadzenia procesu. Badania skoncentrują się

w szczególności na adhezji międzywarstwowej, ciągłości na granicy dwóch materiałów, kontroli skurczu oraz zapewnieniu zakładanej termoizolacyjności.

Ostatni obszar planowanych prac dotyczy rozwoju technologii druku in-situ na placu budowy. Jest to zagadnienie o charakterze długoterminowym, którego realizacja zakłada opracowanie mobilnego zestawu mieszania i drukowania, wyposażonego w systemy pozycjonowania oraz monitoringu procesu (kontrola ciśnienia, siły podawania, warunków środowiskowych). Wizję takiej technologii przedstawia Rysunek 12. Niezbędne będzie także opracowanie procedur BHP oraz systemów kontroli jakości. Studium przypadku w postaci wydruku segmentu ściany lub elementu małej architektury w rzeczywistych warunkach budowlanych pozwoli na porównanie czasu i kosztów realizacji z metodami tradycyjnymi, a także umożliwi określenie wymaganego poziomu dojrzałości technologicznej (ang. Technology Readiness Level, TRL) dla zastosowań przemysłowych.



Rysunek 13 Wizja budownictwa z zastosowaniem technologii 3DCP.

Bibliografia

1. Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S. Recycled Aggregate from C&D Waste & Its Use in Concrete – A Breakthrough towards Sustainability in Construction Sector: A Review. *Construction and Building Materials* **2014**, *68*, 501–516, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
2. International Energy Agency (IEA) *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*; International Energy Agency (IEA), 2019; p. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-demand-for-building-construction-2000-2020-and-in-the-net-zero-scenario-2025-2030> (Dostęp 3.09.2025);
3. World Economic Forum *Cement Production Is Responsible for 8% of Global Emissions. Here's How to Make It More Sustainable*. 2024,.
4. Uratani, J.M.; Griffiths, S. A Forward Looking Perspective on the Cement and Concrete Industry: Implications of Growth and Development in the Global South. *Energy Research & Social Science* **2023**, *97*, 102972, doi:10.1016/j.erss.2023.102972.
5. International Energy Agency *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; IEA: Paris, 2018; p. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (Dostęp 3.09.2025);
6. International Energy Agency *Global Cement Production in the Net Zero Scenario, 2010-2030*; IEA: Paryż, Francja, 2023; p. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-production-in-the-net-zero-scenario-2010-2030-5260> (Dostęp 25.08.2025);
7. International Energy Agency (IEA) *Global Cement Demand for Building Construction, 2000-2020, and in the Net Zero Scenario, 2025-2030*; International Energy Agency (IEA): Paris, 2021; p. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-demand-for-building-construction-2000-2020-and-in-the-net-zero-scenario-2025-2030> (Dostęp 3.09.2025);
8. Cheng, D.; Reiner, D.M.; Yang, F.; Cui, C.; Meng, J.; Shan, Y.; Liu, Y.; Tao, S.; Guan, D. Projecting Future Carbon Emissions from Cement Production in Developing Countries. *Nat Commun* **2023**, *14*, 8213, doi:10.1038/s41467-023-43660-x.
9. International Energy Agency *CO2 Emitted and Captured in the Cement Sector and Clinker-to-Cement Ratio in the Net Zero Scenario, 2015-2030*; IEA: Paryż, Francja, 2023; p. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emitted-and-captured-in-the-cement-sector-and-clinker-to-cement-ratio-in-the-net-zero-scenario-2015-2030> (Dostęp 29.08.2025);
10. CEN *EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products*; 15804:2012+A2:2019/AC:2021; Brussels: CEN, **2019**.
11. ISO *ISO 21930:2017 Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works - Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services*; Geneva: ISO, **2017**.
12. 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* **2017**, *145*, 639–647, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.

13. Nerella, V.N.; Mechtcherine, V. Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). In *3D Concrete Printing Technology*; Elsevier, 2019; pp. 333–347 ISBN 978-0-12-815481-6.
14. Deng, Q.; Zou, S.; Xi, Y.; Singh, A. Development and Characteristic of 3D-Printable Mortar with Waste Glass Powder. *Buildings* **2023**, *13*, 1476, doi:10.3390/buildings13061476.
15. Zhan, P.; Xu, J.; Wang, J.; Jiang, C. Multi-Scale Study on Synergistic Effect of Cement Replacement by Metakaolin and Typical Supplementary Cementitious Materials on Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Building Materials* **2021**, *307*, 125082, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125082.
16. Dvorkin, L.; Marchuk, V.; Mróz, K.; Maroszek, M.; Hager, I. Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies. *Applied Sciences* **2024**, *14*, 3038, doi:10.3390/app14073038.
17. Gheibi, M.; Karrabi, M.; Shakerian, M.; Mirahmadi, M. Life Cycle Assessment of Concrete Production with a Focus on Air Pollutants and the Desired Risk Parameters Using Genetic Algorithm. *J Environ Health Sci Engineer* **2018**, *16*, 89–98, doi:10.1007/s40201-018-0302-x.
18. Sabău, M.; Bompa, D.V.; Silva, L.F.O. Comparative Carbon Emission Assessments of Recycled and Natural Aggregate Concrete: Environmental Influence of Cement Content. *Geoscience Frontiers* **2021**, *12*, 101235, doi:10.1016/j.gsf.2021.101235.
19. SPC *Technologie CCS jedyną szansą na zachowanie konkurencyjności sektora cementowego w Polsce*; Stowarzyszenie Producentów Cementu (SPC), 2024; p. <https://www.polskicement.pl/technologie-ccs-jedyna-szansa-na-zachowanie-konkurencyjnosci-sektora-cementowego-w-polsce/> (Dostęp 3.09.2025);
20. Purvis, B.; Celebi, D.; Pansera, M. A Framework for a Responsible Circular Economy. *Journal of Cleaner Production* **2023**, *400*, 136679, doi:10.1016/j.jclepro.2023.136679.
21. Volker Hoenig; Albrecht Schall; Nazar Sultanov; Stefan Papkalla; Johannes Ruppert Status and Prospects of Alternative Raw Materials in the European Cement Sector. Presented at the European Cement Research Academy (ECRA), Düsseldorf, 2022.
22. SPC *Informator 2023 SPC*; Stowarzyszenie Producentów Cementu (SPC), 2023; p. <https://www.polskicement.pl/informatory/informator-2023-spc/> (Dostęp 3.09.2025);
23. Liu, J.; Li, S.; Gunasekara, C.; Fox, K.; Tran, P. 3D-Printed Concrete with Recycled Glass: Effect of Glass Gradation on Flexural Strength and Microstructure. *Construction and Building Materials* **2022**, *314*, 125561, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125561.
24. Ting, G.H.A.; Tay, Y.W.D.; Qian, Y.; Tan, M.J. Utilization of Recycled Glass for 3D Concrete Printing: Rheological and Mechanical Properties. *J Mater Cycles Waste Manag* **2019**, *21*, 994–1003, doi:10.1007/s10163-019-00857-x.
25. Skibicki, S.; Pułtorak, M.; Kaszyńska, M.; Hoffmann, M.; Ekiert, E.; Sibera, D. The Effect of Using Recycled PET Aggregates on Mechanical and Durability Properties of 3D Printed Mortar. *Construction and Building Materials* **2022**, *335*, 127443, doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127443.
26. Daniel Oosthuizen, J.; John Babafemi, A.; Shaun Walls, R. 3D-Printed Recycled Plastic Eco-Aggregate (Resin8) Concrete. *Construction and Building Materials* **2023**, *408*, 133712, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133712.
27. Liu, J.; Setunge, S.; Tran, P. 3D Concrete Printing with Cement-Coated Recycled Crumb Rubber: Compressive and Microstructural Properties. *Construction and Building Materials* **2022**, *347*, 128507, doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128507.

28. Valente, M.; Sambucci, M.; Chougan, M.; Ghaffar, S.H. Composite Alkali-Activated Materials with Waste Tire Rubber Designed for Additive Manufacturing: An Eco-Sustainable and Energy Saving Approach. *Journal of Materials Research and Technology* **2023**, *24*, 3098–3117, doi:10.1016/j.jmrt.2023.03.213.
29. Sambucci, M.; Biblioteca, I.; Valente, M. Life Cycle Assessment (LCA) of 3D Concrete Printing and Casting Processes for Cementitious Materials Incorporating Ground Waste Tire Rubber. *Recycling* **2023**, *8*, 15, doi:10.3390/recycling8010015.
30. Tran, N.; Van Tran, M.; Tran, P.; Nguyen, A.K.; Nguyen, C.Q. Eco-Friendly 3D-Printed Concrete Using Steel Slag Aggregate: Buildability, Printability and Mechanical Properties. *Int J Concr Struct Mater* **2024**, *18*, 66, doi:10.1186/s40069-024-00705-9.
31. Ma, G.; Li, Z.; Wang, L. Printable Properties of Cementitious Material Containing Copper Tailings for Extrusion Based 3D Printing. *Construction and Building Materials* **2018**, *162*, 613–627, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051.
32. Ambily, P.S.; Kaliyavaradhan, S.K.; Sebastian, S.; Shekar, D. Sustainable 3D Printable Concrete Mix Using Copper Slag. *Journal of Building Engineering* **2025**, *101*, 111950, doi:10.1016/j.job.2025.111950.
33. Liu, Y.; Wang, L.; Yuan, Q.; Peng, J. Effect of Coarse Aggregate on Printability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Construction and Building Materials* **2023**, *405*, 133338, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133338.
34. Li, X.; Zhang, N.; Yuan, J.; Wang, X.; Zhang, Y.; Chen, F.; Zhang, Y. Preparation and Microstructural Characterization of a Novel 3D Printable Building Material Composed of Copper Tailings and Iron Tailings. *Construction and Building Materials* **2020**, *249*, 118779, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118779.
35. Wang, H.; Jiang, M.; Hang, M.; Zhou, G.; Sun, M.; Liu, X. Research on the Mechanical Properties and Frost Resistance of Aeolian Sand 3D Printed Mortar. *Case Studies in Construction Materials* **2023**, *19*, e02332, doi:10.1016/j.cscm.2023.e02332.
36. Dong, W.; Wang, J.; Hang, M.; Qu, S. Research on Printing Parameters and Salt Frost Resistance of 3D Printing Concrete with Ferrochrome Slag and Aeolian Sand. *Journal of Building Engineering* **2024**, *84*, 108508, doi:10.1016/j.job.2024.108508.
37. Liu, J.; Haikola, P.; Fox, K.; Tran, P. 3D Printing of Cementitious Composites with Seashell Particles: Mechanical and Microstructural Analysis. *Construction and Building Materials* **2024**, *438*, 136939, doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.136939.
38. European Commission. Directorate General for Research and Innovation. *European Research Area Progress Report 2018: Country Profile : Poland.*; Publications Office: LU, 2019;
39. Venugopal Reddy, P.; Nakkeeran, G.; Roy, D.; Alaneme, G.U. Evaluating the Use of Recycled Fine Aggregates in 3D Printing: A Systematic Review. *Discov Appl Sci* **2024**, *6*, 630, doi:10.1007/s42452-024-06358-3.
40. Rehman, A.U.; Kim, J.-H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials* **2021**, *14*, 3800, doi:10.3390/ma14143800.
41. Sbardelotto, E.K.; Vieira, M.G.; Ferreira Dos Santos, K.; Pereira Dos Santos, S.; Martins Toralles, B. Exploratory Study on the Rheological Behaviour of 3D Printable Mortars Incorporating Fine Recycled Concrete Aggregates (FRCA). *MATEC Web Conf.* **2025**, *409*, 06005, doi:10.1051/mateconf/202540906005.
42. Christen, H.; Van Zijl, G.; De Villiers, W. The Incorporation of Recycled Brick Aggregate in 3D Printed Concrete. *Cleaner Materials* **2022**, *4*, 100090, doi:10.1016/j.clema.2022.100090.

43. Pepe, M.; Lombardi, R.; Lima, C.; Paolillo, B.; Martinelli, E. Experimental Evidence on the Possible Use of Fine Concrete and Brick Recycled Aggregates for 3D Printed Cement-Based Mixtures. *Materials* **2025**, *18*, 583, doi:10.3390/ma18030583.
44. Wu, Y.; Liu, C.; Liu, H.; Zhang, Z.; He, C.; Liu, S.; Zhang, R.; Wang, Y.; Bai, G. Study on the Rheology and Buildability of 3D Printed Concrete with Recycled Coarse Aggregates. *Journal of Building Engineering* **2021**, *42*, 103030, doi:10.1016/j.jobe.2021.103030.
45. Liu, H.; Liu, C.; Wu, Y.; Bai, G.; He, C.; Zhang, R.; Wang, Y. Hardened Properties of 3D Printed Concrete with Recycled Coarse Aggregate. *Cement and Concrete Research* **2022**, *159*, 106868, doi:10.1016/j.cemconres.2022.106868.
46. Eurostat *Waste Statistics*; Eurostat, 2024; p. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/1183.pdf> (Dostęp 25.08.2025);
47. Petrović, E.K.; Thomas, C.A. Global Patterns in Construction and Demolition Waste (C&DW) Research: A Bibliometric Analysis Using VOSviewer. *Sustainability* **2024**, *16*, 1561, doi:10.3390/su16041561.
48. Caro, D.; Lodato, C.; Damgaard, A.; Cristóbal, J.; Foster, G.; Flachenecker, F.; Tonini, D. Environmental and Socio-Economic Effects of Construction and Demolition Waste Recycling in the European Union. *Science of The Total Environment* **2024**, *908*, 168295, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.168295.
49. Ove Arup & Partners Limited *Embodied Carbon: Concrete*; Buildings & Infrastructure Priority Actions for Sustainability; London, United Kingdom, 2023; p. https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/Resources/ARUP-Embodied-carbon-concrete_1.pdf (Dostęp 28.08.2025);
50. Flower, D.J.M.; Sanjayan, J.G. Green House Gas Emissions Due to Concrete Manufacture. *Int J Life Cycle Assess* **2007**, *12*, 282–288, doi:10.1065/lca2007.05.327.
51. Anderson, J.; Moncaster, A. Embodied Carbon of Concrete in Buildings, Part 1: Analysis of Published EPD. *Buildings and Cities* **2020**, *1*, 198–217, doi:10.5334/bc.59.
52. CEN *EN 12620:2013 Aggregates for Concrete*; EN 12620:2013; CEN: Brussels, Belgium, **2013**.
53. *EN 206-1:2000 Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity*, CEN: Brussels, Belgium, **2000**.;
54. Highway Structures & Bridges Design *CD 374: The Use of Recycled Aggregates in Structural Concrete*; London, United Kingdom, **2020**.
55. MPA, The Concrete Centre *Specifying Sustainable Concrete: Aggregates*; 2025; p. <https://www.concretecentre.com/Resources/Publications/Specifying-Sustainable-Concrete-Aggregates.aspx> (Dostęp 20.08.2025);
56. CEN *EN 16757:2017 (Consolidated with A1:2022). Sustainability of Construction Works - EPD - PCR for Concrete and Concrete Elements*; Brussels: CEN, **2022**.
57. Global Cement and Concrete Association (GCCA) GCCA Industry EPD Tool 2025.
58. Khoshnevis, B.; Hwang, D.; Yao, K.T.; Yeh, Z. Mega-Scale Fabrication by Contour Crafting. *IJISE* **2006**, *1*, 301, doi:10.1504/IJISE.2006.009791.
59. Khoshnevis B, WO 2007/050968 A2- Deployable Contour Crafting, University of Southern California 2007.
60. Contour Crafting Corporation, www.contourcrafting.com (Dostęp 20.09.2025).
61. Hasani, A.; Dorafshan, S. Transforming Construction? Evaluation of the State of Structural 3D Concrete Printing in Research and Practice. *Construction and Building Materials* **2024**, *438*, 137027, doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.137027.

62. Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z.; Salet, T. Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing. *Virtual and Physical Prototyping* **2016**, *11*, 209–225, doi:10.1080/17452759.2016.1209867.
63. Tu, H.; Wei, Z.; Bahrami, A.; Ben Kahla, N.; Ahmad, A.; Özkılıç, Y.O. Recent Advancements and Future Trends in 3D Concrete Printing Using Waste Materials. *Developments in the Built Environment* **2023**, *16*, 100187, doi:10.1016/j.dibe.2023.100187.
64. Cai, J.; Wang, J.; Zhang, Q.; Du, C.; Meloni, M.; Feng, J. State-of-the-Art of Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Case Studies in Construction Materials* **2024**, *21*, e03847, doi:10.1016/j.cscm.2024.e03847.
65. Kamhawi, A.; Aghaei Meibodi, M. Techniques and Strategies in Extrusion Based 3D Concrete Printing of Complex Components to Prevent Premature Failure. *Automation in Construction* **2024**, *168*, 105768, doi:10.1016/j.autcon.2024.105768.
66. 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. *Mater Struct* **2012**, *45*, 1221–1232, doi:10.1617/s11527-012-9828-z.
67. Lim, S.; Buswell, R.A.; Le, T.T.; Austin, S.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes. *Automation in Construction* **2012**, *21*, 262–268, doi:10.1016/j.autcon.2011.06.010.
68. Wang, X.; Li, W.; Guo, Y.; Kashani, A.; Wang, K.; Ferrara, L.; Agudelo, I. Concrete 3D Printing Technology for Sustainable Construction: A Review on Raw Material, Concrete Type and Performance. *Developments in the Built Environment* **2024**, *17*, 100378, doi:10.1016/j.dibe.2024.100378.
69. Cesaretti, G.; Dini, E.; De Kestelier, X.; Colla, V.; Pambaguian, L. Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology. *Acta Astronautica* **2014**, *93*, 430–450, doi:10.1016/j.actaastro.2013.07.034.
70. Girskas, G.; Kligys, M. 3D Concrete Printing Review: Equipment, Materials, Mix Design, and Properties. *Buildings* **2025**, *15*, 2049, doi:10.3390/buildings15122049.
71. Arrêteau, M.; Fabien, A.; El Haddaji, B.; Chateigner, D.; Sonebi, M.; Sebaibi, N. Review of Advances in 3D Printing Technology of Cementitious Materials: Key Printing Parameters and Properties Characterization. *Buildings* **2023**, *13*, 1828, doi:10.3390/buildings13071828.
72. Mai, I.; Lowke, D.; Perrot, A. Fluid Intrusion in Powder Beds for Selective Cement Activation – An Experimental and Analytical Study. *Cement and Concrete Research* **2022**, *156*, 106771, doi:10.1016/j.cemconres.2022.106771.
73. *RILEM TC 276-DFC: Digital Fabrication with Cement-Based Materials*;
74. *RILEM TC 303-PFC: Performance Requirements and Testing of Fresh Printable Cement-Based Materials*;
75. *ACI Committee 564: 3-D Printing with Cementitious Materials*; https://www.concrete.org/getinvolved/committees/directoryofcommittees/acommittee/home.aspx?committee_code=C0056400 (Dostęp 10.09.2025);
76. *ASTM F42: The Slate of Standards Would Support Quality Control for 3D-Printed Concrete, or Cementitious Materials.*;
77. European Commission Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast) (Text with EEA Relevance) 2024.

78. Skibicki, S.; Federowicz, K.; Hoffmann, M.; Chougan, M.; Sibera, D.; Cendrowski, K.; Techman, M.; Pacheco, J.N.; Liard, M.; Sikora, P. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. *Materials* **2024**, *17*, 2580, doi:10.3390/ma17112580.
79. Motalebi, A.; Khondoker, M.A.H.; Kabir, G. A Systematic Review of Life Cycle Assessments of 3D Concrete Printing. *Sustainable Operations and Computers* **2024**, *5*, 41–50, doi:10.1016/j.susoc.2023.08.003.
80. Chen, Y.; Rahmani, H.; Schlangen, E.; Çopuroğlu, O. An Approach to Develop Set-on-Demand 3D Printable Limestone-Calcined Clay-Based Cementitious Materials Using Calcium Nitrate. *Cement and Concrete Composites* **2024**, *145*, 105373, doi:10.1016/j.cemconcomp.2023.105373.
81. Jia, L.; Jia, Z.; Zhang, Z.; Tang, Z.; Wang, W.; Cao, R.; Zhang, Y. Effect of Recycled Brick Powder with Various Particle Features on Early-Age Hydration, Water State, and Rheological Properties of Blended Cement Paste in the Context of 3D Printing. *Construction and Building Materials* **2024**, *418*, 135428, doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135428.
82. İlcan, H.; Özkılıç, H.; Tuğluca, M.S.; Şahmaran, M. Interlayer Mechanical Performance of 3D-Printed Cementitious Systems: A Comprehensive Study on Operational and Material Parameters. *Construction and Building Materials* **2024**, *419*, 135463, doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135463.
83. Marchment, T.; Sanjayan, J.G.; Nematollahi, B.; Xia, M. Interlayer Strength of 3D Printed Concrete. In *3D Concrete Printing Technology*; Elsevier, 2019; pp. 241–264 ISBN 978-0-12-815481-6.
84. Hager, I.; Maroszek, M.; Mróz, K.; Kęsek, R.; Hebda, M.; Dvorkin, L.; Marchuk, V. Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials* **2022**, *15*, 4112, doi:10.3390/ma15124112.
85. Wolfs, R.J.M.; Bos, F.P.; Salet, T.A.M. Hardened Properties of 3D Printed Concrete: The Influence of Process Parameters on Interlayer Adhesion. *Cement and Concrete Research* **2019**, *119*, 132–140, doi:10.1016/j.cemconres.2019.02.017.
86. Rahman, M.; Rawat, S.; Yang, R. (Chunhui); Mahil, A.; Zhang, Y.X. A Comprehensive Review on Fresh and Rheological Properties of 3D Printable Cementitious Composites. *Journal of Building Engineering* **2024**, *91*, 109719, doi:10.1016/j.job.2024.109719.
87. Si, W.; Khan, M.; McNally, C. A Comprehensive Review of Rheological Dynamics and Process Parameters in 3D Concrete Printing. *J. Compos. Sci.* **2025**, *9*, 299, doi:10.3390/jcs9060299.
88. Souza, M.T.; Sakata, R.D.; Onghero, L.; Magalhães, L.C.; De Campos, C.E.M.; De Oliveira, A.P.N.; Repette, W.L. Insights into the “Accelerating Effect” of Sucrose on Cement Pastes. *Journal of Building Engineering* **2022**, *59*, 105053, doi:10.1016/j.job.2022.105053.
89. Bun, P.; Cyr, M.; Laniesse, P.; Bun, K.N.; Idir, R. Concrete Made of 100% Recycled Materials - Feasibility Study. *Resources, Conservation and Recycling* **2022**, *180*, 106199, doi:10.1016/j.resconrec.2022.106199.
90. Obermeier, N.; Wiese, F.; Kustermann, A.; Stengel, T. 3D Printing Cement-Based Materials Using 100% of Recycled Aggregates. In *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*; Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Nature Switzerland: Cham, 2023; Vol. 349, pp. 648–657 ISBN 978-3-031-32518-2.

91. 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* **2019**, *205*, 586–601, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235.
92. Kruger, J.; Zeranka, S.; Van Zijl, G. 3D Concrete Printing: A Lower Bound Analytical Model for Buildability Performance Quantification. *Automation in Construction* **2019**, *106*, 102904, doi:10.1016/j.autcon.2019.102904.
93. Rahul, A.V.; Santhanam, M.; Meena, H.; Ghani, Z. 3D Printable Concrete: Mixture Design and Test Methods. *Cement and Concrete Composites* **2019**, *97*, 13–23, doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014.
94. *Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC*; Roussel, N., Lowke, D., Eds.; RILEM State-of-the-Art Reports; Springer International Publishing: Cham, 2022; Vol. 36; ISBN 978-3-030-90534-7.
95. Baz, B.; Aouad, G.; Remond, S. Effect of the Printing Method and Mortar's Workability on Pull-out Strength of 3D Printed Elements. *Construction and Building Materials* **2020**, *230*, 117002, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117002.
96. Labonnote, N.; Rønquist, A.; Manum, B.; Rütther, P. Additive Construction: State-of-the-Art, Challenges and Opportunities. *Automation in Construction* **2016**, *72*, 347–366, doi:10.1016/j.autcon.2016.08.026.
97. Apis Cor - Technologies 2025, www.apis-cor.com/technologies (Dostęp 20.09.2025).
98. Lee, Y.J.; Lee, S.-H.; Kim, J.H.; Jeong, H.; Han, S.-J.; Kim, K.S. Interlayer Bond Strength of 3D Printed Concrete Members with Ultra High Performance Concrete (UHPC) Mix. *Buildings* **2024**, *14*, 2060, doi:10.3390/buildings14072060.
99. European Commission *Energy Performance of Buildings Directive*. 2025, p. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (Dostęp 3.09.2025).
100. CEN *EN 13499:2003 - Thermal Insulation Products for Buildings - External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) Based on Expanded Polystyrene - Specification*; EN 13499:2003; CEN: Brussels, Belgium, **2003**.
101. European Association for ETICS (EAE) About ETICS 2025.
102. Ramesh, A.; Navaratnam, S.; Rajeev, P.; Sanjayan, J. Thermal Performance and Life Cycle Analysis of 3D Printed Concrete Wall Building. *Energy and Buildings* **2024**, *320*, 114604, doi:10.1016/j.enbuild.2024.114604.
103. Ravula, R.; Gatheeshgar, P. On the Thermal-Energy Performance of 3D Printed Concrete Wall Panels Designed with Varying Insulation Ratios. *Journal of Building Engineering* **2023**, *77*, 107374, doi:10.1016/j.jobe.2023.107374.
104. Tamimi, A.A.; Hassan, H.; Rodriguez-Ubinas, E.; Alhaidary, H.; Mansouri, A. Thermal Performance of 3D Concrete Printed Walls: Calculated and in-Situ Measured U-Values. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* **2024**, *23*, 1903–1915, doi:10.1080/13467581.2023.2278467.
105. Banihashemi, S.; Akbarnezhad, A.; Sheikhhoshkar, M.; Bril El Haouzi, H.; Rolfe, B. 3D Printing in Construction: Sustainable Technology for Building Industry. *Prog Addit Manuf* **2025**, doi:10.1007/s40964-025-01314-y.
106. Wang, Y.; Sun, J.; Wang, X.; Huang, B.; Xu, S.; Shang, J.; Li, S.; Song, C.; Wang, D. Environmental and Economic Evaluation of a Prefabricated 3D-Printed Structural Units Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste: A Case Study in China. *Energy and Buildings* **2025**, 116405, doi:10.1016/j.enbuild.2025.116405.

107. *EN 1015-3:1999 Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*; CEN: Brussels, Belgium, **1999**.
108. *EN 196-1:2016 Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength*; **2016**.
109. *CEN EN 12350-2 Testing Fresh Concrete - Part 2: Slump Test*; EN 12350-2:2019; CEN: Brussels, Belgium, **2019**.
110. *CEN EN 12350-5:2019. Testing Fresh Concrete - Part 5: Flow Table Test*; EN 12350-5:2019; CEN: Brussels, Belgium, **2019**.
111. *CEN EN 196-3:2016. Methods of Testing Cement - Part 3: Determination of Setting Times and Soundness*; EN 196-3:2016; CEN: Brussels, Belgium, **2016**.
112. *CEN EN ISO 8301:1998 Thermal Insulation - Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties - Heat Flow Meter Apparatus*; Brussels: CEN, **1998**.
113. *CEN EN 12667:2001 Thermal Performance of Building Materials and Products - Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods - Products of High and Medium Thermal Resistance*; EN 12667:2001; Brussels: CEN, **2001**.
114. ASTM International *ASTM C518-91 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*; ASTM C518-91; West Conshohocken, PA, **1991**.
115. Jayathilakage, R.; Rajeev, P.; Sanjayan, J. Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experimental Comparison. *Buildings* **2022**, *12*, 1190, doi:10.3390/buildings12081190.
116. Roussel, N. Rheological Requirements for Printable Concretes. *Cement and Concrete Research* **2018**, *112*, 76–85, doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005.
117. CEMBUREAU *Environmental Product Declaration (EPD) According to EN 15804 and ISO 14025*; CEMBUREAU - The European Cement Association: Brussels, Belgium, 2020; p. <https://cembureau.eu/media/3lpreko/epd-for-cement-cem-i.pdf> (Accessed on 5 September 2025);
118. Hájek, P.; Fiala, C.; Kynčlová, M. Life Cycle Assessments of Concrete Structures – a Step towards Environmental Savings. *Structural Concrete* **2011**, *12*, 13–22, doi:10.1002/suco.201000026.
119. Teixeira, E.R.; Mateus, R.; Camões, A.F.; Bragança, L.; Branco, F.G. Comparative Environmental Life-Cycle Analysis of Concretes Using Biomass and Coal Fly Ashes as Partial Cement Replacement Material. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *112*, 2221–2230, doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.124.
120. SimaPro Ecoinvent LCA Database v3.8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Retrieved from SimaPro Software. 2023.

Dorobek naukowy

Dane bibliometryczne Autora rozprawy (dane aktualne na dzień: 30.09.2025 r.):

- Wskaźnik Hirscha: 6 (wg Scopus)
- Całkowita liczba cytowań: 74 (wg Scopus)
- Sumaryczny Impact Factor: 38,9

Numer ORCID: 0000-0001-6554-4613

Publikacje w czasopismach z listy Journal Citation Reports (JCR):

- 1) Hager Izabela, **Maroszek Marcin**, Mróz Katarzyna, Kęsek Rafał, Hebda Marek, Dvorkin Leonid, Marchuk Vitaliy: *Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications*. *Materials*. 2022, 15(12), 4112. DOI: 10.3390/ma15124112, IF: 3.748
- 2) Dvorkin Leonid, Marchuk Vitaliy, Hager Izabela, **Maroszek Marcin**: *Design of Cement–Slag Concrete Composition for 3D Printing*. *Energies*. 2022, 15(13), 4610. DOI: 10.3390/en15134610, IF: 3.252
- 3) Dziura Paweł, **Maroszek Marcin**, Góra Mateusz, Rudziewicz Magdalena, Pławecka Kinga, Hebda Marek: *Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation*. *Materials*. 2023, 16(17), 5772. DOI: 10.3390/ma16175772, IF: 3.4
- 4) Rudziewicz Magdalena, **Maroszek Marcin**, Góra Mateusz, Dziura Paweł, Mróz Katarzyna, Hager Izabela, Hebda Marek: *Feasibility Review of Aerated Materials Application in 3D Concrete Printing*. *Materials*. 2023, 16(17), 6032. DOI: 10.3390/ma16176032, IF: 3.4
- 5) Dvorkin Leonid, Marchuk Vitaliy, Mróz Katarzyna, **Maroszek Marcin**, Hager Izabela: *Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies*. *Applied Sciences*. 2024, 14(7), 3038. DOI: 10.3390/app14073038, IF: 2.5
- 6) Rudziewicz Magdalena, **Maroszek Marcin**, Setlak Kinga, Góra Mateusz, Hebda Marek: *Optimization of Foams- Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Mixtures Dedicated for 3D Printing*. *Materials*. 2024, 17(16), 4106. DOI: 10.3390/ma17164106, IF: 3.1
- 7) **Maroszek Marcin**, Rudziewicz Magdalena, Hutyra Adam, Dziura Paweł, Hebda Marek: *Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency*. *Applied Sciences*. 2024, 14(24), 11866. DOI: 10.3390/app142411866, IF: 2.5

- 8) Rudziewicz Magdalena, **Maroszek Marcin**, Hutyra Adam, Góra Michał, Rusin-Żurek Karina, Hebda Marek: *Influence of Foaming Agents and Stabilizers on Porosity in 3D Printed Foamed Concrete*. Processes. 2025, 13(2), 403. DOI: 10.3390/pr13020403, IF: 2.5
- 9) Rudziewicz Magdalena, Hutyra Adam, **Maroszek Marcin**, Korniejenko Kinga, Hebda Marek: *3D-Printed Lightweight Foamed Concrete with Dispersed Reinforcement*. Applied Sciences. 2025, 15(8), 4527. DOI: 10.3390/app15084527, IF: 2.5
- 10) Jaróg Tomasz, Góra Mateusz, **Maroszek Marcin**, Hodor Krzysztof, Mróz Katarzyna, Hebda Marek, Szechińska-Hebda Magdalena: *Biodegradable Meets Functional: Dual-Nozzle Printing of Eco-Conscious Parklets with Wood-Filled PLA*. Materials. 2025, 18(13), 2951. DOI: 10.3390/ma18132951, IF: 3.4
- 11) **Maroszek Marcin**, Hager Izabela, Mróz Katarzyna, Sitarz Mateusz, Hebda Marek: *Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials- Influence of Application Time of Subsequent Layers*. Materials. 2025, 18(16), 3845. DOI: 10.3390/ma18163845, IF: 3.4
- 12) **Maroszek Marcin**, Rudziewicz Magdalena, Rusin-Żurek Karina, Hager Izabela, Hebda Marek: *Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing*. Materials. 2025, 18(18), 4387. DOI: 10.3390/ma18184387, IF: 3.2
- 13) Rudziewicz Magdalena, **Maroszek Marcin**, Hebda Marek: *Comparison of porosity and thermal conductivity of concrete and alkali-activated hybrid binders in 3D-printed fiber-reinforced foamed composites*. Materials. 2025, 18(19), 4498. DOI: doi.org/10.3390/ma18194498, IF: 3.2
- 14) **Maroszek Marcin**, Rudziewicz Magdalena, Hebda Marek: *Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review*. Materials. 2025, 18(19), 4517. DOI: doi.org/10.3390/ma18194517, IF: 3.2

Udział w konferencjach naukowych:

- 1) Ogólnopolska konferencja: Nowe wyzwania dla polskiej nauki- edycja IX; 2-5.09.2021; Gdańsk. Tytuł wystąpienia: „Badanie parametrów wytrzymałościowych próbek żywic fotoutwardzalnych z dodatkiem grafenu i nanorurek wytworzonych metodą addytywną”.
- 2) Ogólnopolska konferencja: IV edycja konferencji „Nowe trendy w badaniach naukowych- wystąpienie młodego naukowca”; 5-7.11.2021; Kraków.

- Tytuł wystąpienia: „Metody wytwarzania prefabrykowanych elementów betonowych z wykorzystaniem technologii druku 3D”.
- 3) Konferencja międzynarodowa: IV International Turkiye World Congress on Science and Engineering (TURK-COSE 2022); 23-24.06.2022; online. Tytuł wystąpienia: „Material properties suitable for 3D printing technology of construction elements”.
 - 4) Ogólnopolska konferencja: Nowe wyzwania dla polskiej nauki: edycja XIII; 10-14.09.2023; online. Tytuł wystąpienia: „Materiały o obniżonym śladzie węglowym stosowane w technologii druku 3D z betonu”.
 - 5) Ogólnopolska konferencja: Nowe wyzwania dla polskiej nauki: edycja XV; 13-15.09.2024; online. Tytuł wystąpienia: „Zastosowanie technologii druku 3D w zrównoważonym budownictwie”.
 - 6) Konferencja międzynarodowa: M-ERA.NET “Advanced Materials & Battery Technologies for a Sustainable Future”; 1-2.04.2025; Drezno, Niemcy. Tytuł wystąpienia (poster): „Foamed Geopolymer Made by Additive Manufacturing for the Construction Technology Applications (3D-FOAM)”.
 - 7) Konferencja międzynarodowa: 24th Materials Engineering Colloquium (WTK 2025); 2-3.04.2025; Chemnitz, Niemcy. Tytuł wystąpienia (poster): „Evaluation of copper powders mechanical alloying with silicon carbide for the Binder Jetting 3D printing process”.






Udział w projektach badawczych:

- 1) 11.2021- 09.2022, udział w projekcie badawczo–rozwojowym Partnera ATMAT Sp. z o.o. pt. „Opracowanie innowacyjnych rozwiązań konstruowania wielofunkcyjnych urządzeń do szybkiego prototypowania i produkcji niskoseryjnej w sposób zautomatyzowany i bezobsługowy” (nr POIR.01.01.01-00-0124/19) w ramach zadań związanych z konstruowaniem urządzeń do druku 3D, w tym układów napędowych osi roboczych drukarki, komory roboczej oraz postprocessingu.
- 2) 11.2020-11.2021, udział w projekcie badawczo–rozwojowym Unimetal Recycling Sp. z o.o. pt. „Opracowanie innowacyjnej w pełni zautomatyzowanej i mobilnej technologii recyklingu katalizatorów” (nr POIR.01.01.01-00-0648/19) w ramach zadań związanych z konstruowaniem urządzeń przetwarzających zużyte katalizatory samochodowe oraz ich integrowaniem w linii technologicznej.

- 3) 2021- obecnie, udział w projekcie badawczo–rozwojowym partnera ATMAT Sp. z o.o. pt. „Spienione materiały geopolimerowe dla technologii przyrostowych stosowanych w budownictwie” (akronim: 3D-FOAM) o numerze: M-ERA.NET3/2021/115/3D-FOAM/2022.
- 4) 2023- obecnie, udział w projekcie badawczo–rozwojowym partnera ATMAT Sp. z o.o. pt. „Zrównoważone wysokowydajne funkcjonalne kompozyty gradientowe wzmacniane cząstkami Cu/SiC do zastosowań elektrycznych wytwarzane przez zaawansowane procesy produkcyjne” (akronim: SHAPE) o numerze: M-ERA.NET3/2023/84/SHAPE/2024.

Article

Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency

 Marcin Maroszek , Magdalena Rudziewicz * , Adam Hutyra , Paweł Dziura  and Marek Hebda * 

Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; marcin.maroszek@doktorant.pk.edu.pl (M.M.); adam.hutyra@doktorant.pk.edu.pl (A.H.); pawel.dziura@doktorant.pk.edu.pl (P.D.)

* Correspondence: magdalena.rudziewicz@doktorant.pk.edu.pl (M.R.); marek.hebda@pk.edu.pl (M.H.)

Abstract: In recent years, three-dimensional concrete printing (3DCP) has garnered significant attention within the scientific community. The ongoing development and widespread adoption of this technology in the near future will be nearly inevitable. However, to ensure the safe and effective use of 3DCP in building construction, standardization of its processes is essential. A critical component of this standardization involves guaranteeing the repeatability of element production, regardless of variations in shape or material composition. Therefore, the present study focuses on analyzing factors that influence extrusion efficiency, incorporating measurements of material dispensing rates relative to input parameters. Based on the results, it was found that reducing the printer nozzle size from 20 mm to 12 mm significantly decreases the extrusion efficiency, resulting in a 15% reduction. The addition of polypropylene fibers to the concrete mixture has an even greater impact, reducing extrusion efficiency by up to 28%. On the other hand, changing the mixture's flow from 150 mm to 130 mm had relatively minor effect, decreasing process efficiency by only 4.5%. To achieve consistent repeatability in the 3DCP process, introducing corrective factors adjusted for variations in input parameters appears to be a necessary step. The development and implementation of such adjustments will be a critical aspect of future research efforts aimed at optimizing 3D concrete printing technology.

Keywords: 3D concrete printing; extrusion; print parameters; Portland cement; fiber reinforcement



Citation: Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hutyra, A.; Dziura, P.; Hebda, M. Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 11866. <https://doi.org/10.3390/app142411866>

Academic Editor: Kang Su Kim

Received: 10 November 2024

Revised: 4 December 2024

Accepted: 13 December 2024

Published: 19 December 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In the last decade, significant advancements have been made in 3D concrete printing (3DCP) technology [1–4]. This progress has driven the development of specialized construction materials, including shotcrete [5], geopolymer concrete [6], and ultra-high-performance concrete (UHPC) [7]. Foamed concrete, or cellular lightweight concrete (CLC), has also gained attention as a promising material due to its superior thermal insulation, acoustic properties, and fire resistance [8–10]. The rapid advancement of 3D-printing technologies, combined with the growing diversity of materials, appears to reflect market demands aimed at mitigating excessive waste production and addressing skilled labor shortages [11,12]. Within the construction industry, 3D printing is increasingly valued for its environmental benefits, which include design flexibility, automation, reduced waste, lower raw material consumption, and decreased labor costs [13]. These advantages also contribute to substantial production cost savings by eliminating the need for formwork, minimizing labor input, and shortening project timelines, thereby enhancing the competitiveness of modern additive manufacturing technologies compared to traditional construction methods [14]. As a result, interest in 3D printing has extended beyond academic research into the industrial sector, where it is perceived as a means to drive innovation and achieve a competitive advantage over conventional solutions [11,15].

To establish 3D concrete printing (3DCP) technology as a key method for manufacturing building elements, standardization is essential [16,17]. Components produced via 3DCP must exhibit high repeatability and quality, with an absence of defects that could

compromise structural integrity [18]. Consequently, scientific research often focuses on the design and operation of print heads, with particular emphasis on the construction of printing nozzles [19,20] and the functional optimization of print heads [21,22].

The complexity of 3DCP technology, which integrates principles from both mechanics and materials engineering, necessitates extensive research, often involving numerical simulations to deepen understanding of specific technical challenges [23–25]. Given the growing diversity of materials employed in 3DCP, it is crucial to control all factors influencing the printing process to ensure that modifications in materials or design changes in print-head components do not degrade print quality.

Particular attention should be directed toward the potential use of waste materials as raw materials for printable substances, as this may be essential for incorporating sustainable development principles into construction [26]. Ensuring process repeatability in such conditions is critical for the safety and durability of structures. If discontinuities or interruptions occur during extrusion, structural defects may arise, reducing structural strength. Such defects, even if imperceptible, can lead to the narrowing of the deposited layer, weakening interlayer bonds and ultimately compromising the stability and durability of the structure as a whole [27].

Considering the above factors, achieving optimal print-head performance and precise parameter configuration is essential for high-quality 3D printing. Key aspects influencing print quality include:

1. Continuity of the printed path: The print head must ensure consistent material deposition along the designated path, maintaining uniformity and stable flow dynamics, which are crucial for achieving consistent layer formation;
2. Path stability (width and height): The shape of the printed path must remain stable and precise, with controlled width and height throughout the printing process. This stability is critical for maintaining the structural integrity of the printed element;
3. System ergonomics: The system design should promote ease of use, with user-friendly features such as efficient pre-print setup and easy cleaning of components. These ergonomic considerations contribute to a seamless operational experience;
4. Reliability of system design (uninterrupted process): The system should operate continuously without interruptions, demonstrating robust performance and resilience under typical operational conditions, which is critical for maintaining the reliability of the printing process.

Each of these parameters contributes directly to the consistency, efficiency, and overall success of the 3D-printing process, particularly in industrial applications where high standards of structural quality and user accessibility are paramount.

This article presents the influence of the most frequently and easily modified 3D-printing input factors on extrusion efficiency. Identifying these phenomena and determining their impact on the printing process is expected to enhance the quality and consistency of conducted research and drive further technological advancements, thereby facilitating the integration of this technology into the construction sector.

2. Materials and Methods

To achieve repeatability in 3D-printing processes, it is essential to verify all variables influencing print quality. Beyond the material properties, these factors include the design of individual components within the printing system (e.g., a mixing station aligned with the idea developed as part of the “Implementation Doctorate” and tested in industrial company conditions) as well as the processing parameters. Observed relationships will enable the determination of corrective factors that enhance the repeatability of printed components, thereby promoting broader adoption of this additive manufacturing method.

Performance tests of the print head were conducted in a laboratory equipped for 3D-printing technology testing.

2.1. Materials

The print head performance tests were conducted using a standard mixture designed for 3D concrete printing. This material demonstrates a flexural strength greater than 3.0 MPa and a compressive strength exceeding 18.0 MPa, compliant with the EN 13892-2 standard [28]. Beyond the necessary strength of the hardened material, it is also essential to ensure appropriate parameters for the fresh material intended for printing. It must facilitate proper extrusion through the print head, provide the necessary structural integrity to allow the stacking of subsequent layers, and ensure adhesion between layers. Proper material preparation is verified through a consistency test using a flow table, with a target flow value of approximately 150 mm. The mixture used in the study is based on CEM I 52.5R Portland cement and quartz sand (Table 1). To meet the required parameters described above, the material was modified with activating agents (concrete admixtures accelerating the setting), rheological additives (plasticizer), and fillers (limestone, microsilica).

Table 1. The mixture composition used for 3D-printing tests.

Component	Content (%)
Portland cement CEM I 52,5R	25.0
Quartz sand (0.1–1.0 mm)	65.0
Activating additives	2.0
Rheological additives	1.0
Mix fillers	7.0

The material was prepared from dry components. Preparation for testing involved mixing water with the pre-prepared blend at a 1:5 *w/w* (weight-to-weight) ratio. A mixing station aligned with the idea developed as part of the “Implementation Doctorate” was used to blend the material. The prepared and tested material was used within 20 min.

2.2. Additives

The effect of fiber additives on extrusion stability was verified. The use of dispersed reinforcement in cementitious composites is a technique that enhances flexural strength. Additionally, the incorporation of fibers helps reduce cracking in printed components due to shrinkage [29–32].

Polypropylene (PP) fibers serve as reinforcement in cement-based materials due to their lightweight nature, reduced susceptibility to alkaline environments, and high resistance to corrosion and deformation, resulting in composites with improved long-term performance characteristics [33].

The length of fibers used in concrete has a significant impact on its mechanical and rheological properties. Longer fibers more effectively bond larger areas of the material, increasing its tensile and flexural strength. However, they are more challenging to distribute uniformly within the mixture, which can lead to fiber clustering and weaken the structure. Additionally, longer fibers have a greater influence on the mixture’s rheology, potentially reducing workability and thereby affecting the efficiency of pumping and extrusion. The optimal fiber length depends on the specific application of the concrete and the technical requirements of the project, necessitating a balance between strength and workability [34,35].

In the experiment, polypropylene (PP) fibers with a diameter of 0.04 mm were used in two lengths: 6 mm and 12 mm (Figure 1). These fiber sizes are standard for construction applications involving prefabricated elements, making them widely available. They also align with sizes studied by various research teams, with their effects on the properties of 3D-printed concrete components being well documented [34–38]. The fiber size selection was additionally constrained by the printing infrastructure capabilities, as longer fibers caused blockages in the extruder screw, impeding material flow. Testing these two fiber

lengths aims to assess their impact on extrusion stability, which is a critical factor due to the potential for fiber adhesion and clogging within the internal components of the extruder.

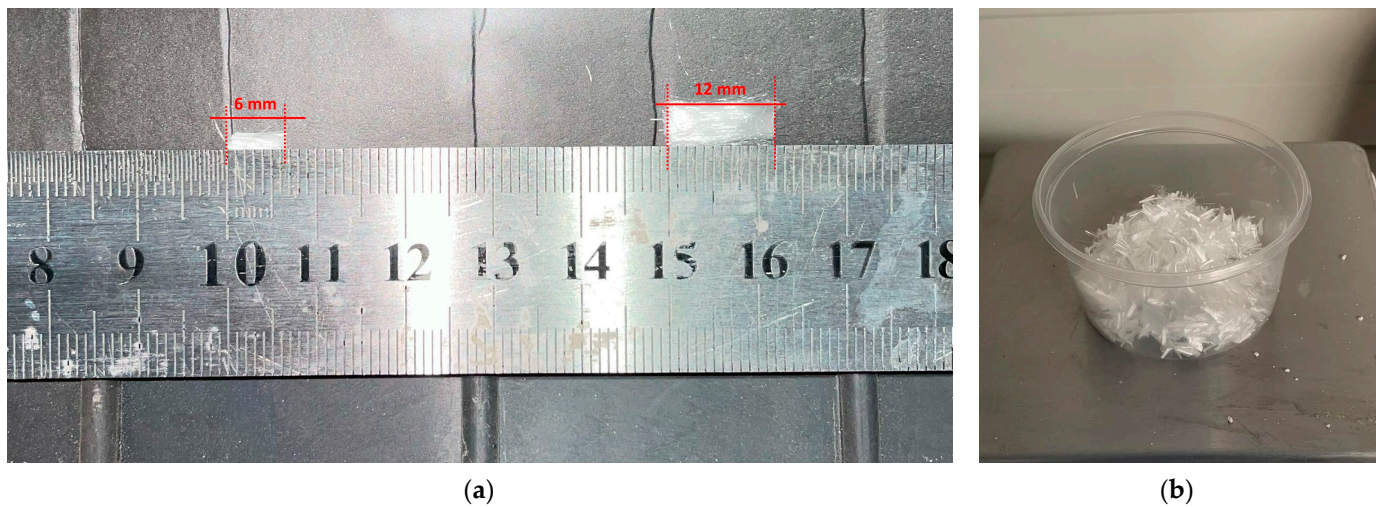


Figure 1. (a) Fiber sizes used in the test: 6 mm (left) and 12 mm (right); (b) general view of the fibers.

PP fibers, in the form of single filaments (Figure 1b), were added to the dry material batch. The measured dry ingredients were initially intensively mixed using a glue and mortar mixer to ensure uniform fiber distribution throughout the mass. Following this, the material batch was mixed with water and subjected to consistency and extruder performance tests.

2.3. Determination of Consistence of Fresh Mortar

To assess the consistency of the fresh material intended for evaluating the performance of the printing nozzle, a flow table test was conducted in accordance with the EN 1015-3 standard [39]. The device was operated manually during these measurements (Figure 2).



Figure 2. View of the flow table test device according to the PN EN 1015-3 standard.

The standardized cone was filled with the tested material, following compaction guidelines by performing a two-stage compaction. The test begins after the cone is removed and involves lifting the flow table 15 times using a handwheel.

Ensuring the appropriate consistency of the mixture is essential not only for the continuity of the printing process but also for maintaining the shape of the produced element. For the 3D-printing process, the target flow value is approximately 150 mm. This flow ensures the proper operation of the device and preserves the intended shape of the printed component.

2.4. Printing System

The tested printing system features a modular design that enhances the ergonomics of printer operation. Its simple assembly facilitates rapid preparation for use and simplifies the cleaning of components after printing is completed.

The print head consists of the following components:

1. Tank: With a volume of 20 L, it provides a material buffer for printing, ensuring a consistent supply throughout operations. Made of stainless steel, the tank is designed to resist the corrosive effects of geopolymer additives, ensuring durability and longevity;
2. Drive shaft: This is responsible for transmitting torque from the motor to the extruder screw;
3. Mixer blades: An integrated mixer is essential for preventing the decomposition of the material, ensuring a homogeneous consistency throughout the printing process. The mixer operates in synergy with other components to maintain the mix's quality, providing a consistent and reliable output necessary for the structural integrity of the printed object;
4. Quick clamp: This enables the rapid disassembly of the print head and its effective cleaning;
5. Sleeve with screw: This assembly regulates the correct dosage of material during printing. The sleeve, made of polyamide (PA6), is a replaceable component. The screw, constructed from stainless steel, is integral to the pumping and dosing system of the 3D printer, capable of handling concrete mixes. Designed for easy cleanup and resistance to corrosive substances, the screw features an L/D (length/diameter) ratio of 3.5, which was optimized based on results from previous tests, to ensure efficient dosing of reinforced materials while maintaining compatibility with foamed mixes;
6. Nozzle: Constructed from wear-resistant materials, the nozzle ensures long service life, even under the abrasive conditions associated with concrete and geopolymer mixes. Designed to be cost-effective, it allows for easy replacement, reducing downtime during maintenance. The manufacturing process is streamlined for ease of production, and the nozzle's design facilitates simple cleaning, which is crucial when switching between different mix types, such as foamed concrete and standard concrete;
7. Motor: The motor is the extruder drive element;
8. The diagram of the printing system used in the research, featuring a modular design that enhances the ergonomics of printer operation, is presented in Figure 3. Figure 4 shows the laboratory 3D printer prepared for print-head performance tests, along with a view of the internal components of the print head.

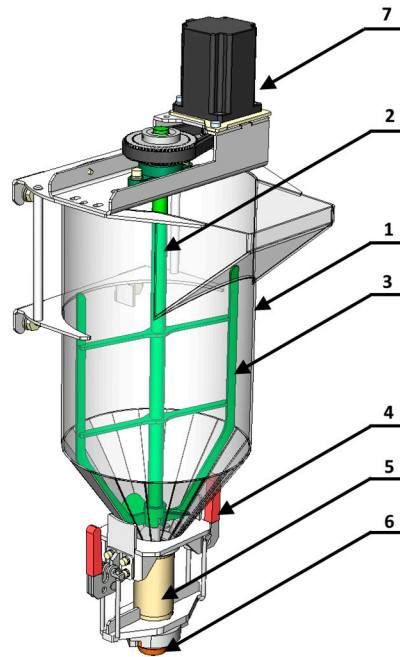


Figure 3. Diagram of the printing system used in the research: (1) tank, (2) drive shaft, (3) mixer blades, (4) quick clamp, (5) sleeve with screw, (6) nozzle, (7) motor.



(a)



(b)

Figure 4. (a) The laboratory 3D printer prepared for print-head performance testing; (b) the internal components of the print head.

2.5. Nozzles

The nozzle is the final executing component of the 3D printer, responsible for shaping the extruded material into its final form. This element determines the form and width of the extruded path. To ensure consistency in fabricated components, it is crucial that nozzle changes—often required based on specific tasks—do not compromise the quality of printed geometries.

To verify this, two nozzle sizes were tested: a 12 mm diameter nozzle (D12) and a 20 mm diameter nozzle (D20) (Figure 5).

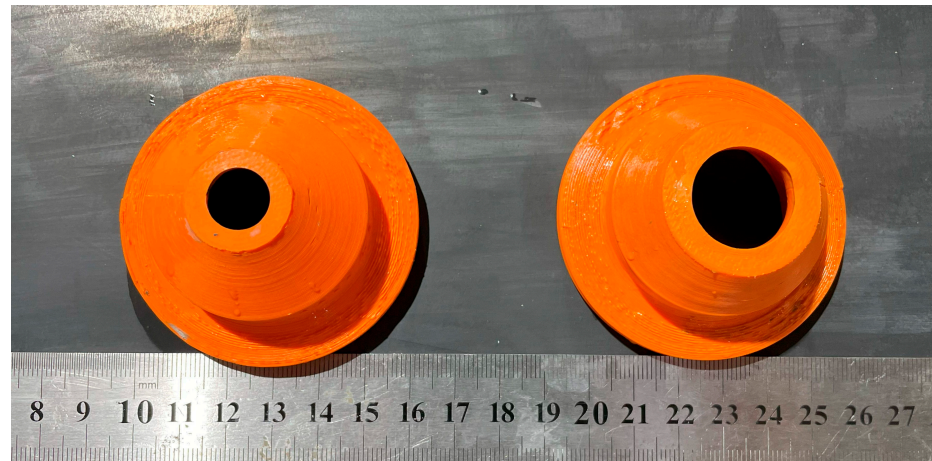


Figure 5. View of the nozzles with diameters used in the tests: 12 mm (left) and 20 mm (right).

2.6. Methods

The performance of the tested print head was evaluated by measuring the extruded mass of material over time. A laboratory 3D printer and a precision laboratory scale with an accuracy of 0.1 g and a maximum allowable weighing capacity of 20 kg were used for this purpose.

Each measurement trial was preceded by thorough cleaning and preparation of the testing environment. The protocol for each test involved the following steps:

1. Preparation and weighing of dry components: The dry materials were prepared and weighed accurately;
2. Measurement of water volume: The required amount of water was measured separately;
3. Mixing of the material: The components were mixed using a laboratory mixer for 5 min at 120 RPM;
4. Consistency verification: The material's consistency was checked using a flow table test;
5. Loading the material into the printhead: The prepared material was loaded into the print head;
6. Pre-print extrusion: A pre-print extrusion was conducted to fill the system with material;
7. Measurement of extruded material mass: The mass of extruded material was measured every 20 s.

For each test, a batch of material weighing 12 kg was prepared, except for tests involving polypropylene fibers (PP), where the material batch was limited to 6 kg. The prepared material was used within 20 min to ensure that any changes in consistency did not influence the measurements.

3. Results

3.1. Extrusion Efficiency Dependence on Extruder Rotational Speed

A comparative test on extrusion efficiency as a function of extruder rotational speed was conducted at three distinct speeds: 37.3 RPM, 32.8 RPM, and 30.0 RPM. For all measurements in this series, a material consistency of 150 mm was maintained, and a 20 mm diameter nozzle was used.

Based on the results, it can be concluded that material extrusion through the print head does not proceed entirely linearly, as evidenced in the graph illustrating the increase in extruded mass (Figure 6). A notable point is observed where the amount of material in the reservoir becomes too low to sustain effective extrusion, resulting in a flattening of the graph in the final phase of the test. This is even more apparent in Figure 7, where a sharp reduction in extrusion efficiency is observed. In this and subsequent measurement series, it can be noted that extrusion efficiency decreases almost from the beginning of the test as the material level in the reservoir diminishes. However, a sharp reduction in extrusion occurs when there is less than 4 kg of material in the reservoir.

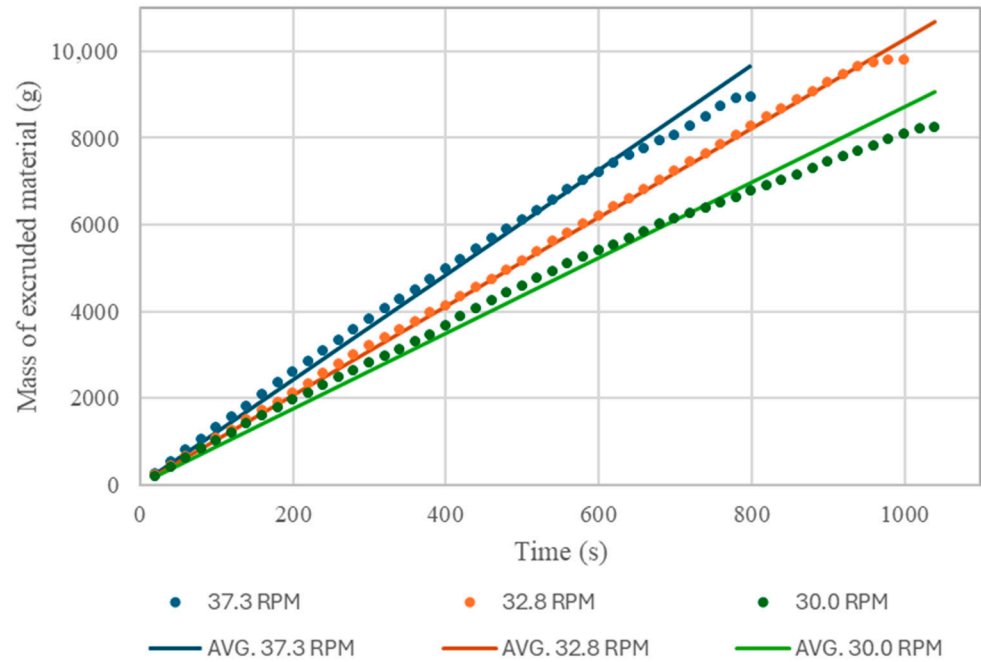


Figure 6. Graphic depictions of printhead performance as a function of set extruder speed.

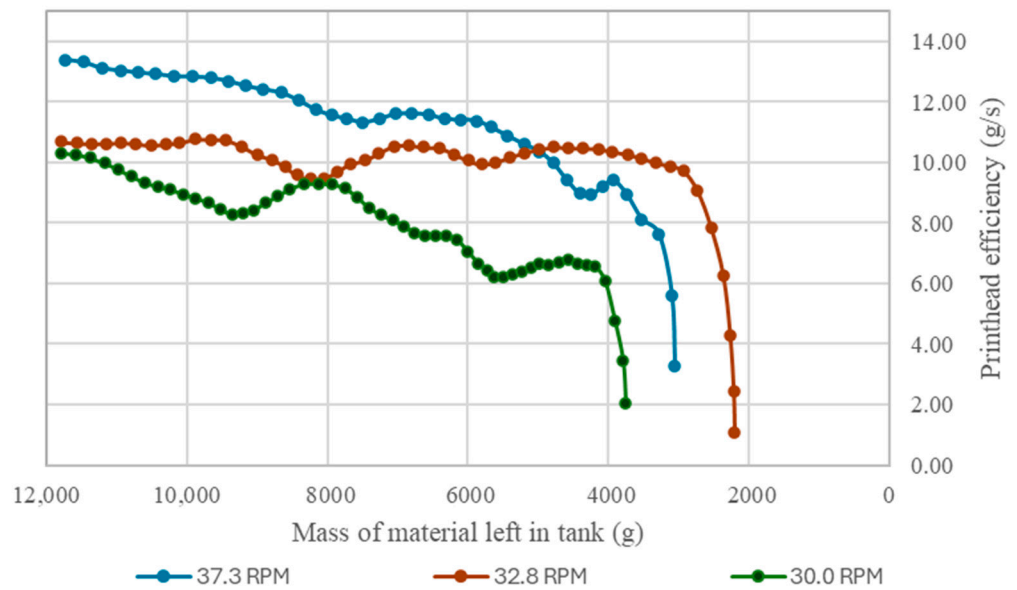


Figure 7. Graphic depictions of printhead efficiency as a function of mass of material left in tank.

It is also noteworthy that the extrusion rate does not change perfectly proportionally with adjustments in rotational speed. At 32.8 RPM, the extrusion efficiency is approximately 3.5% lower than expected, while at 30.0 RPM, the efficiency drops by up to 10.5% (Table 2).

Table 2. Dependence of rotational speed on printhead efficiency.

Rotating speed (RPM)	37.3	32.8	30
Rate of rotating speed	100.00%	87.94%	80.43%
Printhead efficiency (g/s)	12.11	10.28	8.71
Rate of printhead efficiency	100.00%	84.89%	71.92%

3.2. Extrusion Efficiency Dependence on Mixture Consistency

The subsequent test focused on evaluating the impact of material consistency on extrusion efficiency. To this end, trials were conducted using two materials with different consistencies, 150 mm and 130 mm, measured by a flow table (Figure 8).

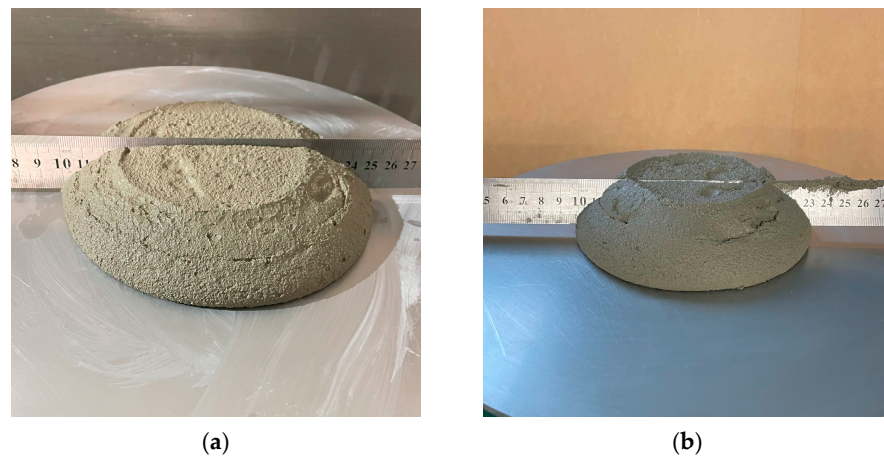


Figure 8. Material tested on flow table according to the PN EN 1015-3; (a) sample of 150 mm; (b) sample of 130 mm.

As expected, the results indicate a reduction in extrusion efficiency for the more viscous material (Figure 9). The sample with a flow of 130 mm was extruded at an average rate of 11.57 g/s, which is approximately 4.5% lower than the extrusion rate for the material with standard consistency. Similar to the previous test, irregular extrusion and a systematic decrease in efficiency were observed as the amount of material in the reservoir decreased (Figure 10). In this case, the less fluid consistency may have contributed to a 6% reduction in the utilized feedstock material.

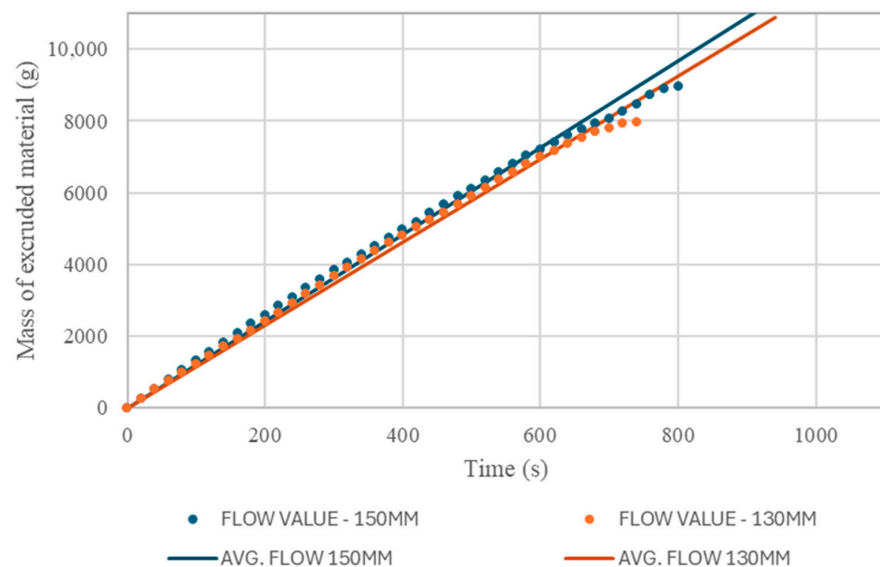


Figure 9. Graphic depictions of printhead performance as a function of input material consistency.

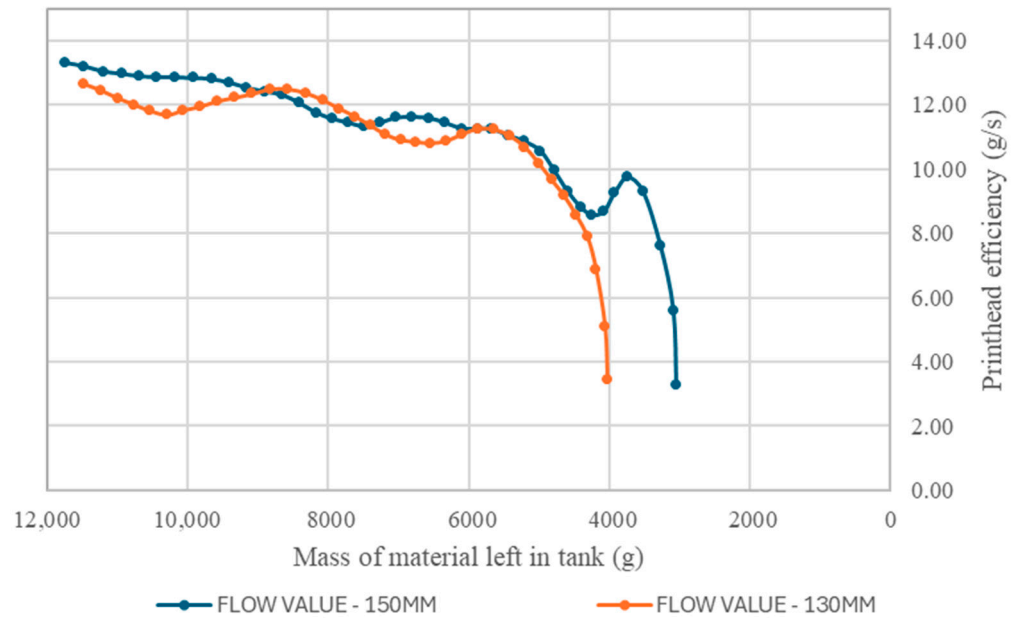


Figure 10. Graphic depictions of printhead efficiency as a function of mass of material left in tank.

3.3. Extrusion Efficiency Dependence on Nozzle Size

The influence of nozzle size on extrusion was examined by testing two nozzle diameters: 12 mm and 20 mm. These tests were conducted at two extreme rotational speeds: 37.3 RPM and 30.0 RPM, with a mixture consistency of approximately 150 mm maintained across all tests (Figure 11).

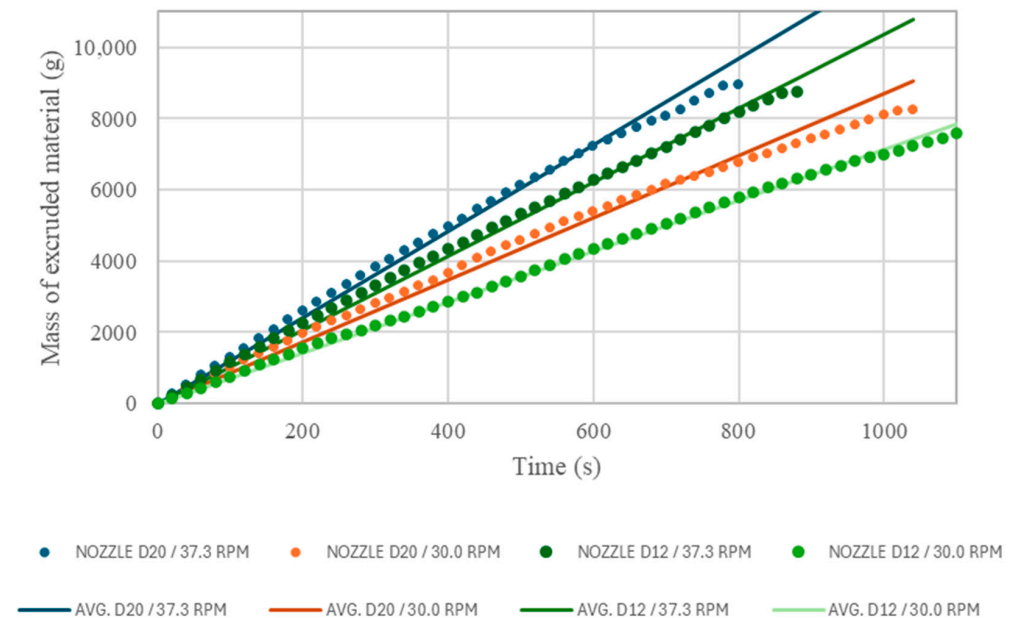


Figure 11. Graphic depictions of printhead efficiency depending on nozzle size.

A significant reduction in extrusion efficiency was observed as a result of decreasing the nozzle size. At 37.3 RPM, reducing the nozzle size resulted in a 14.3% decrease in extrusion rate, while at 30.0 RPM, the decrease reached 17.9%.

This finding is particularly important, as the nozzle size may frequently vary depending on the dimensions of the printed object. Observations suggest that a smaller nozzle restricts material flow, thereby reducing extrusion efficiency. To achieve consistent param-

ters for printed elements, it is essential to introduce extrusion coefficients that compensate for this observed effect.

Additionally, based on the graph in Figure 12, it can be observed that the amount of material inside the reservoir has a greater impact on 20 mm nozzles than on smaller ones, regardless of rotational speed. Extrusion efficiency was less constrained for the 12 mm nozzle during the final phase of the test. Again, the end of extrusion is evident, occurring when less than 4 kg of material remains in the reservoir. In this regard, the 20 mm nozzles performed slightly better, allowing approximately 2.5% more material to be extruded compared to the smaller diameter nozzles.

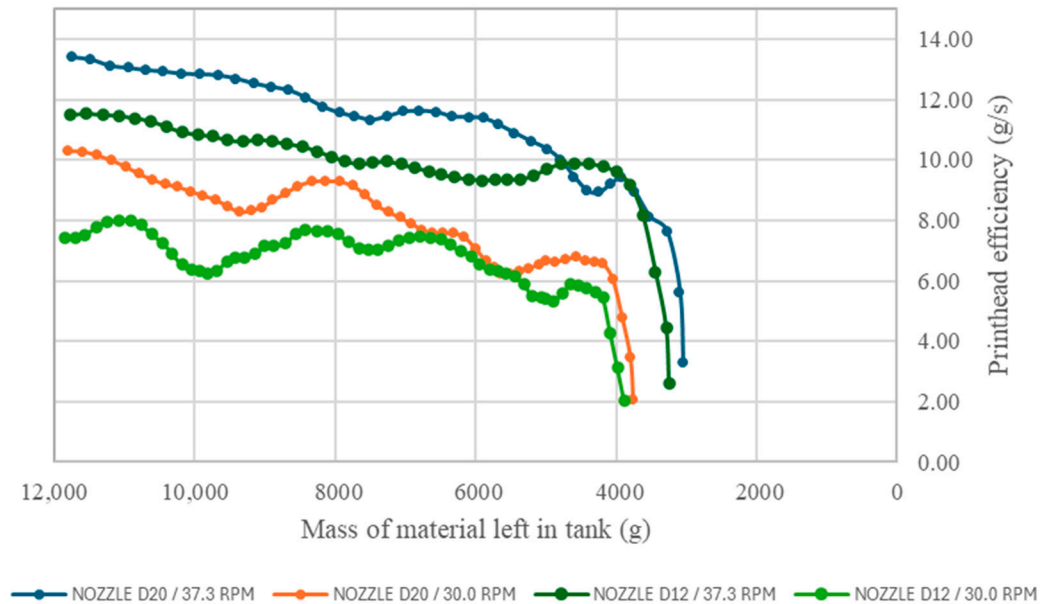


Figure 12. Graphic depictions of printhead efficiency as a function of mass of material left in tank.

3.4. Extrusion Efficiency Dependence on Reinforcing Fiber Addition

Incorporating fibers into cement-based material offers several advantages in 3D printing. In addition to enhancing flexural strength, fibers reduce the risk of shrinkage-induced cracking. Therefore, it is crucial to assess their impact on the performance of the printing system. In this study, tests were conducted using a material containing polypropylene (PP) fibers in two lengths: 6 mm and 12 mm. The fibers were added during the mixing stage at a concentration of 0.04% by weight. The addition of fibers to the material occurred before the start of the test—the fibers were thoroughly mixed with the dry components of the mixture to ensure their uniform distribution within the tested material.

Measurements were taken with two nozzle diameters, 20 mm and 12 mm, and the extruder rotational speed was set at 37.3 RPM, as shown in Figures 13 and 14, respectively. The material consistency corresponded to a flow table measurement of 150 mm.

The presence of fibers noticeably reduces extrusion efficiency. For the 20 mm nozzle, adding fibers decreased the extrusion rate by 8.8 to 12.6% compared to fiber-free material. For the 12 mm nozzle, the efficiency loss was more pronounced, ranging from 18 to 28%. This reduction occurs due to the altered material structure; adding fibers increases material cohesion, thereby restricting pumpability.

In both cases, material with longer fibers caused more significant changes in extrusion performance. Additionally, the 12 mm nozzle exhibited notably higher resistance, likely due to its geometry, which makes extruding fiber-laden material more challenging.

Figure 15 presents the changes in extrusion performance associated with nozzle size and fiber addition. Notably, 12 mm fibers more severely restrict extrusion with the 12 mm nozzle, suggesting proximity to the maximum fiber length suitable for this configuration. Using longer fibers may risk clogging the system.

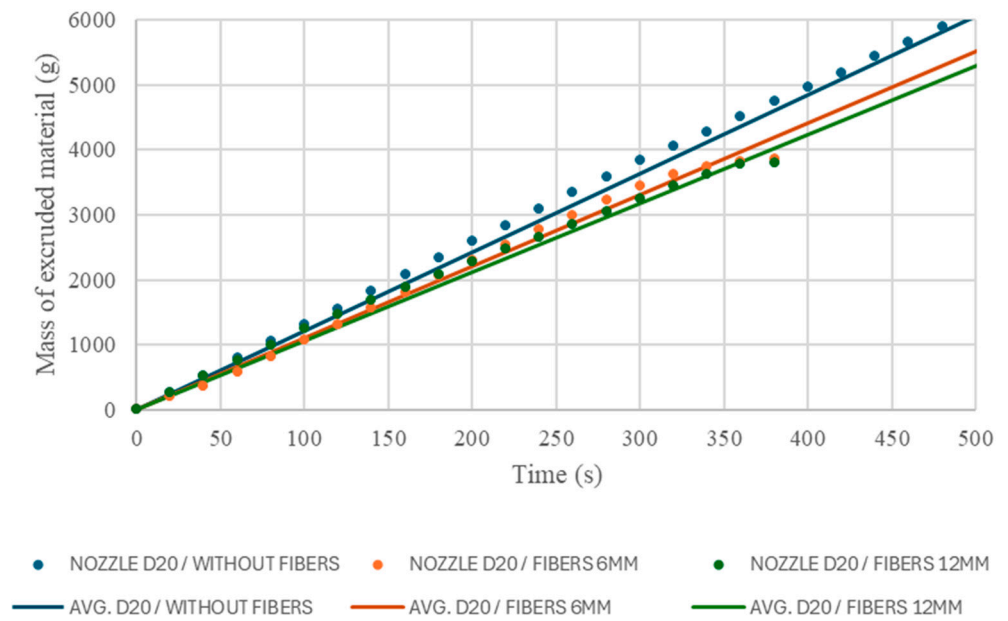


Figure 13. Graphic depictions of printhead efficiency depending on the reinforcement fibers used—nozzle diameter 20 mm.

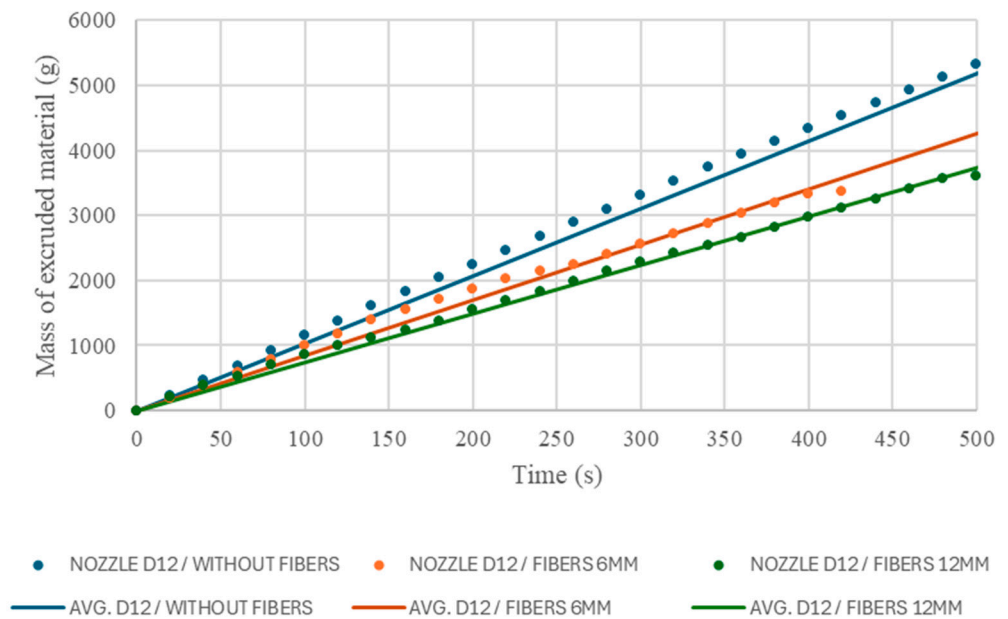


Figure 14. Graphic depictions of printhead efficiency depending on the reinforcement fibers used—nozzle diameter 12 mm.

Figure 16 confirms a significant reduction in extrusion resulting from both the use of a smaller nozzle and the incorporation of PP fibers. The graph also highlights considerable irregularities in extrusion, which in this case are more pronounced for tests conducted with the 12 mm nozzle, where greater fluctuations in printhead efficiency are observed.

An interesting aspect is the rate of feedstock utilization within the print head, as well as the minimum material quantity required to initiate printing. The rate of feedstock used represents the efficiency of material usage in relation to the initial material input (Figure 17). Observations reveal a relatively low utilization rate, averaging approximately 68% across all tests. Based on this information and the graphs showing printhead efficiency relative to the amount of material inside the reservoir, it can be concluded that approximately 4 kg of material in the reservoir is necessary for the proper operation of the printhead.

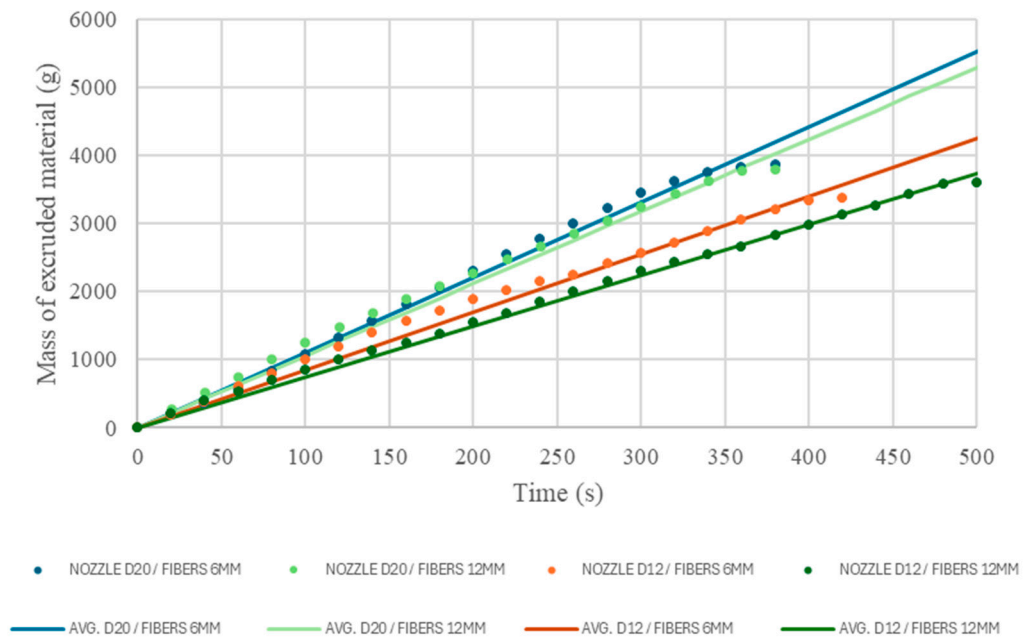


Figure 15. Graphic depictions of printhead efficiency depending on the reinforcement fibers used—comparison of 6 mm and 12 mm fibers and 12 mm and 20 mm nozzle sizes.

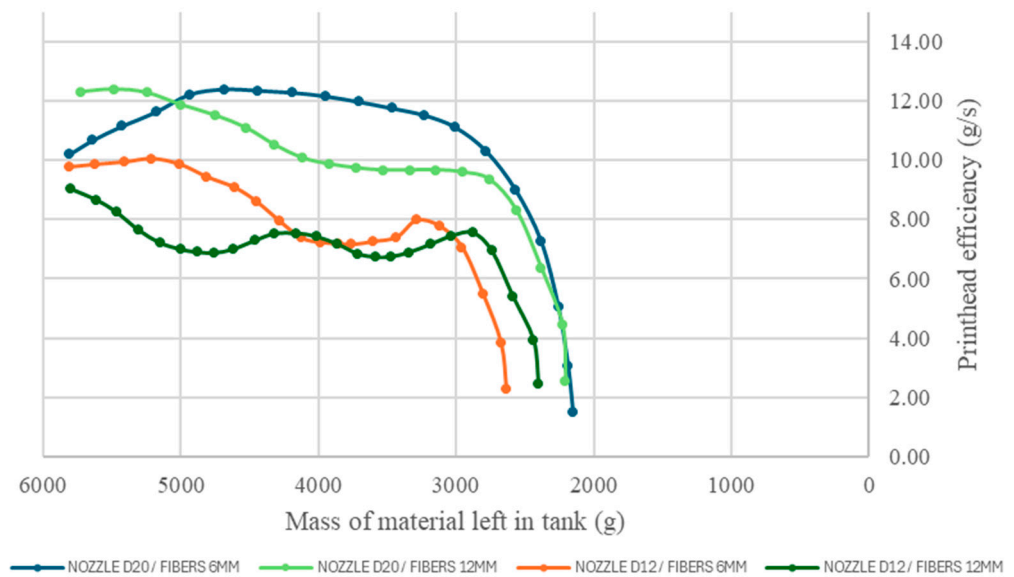
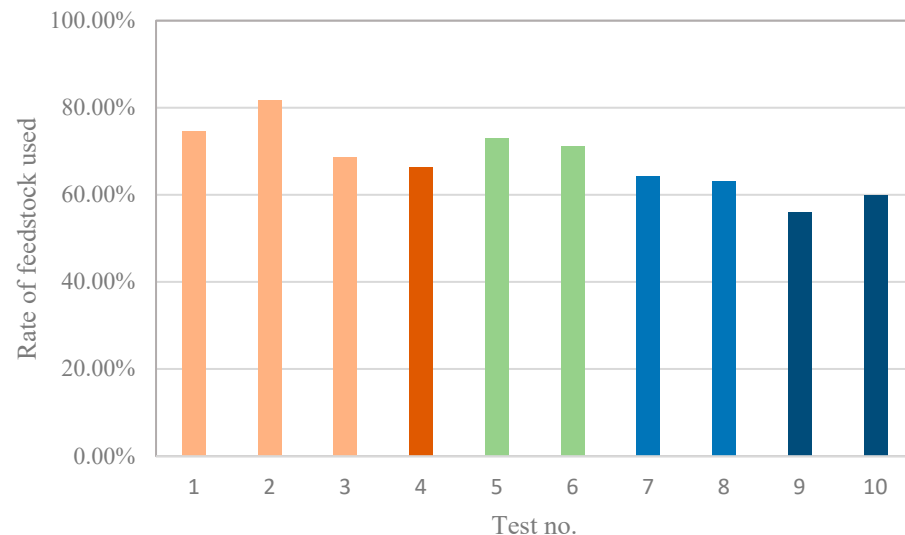


Figure 16. Graphic depictions of printhead efficiency as a function of mass of material left in tank depending on the reinforcement fibers used—comparison of 6 mm and 12 mm fibers and 12 mm and 20 mm nozzle sizes.

The highest feedstock utilization rates within the print head were observed in tests conducted with the base mix and a 20 mm nozzle. In the results from the first test on rotational speed, the lowest performance was recorded at the lowest speed. A similar trend was noted in the test with the smaller nozzle, where lower rotational speeds also resulted in reduced feedstock utilization rates. Across the entire set of results, it was evident that the lowest rates were associated with factors related to mixture consistency and the inclusion of PP fibers. In the case of fibers, their length did not have a definitive impact on the utilization rate. However, it should be noted that the extrusion of fiber-reinforced material was more efficient when using a larger nozzle diameter, which generates less resistance to the extruded material.

Table 3. The feedstock utilization depending on mixture composition and printing settings.

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nozzle size	D20	D20	D20	D20	D12	D12	D20	D20	D12	D12
Rotating speed (RPM)	37.3	32.8	30	37.3	37.3	30	37.3	37.3	37.3	37.3
Additions to mix	-	-	-	-	-	-	PP fiber 6 mm	PP fiber 12 mm	PP fiber 6 mm	PP fiber 12 mm
Fresh material flow (mm)	150	150	150	130	150	150	150	150	150	150
Mass of input material (g)	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	6000	6000	6000	6000
Mass of extruded material (g)	8948	9800	8249	7967	8751	8531	3852	3793	3364	3600
Rate of feedstock used	74.57%	81.67%	68.74%	66.39%	72.93%	71.09%	64.20%	63.22%	56.07%	60.00%

**Figure 17.** Graphic depictions of the rate of feedstock used; numbering according to Table 3.

4. Conclusions

This article examines issues related to 3D concrete printing technology, with a particular focus on the print head. As a crucial component of the entire system, the print head plays an essential role in maintaining stable and precise control of the cement mixture during the printing process. The conducted research allowed us to analyze the influence of factors such as nozzle size, extruder rotational speed, and fiber addition on the extruder's performance. Based on the tests performed, these results were found for the tested printer system:

- **Linear extrusion efficiency:** Extrusion efficiency during the tests was not stable and had more or fewer fluctuations but followed an approximately linear pattern as long as the material reservoir contained more than 4 kg. This minimum level is essential for proper material dispensing by the print head, likely due to the pressure exerted by the column of material within the reservoir;
- **Non-proportionality to rotational speed:** Extrusion performance does not increase proportionally with extruder rotational speed. Differences between theoretical (expected) extrusion efficiency and actual efficiency can reach up to 10.6%. This may be due to the fact that a higher rotational speed more effectively mixes the material inside the tank, ensuring the complete filling of the extruder screw, which translates to efficient extrusion;

- Lower sensitivity to material consistency: The print head demonstrated a relatively low sensitivity to changes in the mix consistency. For example, reducing the mixture's flow from 150 mm to 130 mm resulted in only a 4.5% decrease in extrusion efficiency. In the case of a less fluid consistency, a low feedstock utilization ratio was observed, which may result from the intensified deposition of material on the internal components of the print head;
- Significant impact of nozzle size: Reducing the nozzle size from 20 mm (D20) to 12 mm (D12) significantly affected extrusion efficiency, with flow rate reductions reaching around 15%. Given the frequency of nozzle changes, this finding underscores the necessity of incorporating correction factors to maintain consistent extrusion rates and repeatable properties in the printed element;
- Effect of polypropylene fibers on extrusion: The addition of polypropylene fibers to the cement mixture restricts extrusion efficiency. With a D20 nozzle, fiber incorporation decreased efficiency by 8.8 to 12.6% compared to fiber-free material. For the D12 nozzle, efficiency loss was more pronounced, ranging from 18 to 28%. This reduction is attributed to the increased viscosity of the fiber-enriched material, which limits its pumpability;
- Limitations in feedstock utilization: The print head's feedstock utilization is limited, with only approximately 68% of a 12 kg batch effectively used. This result suggests that around 4 kg of material is required to fill the print-head system adequately;
- Additionally, the results obtained in all tests confirm a significant dependence of extrusion efficiency on the amount of material inside the printhead's tank. A clear drop in extrusion performance was noted as the material quantity in the tank decreased. This could be due to the material generating a certain pressure at the bottom of the chamber, thereby improving the filling of the extruder screw and positively impacting extrusion levels. As the material quantity diminishes, the pressure decreases, limiting the extrusion process. To ensure stable extrusion at a consistent level, maintaining a steady amount of material in the chamber may be necessary.

The findings from this study are expected to enhance the repeatability of 3D-printed concrete elements. To enable the printing of components with varied materials and geometries, appropriate extrusion correction factors will need to be defined and implemented.

Author Contributions: Conceptualization, M.M., M.R., A.H. and M.H.; methodology, M.M. and A.H.; software, M.M., P.D. and A.H.; validation, M.M. and M.H.; formal analysis, M.M., M.R., A.H., P.D. and M.H.; investigation, M.M., A.H. and P.D.; resources, M.R., P.D. and M.H.; data curation, M.M. and M.H.; writing—original draft preparation, M.M., A.H., P.D. and M.H.; writing—review and editing, M.M. and M.H.; visualization, M.M.; supervision, M.H.; project administration, M.M., M.R. and M.H.; funding acquisition, M.R. and M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been supported by the Ministry of Education and Science within the program "Implementation Doctorate", DWD/5/0237/2021.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding authors.

Acknowledgments: We would like to thank Syed Muzammil Ali Shah for his help in the review to introduction of the article. We would like to acknowledge support by the Ministry of Science and Higher Education within the program "Implementation Doctorate".

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Szechyńska-Hebda, M.; Hebda, M.; Doğan-Sağlamtimur, N.; Lin, W.-T. Let's Print an Ecology in 3D (and 4D). *Materials* **2024**, *17*, 2194. [CrossRef]
2. Bazli, M.; Ashrafi, H.; Rajabipour, A.; Kutay, C. 3D Printing for Remote Housing: Benefits and Challenges. *Autom. Constr.* **2023**, *148*, 104772. [CrossRef]
3. Robayo-Salazar, R.; Mejía de Gutiérrez, R.; Villaquirán-Cacedo, M.A.; Delvasto Arjona, S. 3D Printing with Cementitious Materials: Challenges and Opportunities for the Construction Sector. *Autom. Constr.* **2023**, *146*, 104693. [CrossRef]
4. Wang, B.; Zhai, M.; Yao, X.; Wu, Q.; Yang, M.; Wang, X.; Huang, J.; Zhao, H. Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete Employing Multiple Industrial Wastes. *Buildings* **2022**, *12*, 374. [CrossRef]
5. Heidarneshad, F.; Zhang, Q. Shotcrete-Based 3D Concrete Printing: State of the Art, Challenges, and Opportunities. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *323*, 126545. [CrossRef]
6. Hau, S.; Xia, M.; Nematollahi, B.; Shi, C. Ambient Temperature Cured 'Just-Add-Water' Geopolymer for 3D Concrete Printing Applications. *Cem. Concr. Compos.* **2021**, *121*, 104060. [CrossRef]
7. Arunothayan, A.R.; Nematollahi, B.; Ranade, R.; Bong, S.H.; Sanjayan, J. Development of 3D-Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *257*, 119546. [CrossRef]
8. Markin, V.; Krause, M.; Otto, J.; Schröfl, C.; Mechtcherine, V. 3D-Printing with Foam Concrete: From Material Design and Testing to Application and Sustainability. *J. Build. Eng.* **2021**, *43*, 102870. [CrossRef]
9. Rudziewicz, M.; Maroszek, M.; Góra, M.; Dziura, P.; Mróz, K.; Hager, I.; Hebda, M. Feasibility Review of Aerated Materials Application in 3D Concrete Printing. *Materials* **2023**, *16*, 6032. [CrossRef]
10. Pasupathy, K.; Ramakrishnan, S.; Sanjayan, J. Enhancing the Properties of Foam Concrete 3D Printing Using Porous Aggregates. *Cem. Concr. Compos.* **2022**, *133*, 104687. [CrossRef]
11. Sun, J.; Xiao, J.; Li, Z.; Feng, X. Experimental Study on the Thermal Performance of a 3D Printed Concrete Prototype Building. *Energy Build.* **2021**, *241*, 110965. [CrossRef]
12. Marczyk, J.; Ziejewska, C.; Lach, M.; Korniejewski, K.; Lin, W.T.; Hebda, M. Possibilities of Using the 3D Printing Process in the Concrete and Geopolymers Application. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *706*, 012019. [CrossRef]
13. Bhattacharjee, S.; Basavaraj, A.S.; Rahul, A.V.; Santhanam, M.; Gettu, R.; Panda, B.; Schlangen, E.; Chen, Y.; Copuroglu, O.; Ma, G.; et al. Sustainable Materials for 3D Concrete Printing. *Cem. Concr. Compos.* **2021**, *122*, 104156. [CrossRef]
14. Perkins, I.; Skitmore, M. Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review. *Int. J. Constr. Manag.* **2015**, *15*, 1–9. [CrossRef]
15. Wu, Y.; Lu, B.; Bai, T.; Wang, H.; Du, F.; Zhang, Y.; Cai, L.; Jiang, C.; Wang, W. Geopolymer, Green Alkali Activated Cementitious Material: Synthesis, Applications and Challenges. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *224*, 930–949. [CrossRef]
16. Diks, T. *The Roadmap to Standards for 3D Concrete Printing: Research on the Interplay Between Technological and Legislative Developments*; University of Twente: Enschede, The Netherlands, 2019. Available online: <http://essay.utwente.nl/80733/> (accessed on 5 July 2019).
17. Adaloudis, M.; Roca, J.B. Sustainability Tradeoffs in the Adoption of 3D Concrete Printing in the Construction Industry. *J. Clean. Prod.* **2021**, *292*, 125257. [CrossRef]
18. Alanazi, N.; Kolawole, J.T.; Buswell, R.; Susmel, L. The Theory of Critical Distances to Assess the Effect of Cracks/Manufacturing Defects on the Static Strength of 3D-Printed Concrete. *Eng. Fract. Mech.* **2022**, *263*, 108233. [CrossRef]
19. Zhang, N.; Sanjayan, J. Extrusion Nozzle Design and Print Parameter Selections for 3D Concrete Printing. *Cem. Concr. Compos.* **2023**, *140*, 106493. [CrossRef]
20. He, L.; Tan, J.Z.M.; Chow, W.T.; Li, H.; Pan, J. Design of Novel Nozzles for Higher Interlayer Strength of 3D Printed Cement Paste. *Addit. Manuf.* **2021**, *48*. [CrossRef]
21. Muthukrishnan, S.; Ramakrishnan, S. Technologies for Improving Buildability in 3D Concrete Printing. *Cem. Concr. Res.* **2021**, *141*, 106312.
22. Muthukrishnan, S.; Ramakrishnan, S. Set on Demand Geopolymer Using Printhead Mixing for 3D Concrete Printing. *Cem. Concr. Compos.* **2022**, *139*, 104534. [CrossRef]
23. Chen, Z.; Lu, J.; Yu, S. Numerical Simulation of 3D Concrete Printing Derived from Printer Head and Printing Process. *J. Build. Eng.* **2024**, *73*, 106939. [CrossRef]
24. Dziura, P.; Maroszek, M.; Góra, M.; Rudziewicz, M.; Pławecka, K.; Hebda, M. Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation. *Materials* **2023**, *16*, 5772. [CrossRef]
25. Doğan-Sağlamtimur, N.; Bilgil, A.; Ertürk, S.; Bozkurt, V.; Süzgeç, E.; Akan, A.G.; Nas, P.; Çetin, H.; Szechyńska-Hebda, M.; Hebda, M. Eco-Geopolymers: Physico-Mechanical Features, Radiation Absorption Properties, and Mathematical Model. *Polymers* **2022**, *14*, 262. [CrossRef] [PubMed]
26. Zhang, Y.; Lu, P.; Fang, G.; Dong, B.; Hong, S. Enhancing Mechanical Properties of Concrete with 3D Printed Vascular Networks via Carbonation Strengthening. *Eng. Sci. Technol.* **2024**, *47*, 101846. [CrossRef]
27. Hager, I.; Maroszek, M.; Mróz, K.; Keşek, R.; Hebda, M.; Dvorkin, L.; Marchuk, V. Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials* **2022**, *15*, 4112. [CrossRef] [PubMed]
28. EN 13892-2:2004; Bending and Compression Strength. BSI: London, UK, 2002.

29. Korniejenko, K.; Figiela, B.; Ziejewska, C.; Marczyk, J.; Bazan, P.; Hebda, M.; Choińska, M.; Lin, W.-T. Fracture Behavior of Long Fiber Reinforced Geopolymer Composites at Different Operating Temperatures. *Materials* **2022**, *15*, 482. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Nguyen, N.T.; Bui, T.T.; Bui, Q.B. Fiber reinforced concrete for slabs without steel rebar reinforcement: Assessing the feasibility for 3D-printed individual houses. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *16*, e00950. [[CrossRef](#)]
31. Ungureanu, D.; Onuțu, C.; Tăranu, N.; Vornicu, N.; Zghibarcea, Ș.V.; Ghiga, D.A.; Spiridon, I.A. Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. *Buildings* **2023**, *13*, 2813. [[CrossRef](#)]
32. Rudziewicz, M.; Maroszek, M.; Setlak, K.; Góra, M.; Hebda, M. Optimization of Foams—Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Mixtures Dedicated for 3D Printing. *Materials* **2024**, *17*, 4106. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Hossain, M.T.; Shahid, M.A.; Mahmud, N.; Habib, A.; Rana, M.M.; Khan, S.A.; Hossain, M.D. Research and Application of Polypropylene: A Review. *Nanoscale Res. Lett.* **2024**, *19*, 2. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Chen, M.; Yang, L.; Zheng, Y.; Li, L.; Wang, S.; Huang, Y.; Zhao, P.; Lu, L.; Cheng, X. Rheological Behaviors and Structure Build-Up of 3D Printed Polypropylene and Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Calcium Sulphoaluminate Cement Composites. *J. Mater. Res. Technol.* **2021**, *10*, 180–192. [[CrossRef](#)]
35. Nasr, A.; Duan, Z.; Singh, A.; Yang, M.; Zou, S.; Abd El-Salam, M.A. Enhancing Mechanical Properties of 3D Printed Cementitious Composites Utilizing Hybrid Recycled PP and PET Fibers. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *356*, 139179. [[CrossRef](#)]
36. Hambach, M.; Volkmer, D. Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. *Cem. Concr. Compos.* **2017**, *79*, 62–70. [[CrossRef](#)]
37. Ding, T.; Xiao, J.; Zou, S.; Zhou, X. Anisotropic Behavior in Bending of 3D Printed Concrete Reinforced with Fibers. *Compos. Struct.* **2020**, *245*, 112808. [[CrossRef](#)]
38. Sun, X.; Zhou, J.; Wang, Q.; Shi, J.; Wang, H. PVA Fibre Reinforced High-Strength Cementitious Composite for 3D Printing: Mechanical Properties and Durability. *Addit. Manuf.* **2021**, *48*, 102500. [[CrossRef](#)]
39. EN 1015-3:1999; Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). CEN: Brussels, Belgium, 1999.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Kraków, 22.09.2025


OŚWIADCZENIE - PUBLIKACJA 1

Oświadczam, iż mój wkład w powstanie publikacji pt.: „*Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency*” opublikowanej w czasopiśmie *Materials* w 2024 roku, nr DOI 10.3390/app142411866 jest zgodny z informacją zawartą w poniższej tabeli.

Jednocześnie oświadczam, iż wyrażam zgodę na wykorzystanie wyżej wymienionej publikacji jako części rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka.

Imię i nazwisko współautora	Wkład w powstanie publikacji
Marcin Maroszek	Sformułowanie problemu badawczego oraz opracowanie koncepcji i planu badań. Zaprojektowanie programu testów obejmującego warianty mieszanki i ustawień procesu druku. Przygotowanie i wstępna kontrola jakości mieszanek. Przygotowanie stanowiska pomiarowego, w tym zaprojektowanie osprzętu w postaci części ekstrudera oraz dysz głowicy drukującej. Organizacja i realizacja serii testów ekstruzji na stanowisku 3DCP. Badanie konsystencji mieszanki cementowej metodą stolika rozplływowego. Opracowanie narzędzi do akwizycji i przetwarzania danych. Porządkowanie danych oraz przygotowanie opracowań graficznych wyników. Interpretacja wyników w kontekście wpływu właściwości materiału i geometrii układu podającego. Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu. Przygotowanie ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.
Magdalena Rudziewicz	Sformułowanie problemu badawczego. Doradztwo merytoryczne w zakresie doboru wariantów materiałowych i procedur pomiarowych. Zapewnienie zasobów, w tym materiałów. Współudział w interpretacji wyników. Analiza literaturowa. Krytyczny przegląd i redakcja manuskryptu. Pozyskanie finansowania.
Adam Hutyra	Dobór metodyki badań. Przygotowanie i rozwój oprogramowania sterującego. Planowanie i udział w badaniach. Obsługa stanowiska badawczego. Współprzygotowanie materiałów pomocniczych, w tym

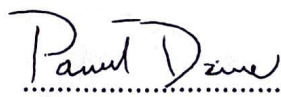
	opracowań graficznych wyników. Redakcja części doświadczalnej manuskryptu.
Paweł Dziura	Udział w opracowywaniu narzędzi programistycznych. Wsparcie w zakresie konfiguracji oraz utrzymania środowiska badawczego. Przygotowanie materiałów pomocniczych. Współdziałanie w redakcji fragmentów wersji wstępnej manuskryptu.
Marek Hebda	Sformułowanie problemu badawczego. Weryfikacja metodyki i nadzór merytoryczny nad przebiegiem prac badawczych. Zebranie wyników i ocena spójności formułowanych wniosków. Pozyskanie finansowania na realizację badań oraz opłatę kosztów publikacyjnych. Współautorstwo w pisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.




 podpis oświadczającego
 mgr inż. Marcin Maroszek



 podpis oświadczającego
 mgr inż. Magdalena Rudziewicz



 podpis oświadczającego
 mgr inż. Paweł Dziura








 podpis oświadczającego
 mgr inż. Adam Hutyra



 podpis oświadczającego
 dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK

Article

Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers

Marcin Maroszek ^{1,*} , Izabela Hager ² , Katarzyna Mróz ² , Mateusz Sitarz ²  and Marek Hebda ¹ 

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; marek.hebda@pk.edu.pl

² Chair of Building Materials Engineering, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; izabela.hager@pk.edu.pl (I.H.); katarzyna.mroz@pk.edu.pl (K.M.); mateusz.sitarz@pk.edu.pl (M.S.)

* Correspondence: marcin.maroszek@doktorant.pk.edu.pl

Abstract

Three-dimensional concrete printing (3DCP) is an emerging additive manufacturing technology with increasing application potential in the construction industry, offering advantages such as reduced labor requirements, shortened construction time, and material efficiency. However, structural integrity remains a challenge, particularly due to weak interlayer bonding resulting from the layered manufacturing process. This study investigates the mechanical performance and anisotropy of 3D-printed mineral-based composites with respect to the time interval between successive layers. Specimens were printed with varying interlayer intervals (0, 25, and 50 min) and tested in different loading directions. Flexural, compressive, and tensile strengths (direct and splitting methods) were measured both parallel and perpendicular to the layer orientation. Results showed a clear degradation in mechanical properties with increasing interlayer time, particularly in the direction perpendicular to the layers. Flexural strength decreased by over 25% and direct tensile strength by up to 40% with a 25 min interval. Compressive strength also declined, though less dramatically. Compared to cast specimens, printed elements showed 3–4 times lower compressive strength, highlighting the significant impact of interlayer cohesion. This study confirms that both the time between layers and the loading direction strongly influence mechanical behavior, underlining the anisotropic nature of 3DCP elements and the need for process optimization to ensure structural reliability.

Keywords: additive manufacturing; anisotropy of mechanical properties; building materials; 3D printing; interlayer bond strength; print parameters



Academic Editor: Quanquan Han

Received: 1 July 2025

Revised: 12 August 2025

Accepted: 13 August 2025

Published: 15 August 2025

Citation: Maroszek, M.; Hager, I.; Mróz, K.; Sitarz, M.; Hebda, M. Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers. *Materials* **2025**, *18*, 3845. <https://doi.org/10.3390/ma18163845>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Three-dimensional concrete printing (3DCP) is an example of additive manufacturing (AM) technology, based on the layer-by-layer deposition of material to form three-dimensional elements. Its potential for production automation is increasingly applied across various technical sectors, including construction, where it is used for manufacturing prefabricated elements as well as building components directly on-site [1–4]. The rapid growth of the global construction industry brings new challenges that drive the development of 3D printing technologies. The application of this technology contributes to shorter construction times and reduces the need for manual labor [5]. It also enables the realization of structures that would be impossible or economically unfeasible to execute using conventional construction methods [6]. Equally important is the opportunity for sustainable

construction through the implementation of resource-efficient technologies that still ensure high material and structural quality. Three-dimensional printing supports this goal by facilitating the practical use of composite cements and geopolymer materials, which help reduce reliance on energy-intensive Portland cement [7–9]. Moreover, 3D printers allow for the use of extrusion-based forming techniques for the faster and automated construction of objects, including those with complex geometries, while minimizing material usage and labor demands [10–12].

The use of this method for producing building elements presents numerous challenges. A fundamental issue is the selection of a material with appropriate rheological properties in the fresh state and adequate mechanical performance after setting. To achieve this, the use of suitable admixtures for setting time control and plasticization is essential [13–15]. Mixture design is based on an experimental approach, taking into account parameters such as workability, pumpability, open time, and extrudability. Proper flowability is critical for the extrusion process while maintaining the geometric stability of successive layers. Excessive fluidity may lead to the buckling or collapse of the structure, whereas an overly stiff mixture reduces interlayer adhesion. Rheology is therefore one of the key factors determining the success of the printing process [1,16–18].

Process parameters are equally important, as they directly affect extrusion stability and, consequently, print quality [19]. In order for 3DCP technology to be applied in the production of structural elements, standardization is required [20,21]. Components produced through 3D printing must demonstrate high repeatability, quality, and the absence of defects that could compromise structural integrity [22]. Another critical issue is the bond between consecutively deposited layers, which often represents the weakest point in the printed element [23].

Several factors influence the interlayer bond strength in 3D-printed structures made from mineral-based materials. One such factor is the cross-sectional shape of the printed path. To achieve optimal interlayer bonding, it is recommended to aim for a rectangular cross-section, as it provides the largest contact surface for transferring forces between layers (Figure 1). Another factor affecting layer cohesion is the nozzle offset distance. As this distance increases, the interlayer bond strength decreases, and more voids tend to form between layers, further weakening the connection [24–26].

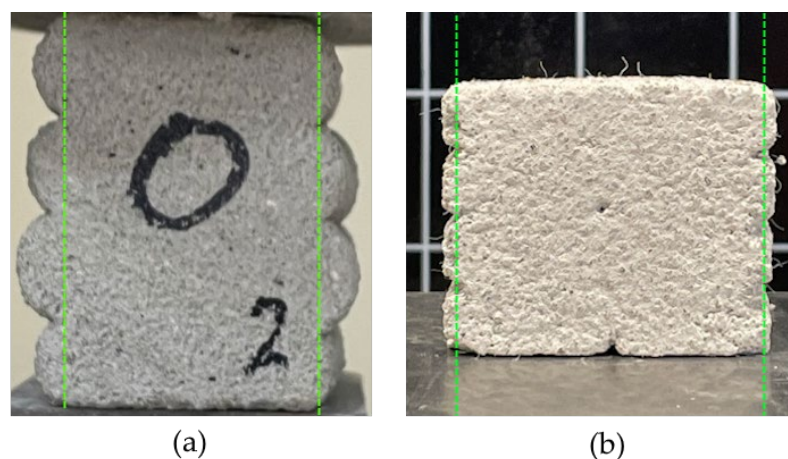


Figure 1. The geometry of printouts and the interlayer bond: (a) with round edge; (b) rectangular cross-section. Green lines indicate the extent of the interlayer bond in the presented 3D printed specimens.

The time interval between the deposition of successive layers also plays a critical role. A longer delay, particularly when using fast-setting mixtures, may result in the formation of numerous voids, significantly reducing the structural integrity of the print. These voids

are more prevalent in structures where the time gap between layers is extended. This is primarily due to surface moisture loss (cold joint), which occurs as the interval increases, leading to a reduction in bond strength (Figure 2) [23,27–30]. The interlayer time interval is determined by both the geometry of the printed object and the printing speed. For small prefabricated elements, the interval may be limited to a few minutes. However, when printing larger building components with significant surface areas, the time between layers can extend to approximately one hour. In such cases, it may be necessary to divide the geometry of the printed element to avoid excessive delays between layer deposition, which could compromise the structural integrity of the printed object.

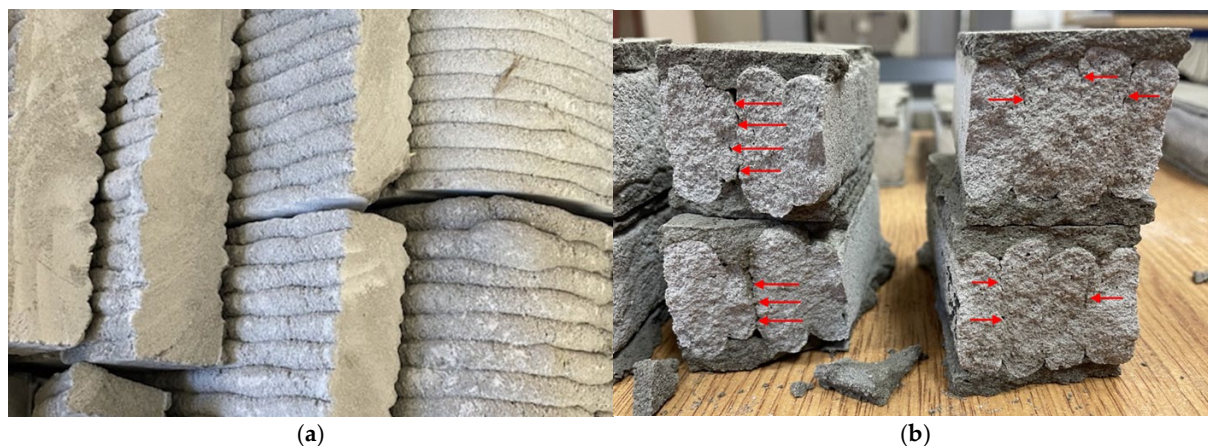


Figure 2. (a) Structure of 3D-printed concrete elements; (b) defects in the interlayer bond. Red arrows highlight discontinuities at the interlayer interfaces.

Research teams working in this area have applied various time intervals in their experimental studies. Pan et al. introduced layer deposition intervals of 20 s, 15, 30, 45, and 60 min, with results clearly indicating a reduction in interlayer bond strength as measured by direct tensile testing [31]. Similar outcomes were reported by Chen et al. and Tay et al., who applied time intervals of 20 s, 1, and 10 min, and 1, 5, 10, and 20 min, respectively [28,32].

Hardened 3D-printed material exhibits anisotropic behavior, meaning that its properties vary depending on the direction of observation. In the case of 3D-printed structures produced using additive manufacturing technologies, anisotropy results from the layer-by-layer nature of the printing process.

Anisotropy is considered one of the main drawbacks of structures fabricated via 3D printing, which necessitates thorough investigation of their mechanical properties [25,27,30]. Researchers adopt various approaches to material testing. The most commonly conducted strength tests on 3D-printed specimens include tensile testing, although compressive strength and three-point bending tests are also widely performed [28,29,31,33,34].

Three-dimensional concrete printing technology is a rapidly evolving field entering the construction sector. The diversity of printing techniques and process parameters offers vast potential, particularly in the individualized fabrication of structural elements, yet it also presents numerous challenges in terms of standardization and market implementation. Despite the numerous studies cited earlier, there is still no standardized method or clear guidelines for assessing the quality of 3D-printed elements, highlighting the need for a reliable testing procedure to evaluate the adhesion quality between layers in printed materials. This is likely due to the relatively short time that 3D printing has been in use, especially within the construction industry. However, the standardization of quality verification methods is essential for the full-scale adoption of 3D printing in construction.

The aim of this study was to compare various mechanical testing methods for elements printed in different orientations, with a focus on evaluating interlayer bond quality under conditions simulating large-scale printing. The conducted review of testing procedures revealed several viable approaches.

2. Materials and Methods

One of the key challenges in 3D printing technology is ensuring sufficient interlayer bond strength, which significantly determines the mechanical performance of the final structures. Due to the characteristic layer-by-layer deposition of material, mechanical properties exhibit pronounced anisotropy—they are highly dependent on the orientation relative to the build axis. Particularly critical are the interfaces between layers, where so-called cold joints often form, serving as potential points of damage initiation.

As a result, the measurement of interlayer adhesion strength and in-depth analysis of the mechanisms governing the formation and degradation of these bonds represent a major research direction in the study of anisotropy in printed structures. A review of the literature confirms that process parameters, such as the time gap between layer depositions, nozzle speed, and nozzle height, have a significant impact on the strength of interlayer bonds in 3D-printed elements [35–37]. The standardization of testing methods and the development of predictive models relating process parameters to bond quality are essential for further industrialization of the technology. Understanding these phenomena is crucial not only for improving structural integrity but also for minimizing the directional variability of mechanical properties [38,39].

As a reference for introducing time intervals between the layers of printed specimens, an estimation was made based on the 3D printing process of a building with a usable floor area of approximately 80 m² (Figure 3). Based on the parameters of the available printing equipment, the maximum printing speeds for 20 mm and 40 mm nozzles were determined to be 100 mm/s and 50 mm/s, respectively.

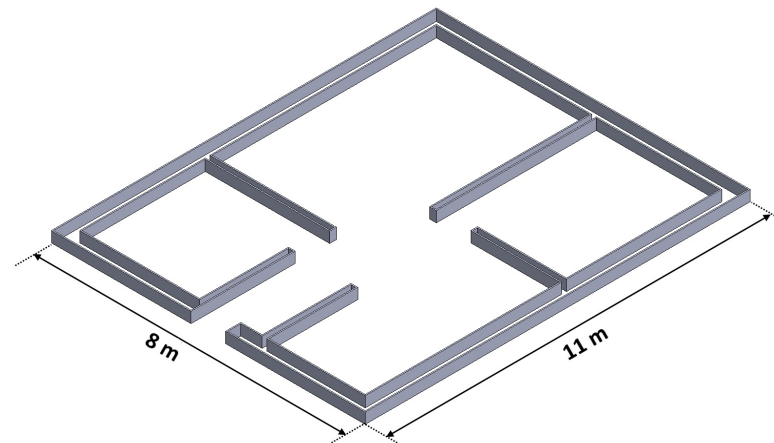


Figure 3. Schematic outline of building walls for estimating the time interval between layers.

Assuming the use of a 40 mm nozzle for printing a single perimeter contour of the walls with standard infill providing structural stability, the path length for one layer is approximately 150 m. With a printing speed of 50 mm/s, the estimated time to complete a single layer is about 50 min, which defines the maximum allowable time interval between successive layers of deposited material. The reference sample was printed without any time gap between layers, while an intermediate variant was printed with a 25 min interval between successive layers.

2.1. Methods

Due to the absence of standardized testing methods specifically dedicated to 3D-printed concrete specimens for determining mechanical properties and interlayer bond quality, experimental procedures are typically based on standards developed for cast concrete. The methods proposed by researchers for evaluating the strength parameters of printed structures include compressive strength, direct tensile strength, splitting tensile strength, and three-point bending.

As part of the experimental program, a series of tests were performed on specimens produced using 3D printing technology (Figure 4).

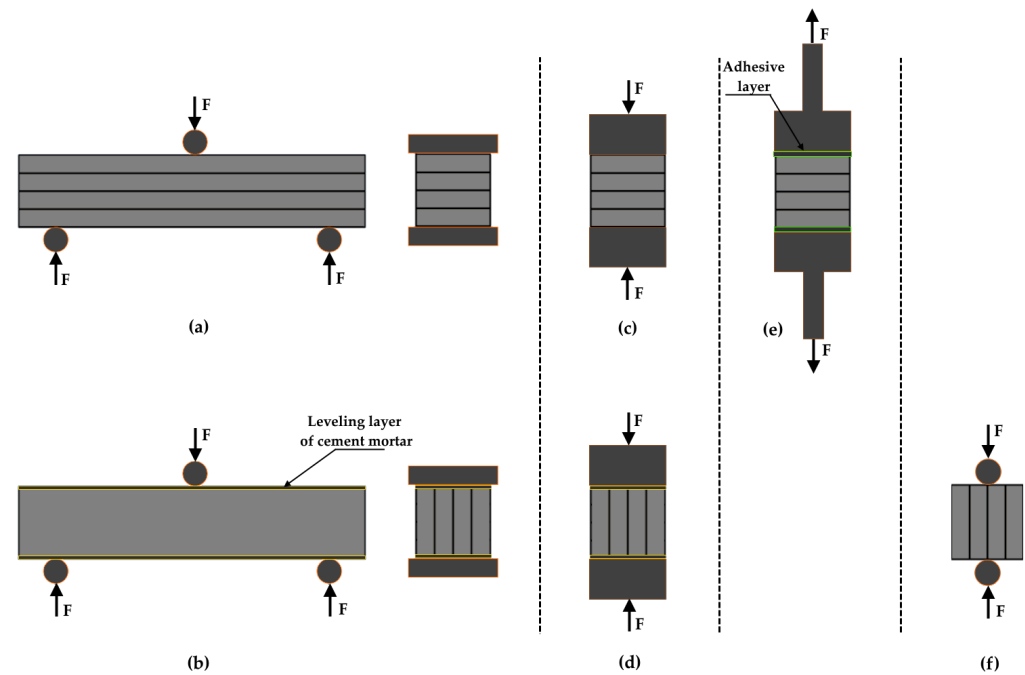


Figure 4. Schemes of strength test for 3D prints: (a) three-point bending test, perpendicular to the layer–interface plane; (b) three-point bending test, parallel to the layer–interface plane; (c) compressive strength test, perpendicular to the layer–interface plane; (d) compressive strength test, parallel to the layer–interface plane; (e) direct tensile test; (f) splitting tensile strength test. F indicates the direction and sense of the forces acting on the specimens during the respective strength tests.

The scope of the investigation included the determination of the following:

2.1.1. Flexural Strength

- Perpendicular to the layer orientation:

A three-point bending test was conducted on the specimens to determine their flexural strength. The procedure was carried out using a testing machine equipped with appropriate tooling. The load was applied at a constant rate of 50 N/s until the specimen failed.

The following formula was used to calculate the flexural strength:

$$\sigma_{max, B} = \frac{M_{g,max}}{W_g}, \quad (1)$$

$$M_{g,max} = \frac{F_{max} \cdot a}{4}, \quad (2)$$

$$W_g = \frac{bh^2}{6}, \quad (3)$$

where

$\sigma_{max,B}$ —maximum bending stress, (MPa);
 $M_{g,max}$ —maximum bending moment, (Nm);
 W_g —section modulus for bending, (m³);
 F_{max} —maximum failure load, (kN);
 a —span between supports, (m);
 b —width of the cross-section, (m);
 h —height of the cross-section, (m).

- Parallel to the layer orientation:

The second variant of the flexural strength test involved measuring this parameter with the printed layers oriented parallel to the direction of the applied force. To ensure a flat and even surface, the lateral irregularities of the specimens—caused by the layer deposition process—were filled with leveling mortar. The mortar was applied one day before testing. This approach allowed the test to be conducted properly without increasing the strength of the specimens, as the mortar had not yet developed its full mechanical properties. To determine the flexural strength, the same Equations (1)–(3) were used as in the test of specimens oriented perpendicular to the layers.

2.1.2. Compressive Strength

- Perpendicular to the layer orientation:

During the compressive strength tests, the load was applied to the specimen at a rate of 500 N/s until failure occurred. The head of the testing machine includes a swivel joint, allowing it to compensate for any minor misalignments or non-parallel surfaces.

The following Equation (4) was used to calculate the compressive strength; for the surface area, the minimum cross-section was determined for the narrowest cross-section:

$$\sigma_{max,C} = \frac{F_{max}}{S} \quad (4)$$

where

$\sigma_{max,C}$ —maximum stress in compression, compressive strength, (MPa);
 F_{max} —load at failure, (N);
 S —minimum cross-section determined for the narrowest cross-section, (mm²).

- Parallel to the layer orientation:

The second variant of the compressive strength test involved measuring specimens with the printed layers oriented parallel to the direction of the applied force. As in the flexural strength specimens, mortar was used to level the lateral surfaces of the samples. To determine the compressive strength, the same Equation (4) was used as in the test of specimens oriented perpendicular to the layers.

2.1.3. Direct Tensile Strength

The tensile strength test was conducted on 3D-printed specimens. To determine the tensile strength, the direct tensile method was applied, in which the applied force acts perpendicular to the printed layers. Steel end caps with a diameter of 5 cm were bonded to the ground surfaces of the specimens using a two-component adhesive (POXIPOL). The diagram of the test with bonded surfaces is shown in Figure 4e.

The load was applied at a rate of 100 N/s until failure occurred. Hinged joints in the upper and lower grips ensured uniform load distribution and minimized undesired stress concentrations. This testing methodology allows for determining the maximum tensile stresses the material can withstand under a static direct tensile load. At the same time, it provides insight into the adhesion between printed layers under direct tensile conditions.

The following Equation (5) was used to calculate the direct tensile strength; for the surface area, the minimum cross-section was determined for the narrowest cross-section:

$$\sigma_{max,D} = \frac{F_{max}}{S} \quad (5)$$

where

$\sigma_{max,D}$ —maximum stress in compression, compressive strength, (MPa);

F_{max} —load at failure, (N);

S —minimum cross-section determined for the narrowest cross-section, (mm²).

2.1.4. Splitting Tensile Strength

The splitting tensile strength test was conducted on 3D-printed specimens. After appropriate preparation, the specimens were placed in the testing machine and loaded using cylindrical bearing strips (Figure 4f). The load was applied at a rate of 50 N/s until failure occurred.

This method was adopted from the concrete splitting tensile strength test for prisms (Brazilian method) [40]. The following formula was used to calculate the splitting strength:

$$\sigma_{max,S} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (6)$$

where

$\sigma_{max,S}$ —maximum stress in splitting, splitting tensile strength, (MPa);

F_{max} —maximum load, (N);

d —sample width, (mm);

L —sample length, (mm).

To establish a reference level for flexural and compressive strength (tests conducted according to the procedure illustrated in Figure 4), measurements were conducted on cast specimens made from the same material used in the 3D printing process, from which the printed samples were also produced. To determine the flexural strength values, Equations (1)–(3) were used, while Equation (4) was applied for compressive strength.

In addition to strength testing, the material used was subjected to shrinkage verification during the setting and early curing stages. For this purpose, specimens with dimensions of 40 mm × 40 mm × 1000 mm were printed. The measurements were carried out using a device (Figure 5) equipped with two laser sensors that recorded the change in distance (S), thereby indicating the change in the specimen's length.

To verify the influence of the time interval between successive printed layers on the anisotropy of mechanical properties and the quality of interlayer bonding, a Portland cement-based material was used. This material was selected for its suitable pumpability, buildability, and open time, tailored to the available printing system. In addition to material characteristics, other influencing factors include the design of individual system components—such as the mixing station, which was developed within the framework of an “Implementation Doctorate” and tested under industrial conditions in partner companies—as well as processing parameters.

Material specimens for testing were produced using both 3D concrete printing (3DCP) and conventional casting methods (in accordance with EN 196-1 [41]), allowing for the assessment of the printing process's impact on the final properties of the elements. All specimens were prepared in a laboratory environment equipped for testing 3D printing technologies.

Planetary mortar mixer with a capacity of 20 L was used to prepare the test material, and the detailed mixing procedure is illustrated in Figure 6. Initially, dry and liquid components were mixed separately in individual containers for 3 min and 30 s, respectively. The dry components were then added to the liquid mixture and mixed for an additional 5 min until a homogeneous material was obtained. The prepared mixture was simultaneously poured into molds and placed into the print head.

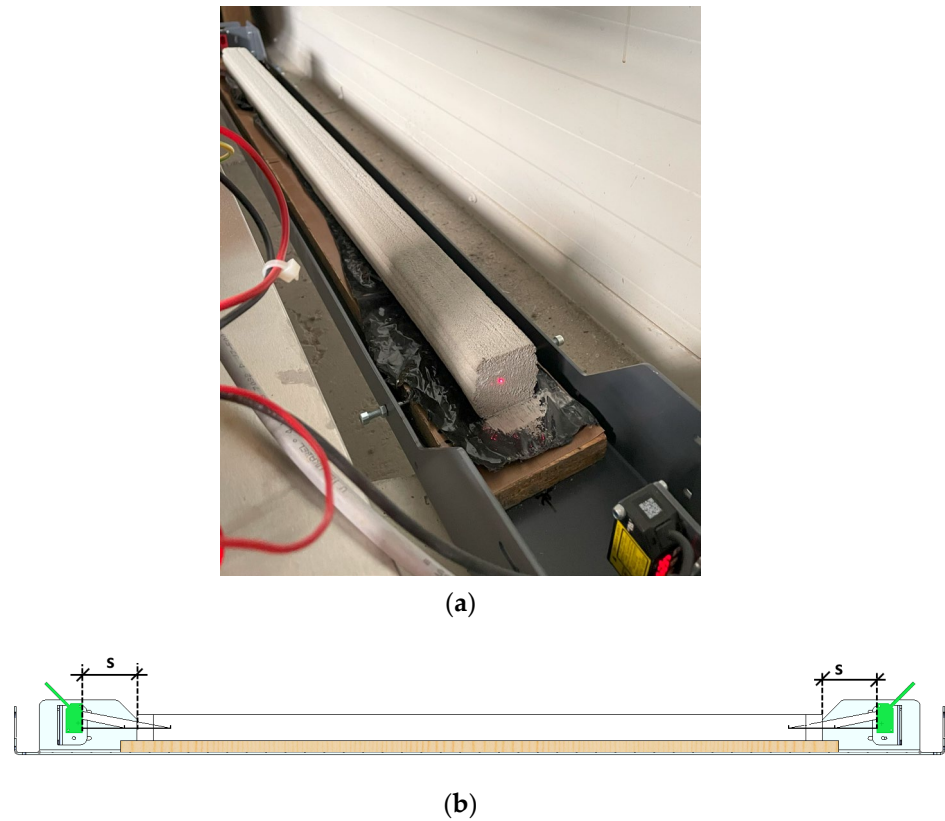


Figure 5. Shrinkage test of 3D-printed materials: (a) testing stand for a shrinkage test; (b) the test scheme.

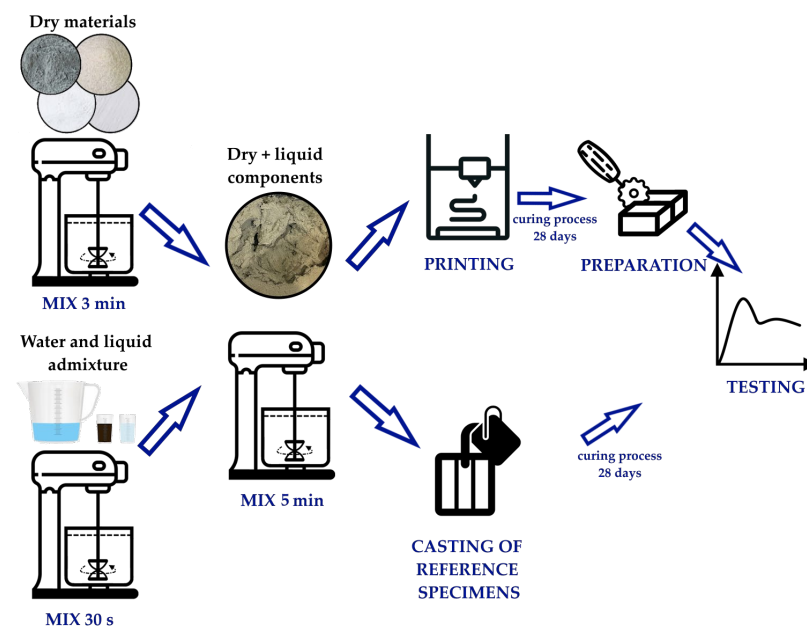


Figure 6. Schematic of the specimen preparation procedure for mechanical testing.

After 24 h, the cast specimens were demolded, and the printed samples were transferred from the printing platform to a curing chamber. Following a 28-day curing period under controlled conditions of 22 ± 2 °C, the printed specimens were trimmed to the required dimensions. Subsequently, all samples were subjected to mechanical strength testing.

2.2. Materials

The specimens for testing interlayer cohesion were produced using a Portland cement-based material, which served as the base composition derived from prior 3D printing trials.

The sample was prepared using a base mix, the composition of which is presented in Table 1. The formulation should ensure not only the achievement of the required design strength but also appropriate rheological and processing properties, which are critical in 3D printing technology. In its fresh state, the mixture must exhibit the ability for stable and continuous extrusion through the print head, without the clogging or segregation of components, while also maintaining the intended geometry after layer deposition. At the same time, the material should possess sufficient structural integrity to allow for the stacking of successive layers without deformation or collapse. Strong interlayer adhesion is also of key importance, as it is essential to ensure structural uniformity and proper load transfer within the printed element.

Table 1. The mixture composition of reference mix used for 3D printing tests [19].

Component	Content (%)
Portland cement CEM I 52,5R	25.0
Quartz sand (0.1–1.0 mm)	65.0
Activating additives	2.0
Rheological additives	1.0
Mix fillers	7.0

To meet these requirements, the mix was modified by incorporating a range of additives and admixtures. The composition included agents that accelerate early concrete setting (accelerators), aimed at shortening the time required to reach initial strength and increasing the stabilization speed of successive layers. Rheological additives, such as plasticizers, were also used to improve the workability of the mix while maintaining appropriate viscosity and structural stability. Mineral fillers, including ground limestone and microsilica, were introduced to modify the cement matrix structure, both by enhancing cohesion and increasing the specific surface area, which contributes to improved control over the setting and hardening processes.

2.3. Mixture Preparation and Consistency Verification

A laboratory 3D printer and a precision laboratory scale (accuracy of 0.1 g and maximum capacity of 20 kg) were used to prepare the test mixtures. The dry components were first weighed and thoroughly mixed. Water was then added using a 1:5 *w/w* (weight-to-weight) ratio, and the mixing was performed with a laboratory planetary mixer under constant conditions: 5 min of mixing at 150 RPM. The resulting mixtures were subjected to consistency testing prior to printing.

To evaluate the consistency of the fresh material intended for printing, a flow table test was conducted in accordance with EN 1015-3 [42]. The device was operated manually (Figure 7). The standard cone was filled with the test material following a two-stage compaction procedure. The test commenced upon removal of the cone and consisted of lifting the flow table 15 times using a handwheel.

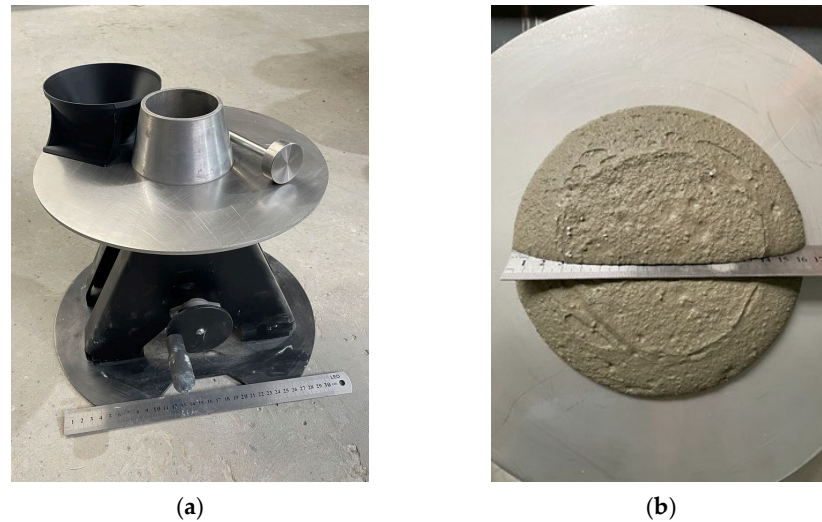


Figure 7. (a) View of the flow table test device according to the PN EN 1015-3 standard; (b) material sample at consistency test.

Proper consistency is essential not only for maintaining continuous material flow during printing but also for preserving the intended shape of the printed element [9,19,43]. The 3D printing device used in this study is equipped with a screw-based extruder capable of processing materials with a consistency range of 120–200 mm, as defined by EN 1015-3. This range ensures proper extrusion performance and shape retention of the printed object.

In all tests conducted within the framework of this study, fixed proportions of dry components to water were used, resulting in a flow diameter of 165 mm. This is a desirable value, ensuring stable extrusion and sufficient structural integrity of the material after printing. Any change in the consistency of the mix directly affects the extrusion efficiency and may influence the geometry and quality of the printed components [19]. The rheological properties of the tested mix are illustrated in Figure 8, which presents the change in flow diameter over time from the moment of mixing. A comparison was made between mixtures left at rest and those subjected to continuous mixing.

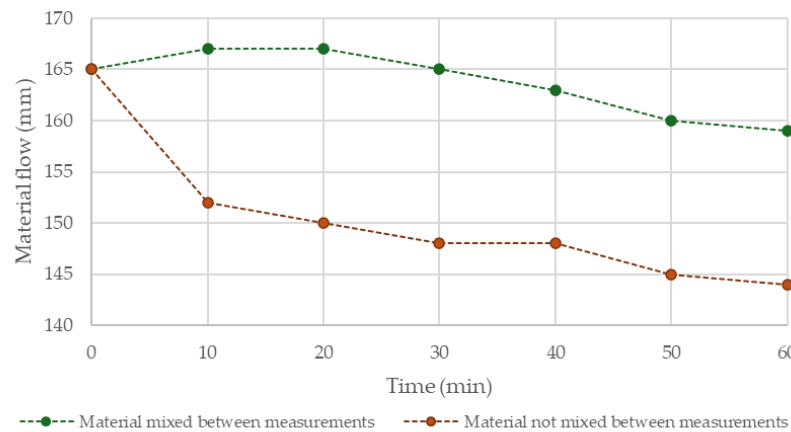


Figure 8. Variation in material flow over time depending on continuous mixing.

The material, when continuously mixed, maintains a stable consistency over an extended period, limiting the risk of reduced extrusion efficiency, nozzle blockage, and thus deformation or deterioration of the print quality. The initial increase in flow diameter may be attributed to the thorough distribution of components during the first minute of mixing. The subsequent mild decline in flow indicates a gradual onset of setting processes, yet without a sudden loss of workability. In contrast, the material not subjected to re-mixing

(e.g., after extrusion) shows a significant drop in flow diameter within the first minute after mixing is stopped. This loss of workability hinders proper material shaping and may lead to discontinuities, lack of interlayer adhesion, or heterogeneity in the interfacial zones. On the other hand, this behavior is also considered desirable, as it positively contributes to the stability of printed elements and their capacity to bear the load of subsequent layers.

2.4. Printing

Printed specimens were produced using a laboratory testing setup consisting of a 3D printer with a build volume of 1200 mm × 550 mm × 400 mm. The printer is equipped with a print head that includes a 20 L hopper with an integrated mixer and a screw-based extruder (Figure 9).

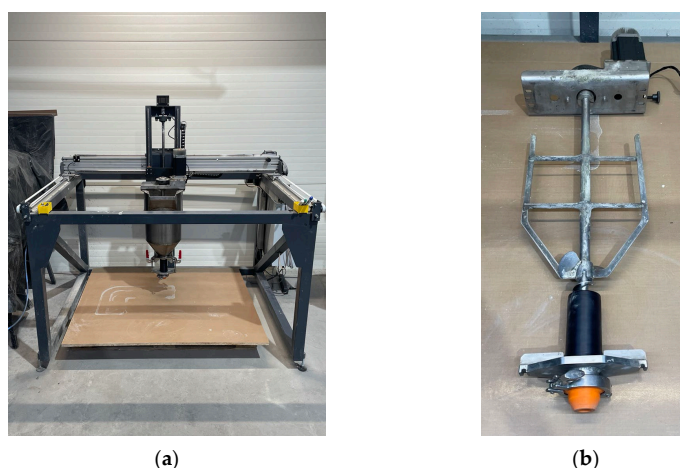


Figure 9. Laboratory setup for 3D concrete printing: (a) printer with printhead; (b) interior of the printhead with mixer and extruder.

To investigate the influence of the time interval on the quality of interlayer bonding in printed elements, specimens were prepared in the following three variants (Figure 10):

- Variant 0—no significant time gap between the deposition of successive layers;
- Variant 25—25 min interval between successive layers;
- Variant 50—50 min interval between successive layers.

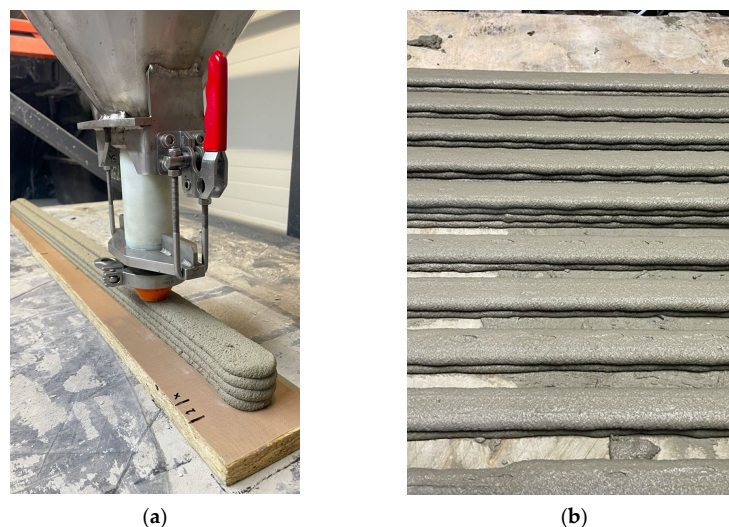


Figure 10. Sample printing: (a) printed specimen on a base for material shrinkage testing; (b) printed specimens for strength testing.

2.5. Preparation

After printing, the specimens were subjected to a curing process. In accordance with standards for cement-based materials, the curing period was set at 28 days, after which the specimens reached their final strength.

Material preparation also included trimming the elements to the required dimensions in a consistent manner for each specimen. A table saw was used for this purpose.

The final step in specimen preparation involved ensuring a smooth and flat surface on which the load would act during testing. A grinding stone was used for this purpose, providing a simple and effective means of achieving the required surface quality. For specimens tested parallel to the layer orientation, a thin leveling layer of cement mortar was applied in a 1:4 w/c (water-to-cement) ratio (Figure 11). This leveling layer was applied one day prior to testing to ensure that the added material would not affect the measurement results of the base material.



Figure 11. Printed specimens prepared for testing.

The tests were carried out on specimens cut from a larger printed element and trimmed to dimensions of approximately 40 mm × 40 mm × 40 mm. For the flexural strength tests, specimens measuring 40 mm × 40 mm × 160 mm were prepared. The cutting was performed in such a way that each specimen included four layers of the printed material. Surface grinding was applied to ensure flatness and uniform load distribution across the entire surface of the specimen. Each mechanical test was conducted on a set of six specimens.

2.6. Reference Samples

As a control test, measurements were performed on specimens produced using the casting method. Three-part molds were used to fabricate the samples, allowing for the preparation of three specimens with dimensions of 40 mm × 40 mm × 160 mm (Figure 12).

As part of the control testing on cast specimens, the same material was used, and identical proportions of dry components to water were applied as in the 3D printing process. The material was cast into three-part molds intended for the preparation of test specimens in accordance with EN 196-1 standards.

After casting, the specimens were covered and subjected to a curing process for a period of 28 days. Following curing, the material was tested for flexural strength, followed by compressive strength testing.

The printed elements were evaluated in terms of density using the hydrostatic weighing method. This technique enables the determination of the density of objects with complex geometry through simple measurement tools, based on Archimedes' principle.

The average density of cast specimens was 1969 kg/m³. For the specimens produced using 3D printing technology, an average density of 1919 kg/m³ was obtained, which is

approximately 2.5% lower than that of the reference cast samples. No significant differences in density were observed between the individual variants of the printed specimens.

The lower density of the printed samples may be attributed to the presence of micropores and interlayer gaps resulting from the layer-by-layer deposition of material without additional mechanical compaction. This finding is consistent with trends reported in the literature, indicating that additively manufactured components tend to exhibit slightly higher porosity compared to their conventionally cast counterparts.

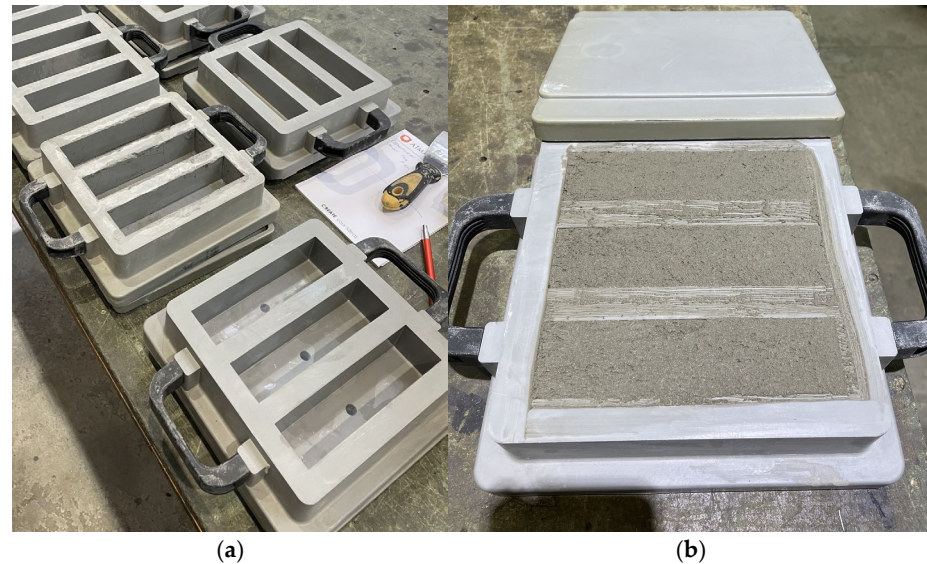


Figure 12. Preparation of specimens using the casting method: (a) three-part molds compliant with EN 196-1 standards; (b) mold filled with material.

2.7. Testing

The tests were carried out using a ZwickRoell 50 kN testing machine (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Germany), which enables the performance of compression, tension, shear, and splitting tests.

The testing machine was equipped with the necessary tools designed for conducting the respective tests and operated using testXpert III software (version 1.2).

3. Results and Discussion

3.1. Bending Test

The flexural strength test was conducted using cylindrical supports along with a testing apparatus capable of adjusting to the inclination angle of the specimen surfaces (Figure 13). The printed specimens tested perpendicular to the layer orientation, as well as the cast specimens, consistently fractured at the point of load application, precisely between the two supports (Figure 13a,c). In contrast, for the printed specimens tested parallel to the layers, the fracture frequently occurred slightly offset from the point of force application (Figure 13b).

Analyzing the results of the three-point bending tests on specimens loaded perpendicular to the printed layers (Figure 14 and Supplementary Materials Tables S1–S3), it can be observed that increasing the time interval between layers from 0 to 50 min leads to a noticeable decrease in flexural strength. The average stress values drop from approximately 4.8 MPa to around 3.5 MPa. The extended time gap between layer depositions weakens the interlayer bond, thereby reducing structural integrity. As the layers do not fully integrate, the vertical cohesion of the structure is compromised.

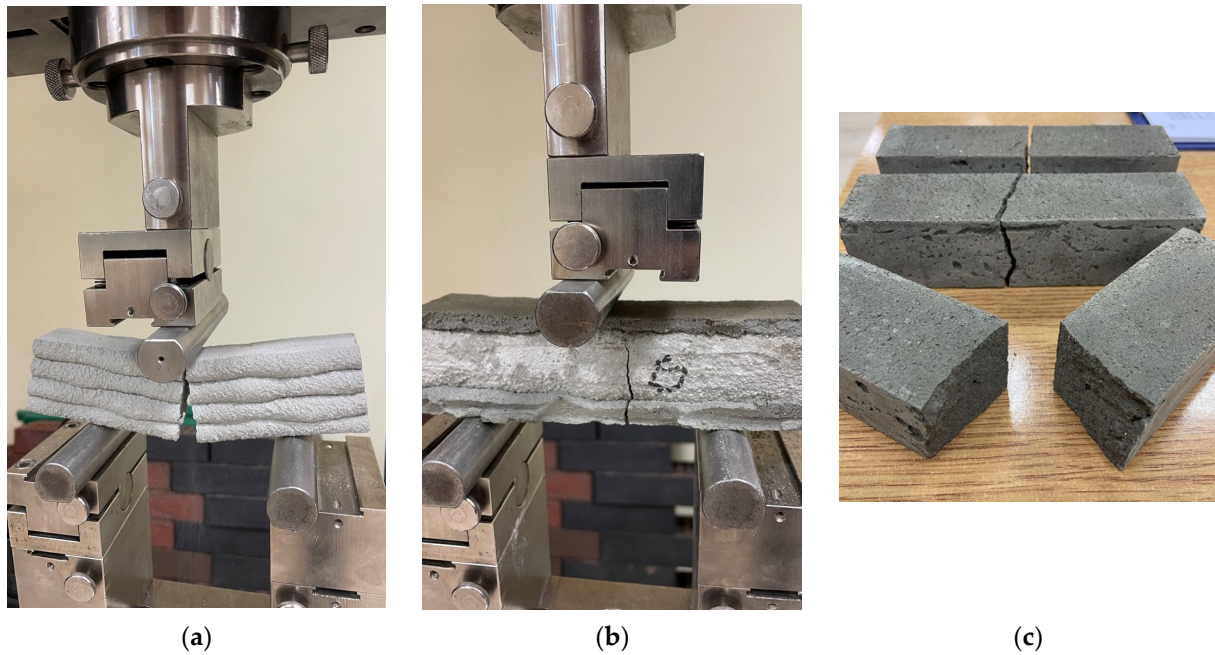


Figure 13. The failure mode of 3D-printed materials after the bending test: (a) perpendicular to the layer; (b) parallel to the layer; (c) mold cast specimens.

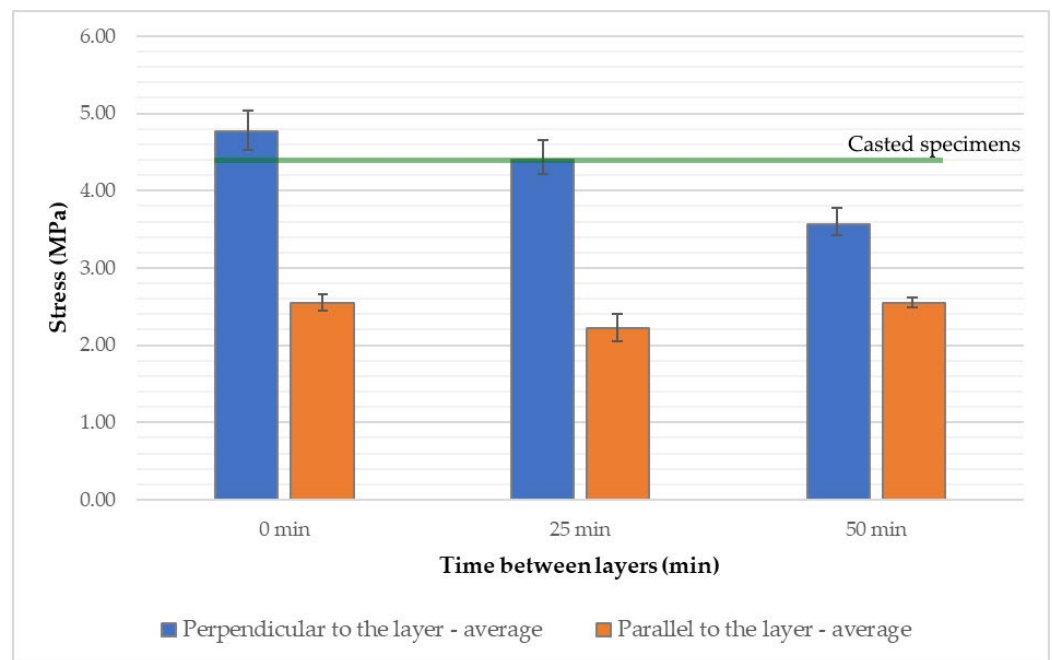


Figure 14. Flexural strength of 3D-printed concrete specimens depending on the applied time interval between successive printed layers.

The flexural strength in the direction parallel to the printed layers remains nearly constant regardless of the time interval between layer depositions, with average values ranging between 2.2 and 2.5 MPa. In this orientation, the strength primarily depends on the properties of the concrete mixture itself and the extrusion process, while the time gap between layers, and thus the quality of interlayer adhesion, has a less significant impact.

Referring to the results of the cast specimens, which showed an average flexural strength of 4.34 MPa, it can be concluded that the printing process had only a minor effect on the structural strength when tested perpendicular to the layers. In fact, the printed specimens without a time interval exhibited values up to 10% higher, which is a surprising

result. This may be attributed to insufficient compaction in the cast samples or inaccuracies in the printed specimen dimensions caused by uneven side surfaces.

However, the anisotropy in flexural strength is clearly confirmed by the results of printed specimens tested parallel to the layers, where values were approximately 60% lower compared to both the cast specimens and those printed and tested perpendicular to the layers.

3.2. Compressive Test

Compressive strength was determined by placing the specimens between two steel platens and applying a load (Figure 15). The 3D-printed specimens tested perpendicular to the layer orientation exhibited relatively random failure patterns, with cracks propagating in various directions across the specimen surface (Figure 15a). The printed specimens tested parallel to the layers predominantly failed along the interlayer interfaces (Figure 15b). In contrast, the cast specimens displayed a typical failure mode for this type of test, characterized by the formation of compression cones (Figure 15c).

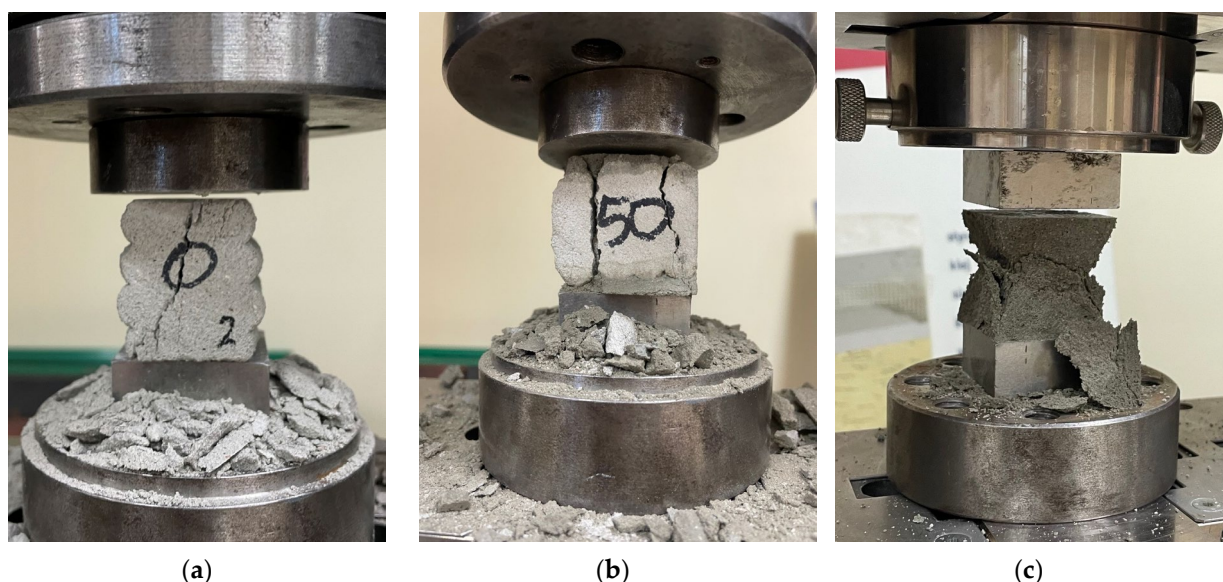


Figure 15. The failure mode of 3D-printed materials after the compressive test: (a) perpendicular to the layer; (b) parallel to the layer; (c) mold cast specimens.

The compressive strength of the tested material in the direction perpendicular to the layers ranged from 7.65 to 9.24 MPa, with the highest average strength observed in specimens printed without a time interval between layers. Similarly, the compressive strength in the direction parallel to the layers ranged from 8.36 to 9.31 MPa, and again, the highest value of 9.31 MPa was recorded for specimens printed without a time interval. Based on the results obtained in this study, a clear advantage in the strength of cast specimens can be observed. This may be attributed to significantly better compaction of the material during the casting process compared to 3D printing. Additionally, the printed specimens exhibit numerous constrictions, which contribute to the weakening of the overall structure. Compressive strength also shows a decreasing trend with increasing time intervals between successive printed layers (Figure 16 and Supplementary Materials Tables S4–S6). In this type of test, both perpendicular and parallel specimens exhibited a comparable reduction in strength when a 50 min interval was introduced—approximately 17% and 10%, respectively. It is worth noting that, similar to the flexural strength tests, specimens tested parallel to the layers demonstrated less sensitivity to extended time gaps.

In this case, however, they achieved slightly higher compressive strength values compared to the specimens tested perpendicular to the layers.

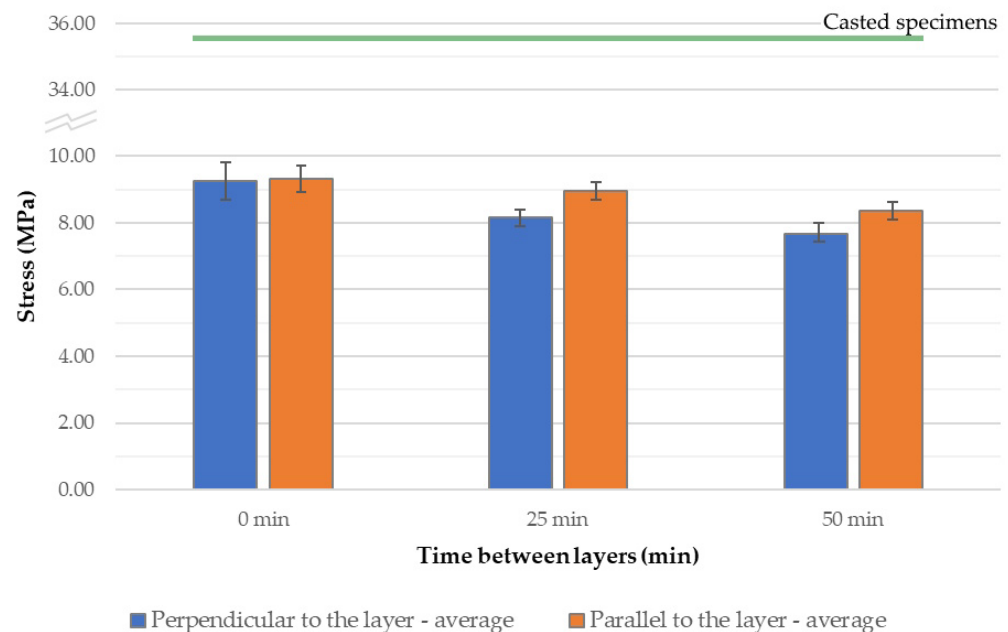


Figure 16. Compressive strength of 3D-printed concrete specimens depending on the applied time interval between successive printed layers.

In the case of compressive strength testing, the printing process had a significant impact on the results, as the cast specimens achieved values three to four times higher than those of the printed ones. This is characteristic of 3D concrete printing technology, where the lack of full structural cohesion, the presence of pores, and weakened interlayer zones reduce the material's load-bearing capacity.

3.3. Direct Tensile Strength and Splitting Test

The direct tensile tests (Figure 17a) and the splitting tests (Figure 17b) proceeded as expected, with specimen failure occurring along the printed layer interface, i.e., the weakest zone of the specimen, where cross-sectional narrowing and deformations resulting from interlayer bonding are present.

The tensile strength of the tested material ranged from 0.35 to 1.49 MPa. The highest average strength was achieved by the specimens printed without a time interval between layers, at 1.31 MPa. Notably, among the specimens produced with time intervals, those with a 50 min gap performed better. This may be attributed to slight differences in the cross-sectional area of the samples; in the case of specimens printed with shorter intervals, the cross-section was significantly smaller due to printing parameter inconsistencies.

The obtained tensile strength results indicate a high degree of variability in this property. The standard deviation was 0.38 MPa for the specimens with a 25 min interval and 0.32 MPa for those with a 50 min interval. Failure consistently occurred at the interlayer interface, where the cross-sectional area of the specimen was smallest.

As with the previous tests, the highest strength was observed in the specimens printed without a time interval between layers. The average splitting tensile strength of the material was 1.26 MPa. The results showed considerable variation—when measured along the direction of the printed layers, the standard deviation was 0.27 MPa. All tested specimens failed at the interlayer interfaces, as shown in the photograph in Figure 17b.

Tensile strength, measured using the direct method in the direction perpendicular to the layers, clearly highlights the weakness of the interlayer bonds. Extending the time

interval between successive layers leads to a reduction in adhesion, resulting in a significant decrease in strength (Figure 18, and Supplementary Materials Tables S7 and S8). The minimum strength—41% lower than the baseline (no time gap)—was recorded for the 25 min interval, which may correspond to a critical point of adhesion loss due to the previous layer's surface becoming too dry before the next layer was applied. Additionally, the high sensitivity of the direct tensile test method to defects and cross-sectional irregularities in printed structures contributes to the observed strength reduction. This sensitivity is further confirmed by the large variability in the test results.

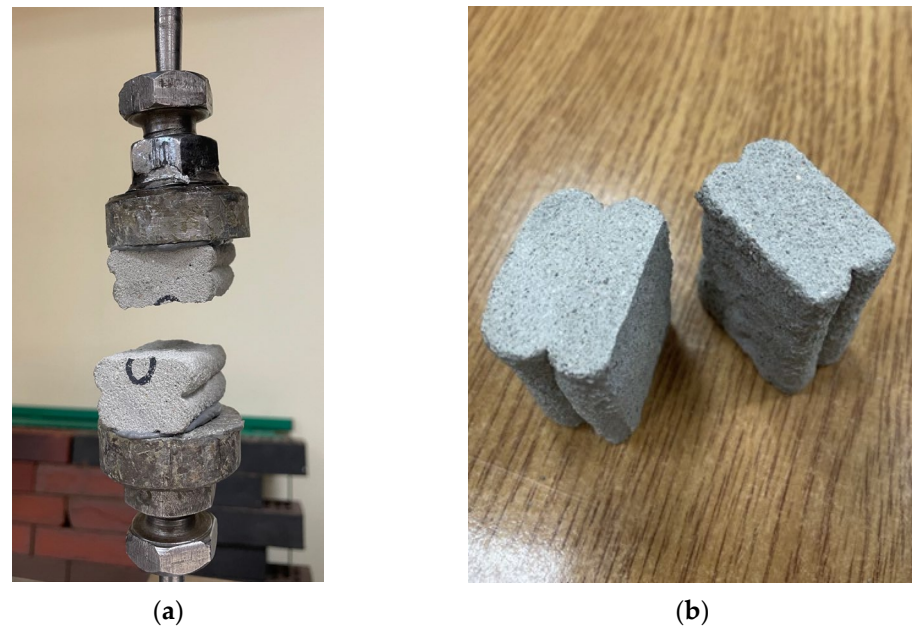


Figure 17. The failure mode of 3D-printed materials after: (a) direct tensile test; (b) splitting test.

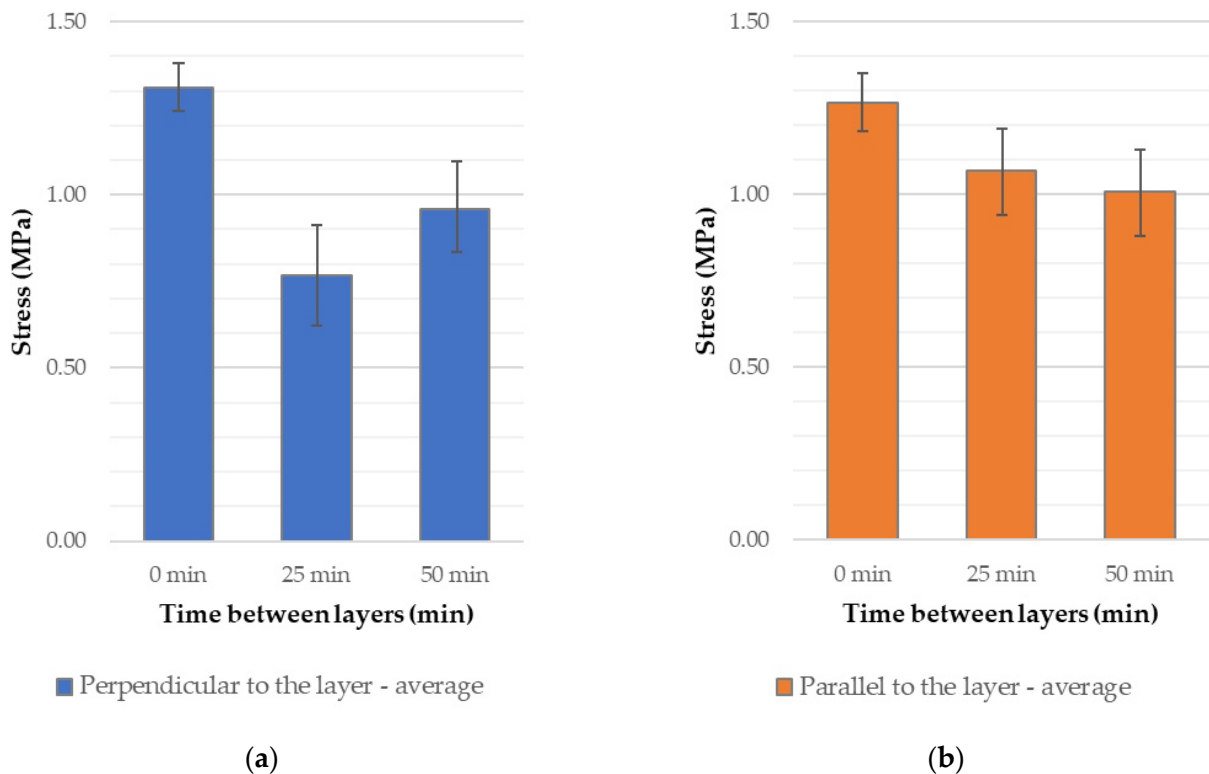


Figure 18. Tensile strength of 3D-printed concrete specimens depending on the applied time interval between successive printed layers: (a) direct tensile method; (b) splitting method.

In the case of the splitting tensile test, the average strength decreased over time, from a baseline value of approximately 1.26 MPa at 0 min to about 1.01 MPa at 50 min, representing a reduction of around 20%. The strength decline was moderate and more uniform compared to the direct tensile test.

3.4. Shrinkage

As part of the conducted tests, the shrinkage behavior of the printing material was also evaluated. For this purpose, a printed specimen with dimensions of 1000 mm × 40 mm × 40 mm was prepared and placed on a low-friction base. Dimensional changes resulting from shrinkage were recorded by two oppositely positioned laser sensors. The recorded shrinkage over time is presented in Figure 19.

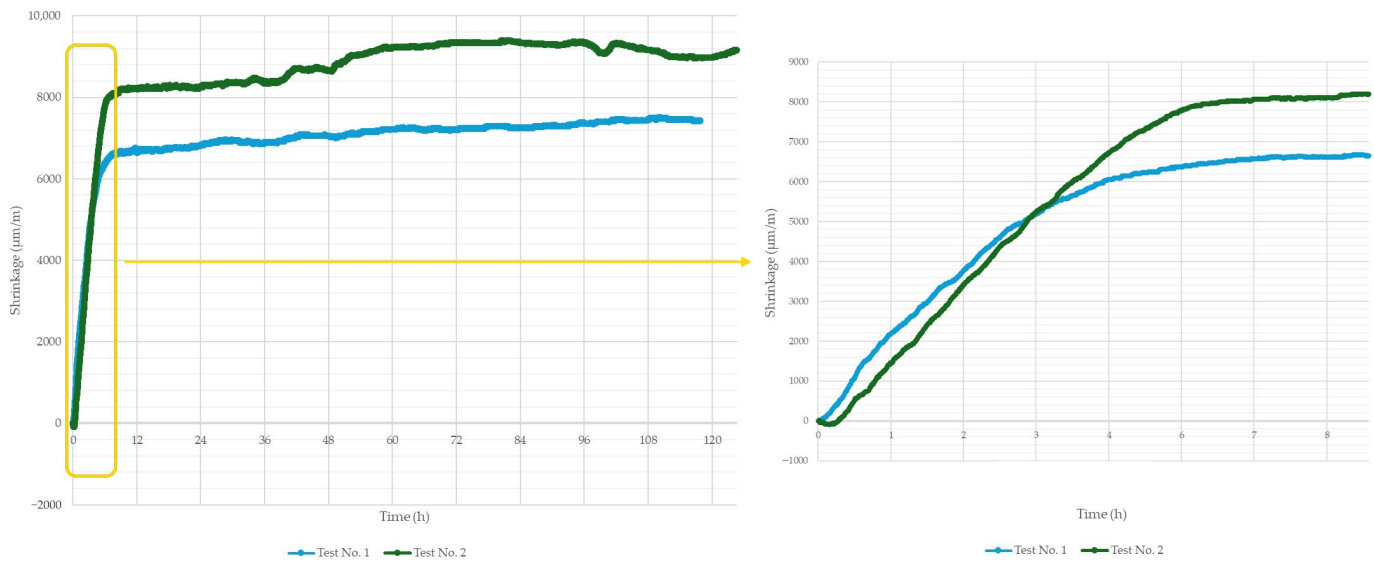


Figure 19. Evolution of total shrinkage over time for 3D-printed samples, with a detailed view of the first 8 h after printing.

The observed total shrinkage reached unusually high values for a material based on Portland cement [44,45]. This significant volumetric change may be attributed to the rapid setting of the material, accompanied by considerable heat generation. Additionally, shrinkage tends to intensify under conditions that promote moisture loss. The average air temperature and relative humidity during testing were 22.6 °C and 42% for Test 1, and 22.7 °C and 41.2% for Test 2.

A particularly rapid shrinkage rate was observed during the early setting and curing phase, especially within the first 6 h after printing. Within just the first hour, shrinkage values of approximately 1500–2000 µm/m were recorded, which may negatively affect the quality of interlayer bonding when longer time intervals between printed layers are used.

Based on the results from all tests conducted to evaluate anisotropy and interlayer cohesion in printed specimens, it can be observed that, in most cases, the highest strength values were recorded for specimens printed without any time interval between layers (Figure 20). This confirms the correlation between the time gap during printing and the quality of interlayer bonding.

The obtained results are fully consistent with the findings reported by other researchers in the field. Babafemi et al. [39] and Miah et al. [46] demonstrated a clear dependency between interlayer bond strength and the time interval between layer depositions in 3D concrete printing. Their studies confirmed that prolonged delays lead to reduced cohesion between successive layers, thereby diminishing the overall interlayer bond strength. Similarly, Moelich, Kruger, and Combrinck [47] introduced the concept of Maximum Op-

erational Time (MOT), defined as the maximum allowable interval that ensures sufficient interlayer adhesion. Their findings indicated that exceeding this time threshold results in a weakened interlayer interface, which aligns well with the trends observed in the present study. Ghosh et al. [48] further reported a notable decrease in flexural strength with increasing time intervals of 30 and 60 min, which they attributed to the loss of mix fluidity retention over time. The most recent comprehensive review by Mishra et al. [49] concluded that extended interlayer pauses contribute to increased porosity, degraded interfacial microstructure, and reduced flexural performance. However, the incorporation of admixtures such as fibers or hydration retarders was found to mitigate these adverse effects to a certain extent. For instance, Pan and Jiang [31] demonstrated that the use of a fluidity-retaining polycarboxylate-based superplasticizer (FR PC) effectively mitigates the reduction in interlayer bond strength associated with extended time intervals between successive layer depositions, specifically within the range of 20 s to 30 min. This finding confirms that both the time interval between layer applications and the composition of the concrete mix are critical parameters for controlling the quality and integrity of the interlayer bond in 3D concrete printing.

The diagram in Figure 21 highlights the anisotropic nature of 3D-printed concrete specimens, where strength measured perpendicular to the layers is highly dependent on the time interval between successive layers. This indicates a degradation of interlayer bonding over time. In contrast, parallel testing directions are less sensitive, as they rely more on the continuity of the material rather than on adhesion between layers. Flexural strength exhibits the most pronounced anisotropy, making it a critical indicator for assessing structural cohesion in practical applications of 3D concrete printing (3DCP).

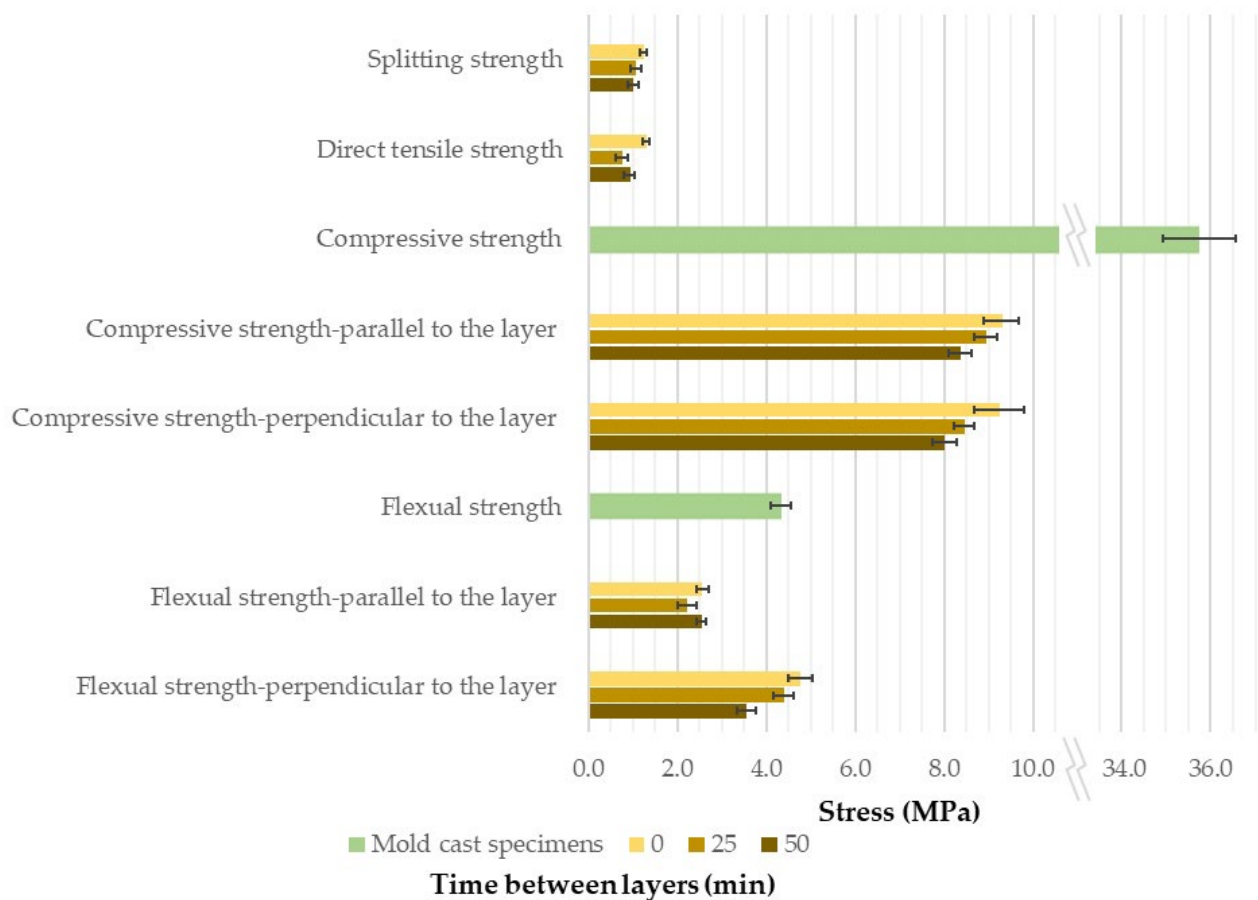


Figure 20. Summary of the tests conducted to determine the mechanical properties of the printed specimens.

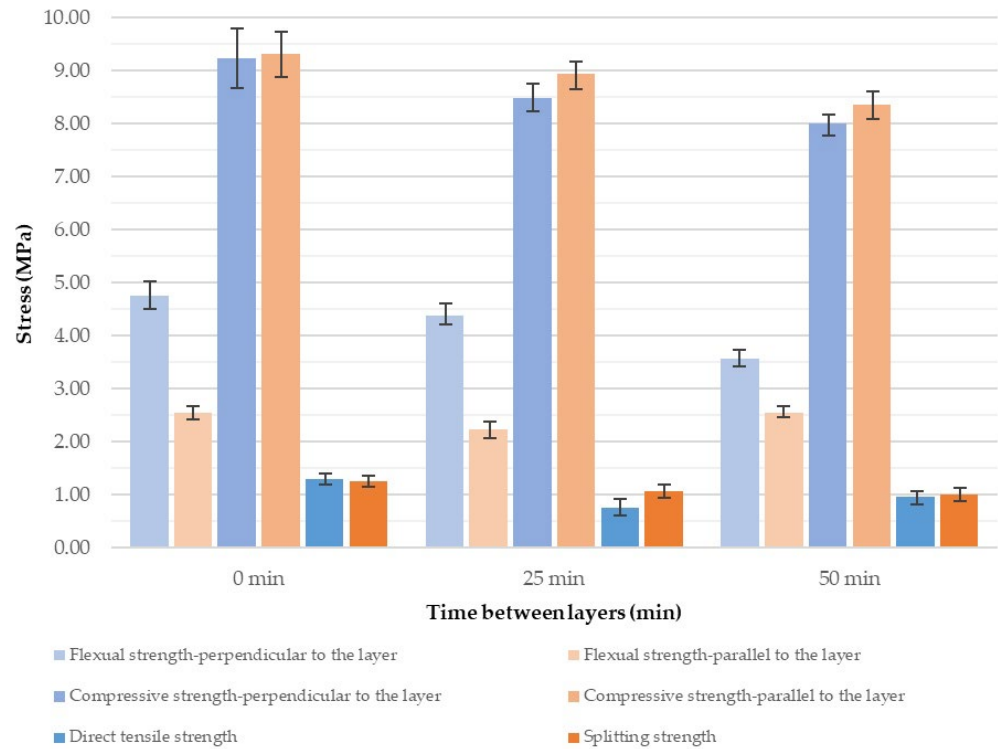


Figure 21. Summary of the tests conducted to determine the mechanical properties of the printed specimens, with color-coded assignment corresponding to the testing direction.

When comparing the test results of printed and cast specimens, a significant difference in compressive strength is evident. In the case of cast samples, the strength is approximately 3–4 times higher than that of the printed ones. This further confirms the influence of both the quality of the interlayer bonding, which can weaken the printed element, and the accuracy of the cross-sectional geometry. Numerous constrictions observed in printed specimens may negatively affect their load-bearing capacity.

When analyzing the impact of time intervals between successive layers on the mechanical performance of printed elements, it is also important to consider the effect of material shrinkage. As the material sets and cures over time, shrinkage occurs, altering the geometry of the printed structure. The conducted tests showed that a time gap of approximately 1 h can reduce the length of a 1 m specimen by as much as 2 mm. Such delays between layers can result in cumulative layer misalignment, which may, in turn, compromise the stability and strength of the final structure.

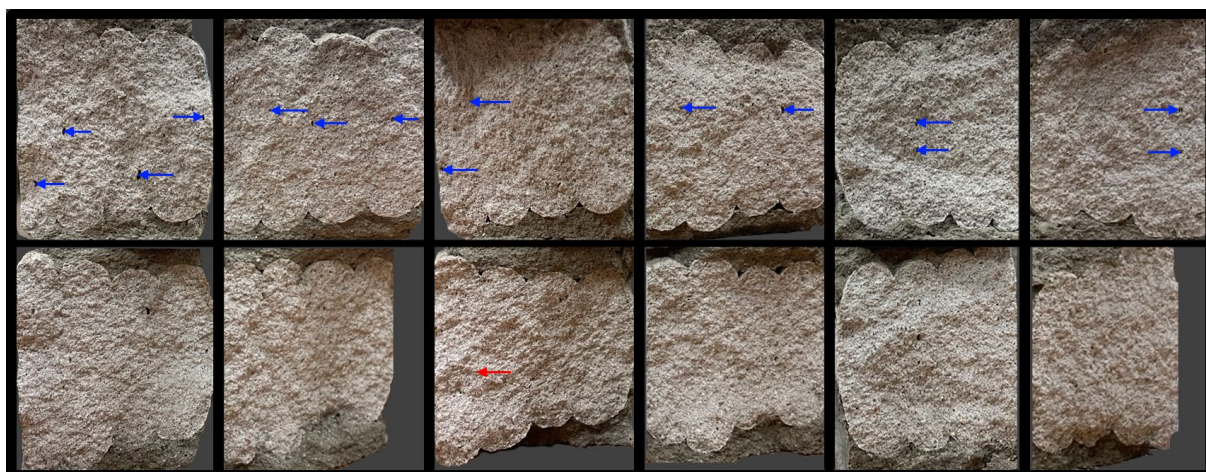
Structural analysis was carried out on the printed specimens subjected to flexural testing in the direction parallel to the printed layers. The obtained cross-sections are presented in Figure 22. Internal pores observed within the structure are marked with a blue indicator, while visible material discontinuities at the interlayer boundaries are marked with a red indicator.

Visual analysis of the internal structure of the printed specimens, presented in Figure 22, reveals a clear influence of the time interval between layers on the integrity of the material. Specimens printed without a delay exhibit a relatively compact and continuous structure, with few visible pores (indicated by blue arrows) and no major discontinuities along the interlayer zones. Introducing a 25 min interval results in a greater number of internal pores and the emergence of weak bonding areas at the interfaces. In the case of a 50 min delay, both the quantity and size of interlayer discontinuities increase significantly, as indicated by the presence of red arrows pointing to cracks and separations at the layer boundaries. This progressive deterioration of the interfacial regions correlates with the

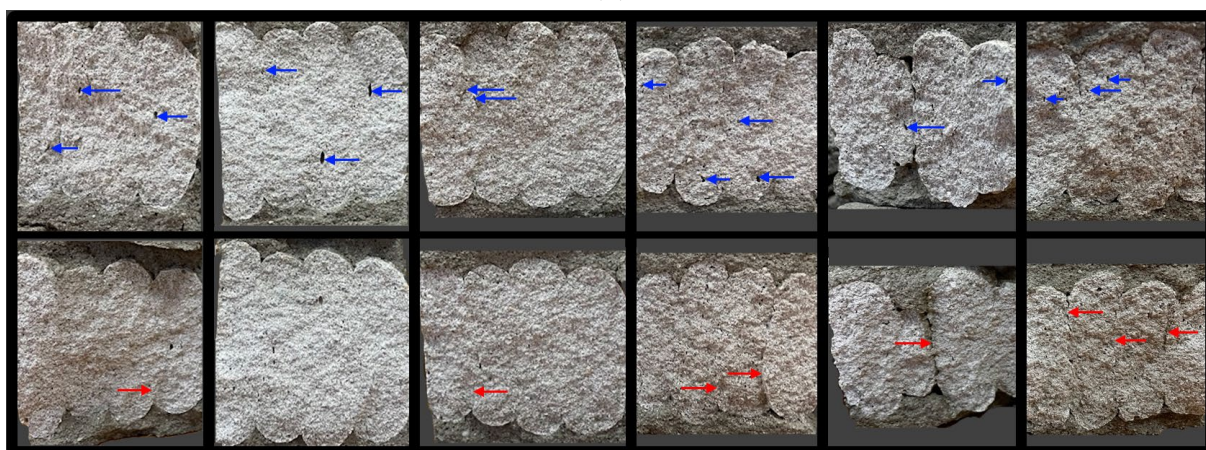
observed reduction in compressive strength and confirms that prolonged pauses between layers adversely affect interlayer adhesion and overall structural integrity. These findings underscore the importance of maintaining continuous material deposition in 3D concrete printing processes.



(a)



(b)



(c)

Figure 22. Internal structure of printed specimens: (a) without a time interval; (b) with a 25 min interval; (c) with a 50 min interval between layers. Cross-sections obtained after compressive strength testing in the direction parallel to the printed layers. Blue arrows on the upper cross-sections of each series indicate the presence of pores, while red arrows on the lower cross-sections highlight discontinuities at the interlayer interfaces.

4. Conclusions

Three-dimensional concrete printing technology is a rapidly evolving field of materials and mechanical engineering, gaining increasing application within the construction industry. This article presents an overview of the current state of knowledge regarding the mechanical properties of mineral-based materials used in 3D printing for structural purposes.

The primary objective of the research was to evaluate the impact of time intervals between the deposition of successive layers on the mechanical properties and anisotropy of printed elements. Printing process parameters have a direct influence on the quality of interlayer bonding, which plays a crucial role in the load-bearing capacity of elements produced using 3D concrete printing (3DCP), as interlayer connections often constitute the weakest zones within the material structure.

To comprehensively assess the mechanical behavior of printed specimens, tests were conducted to determine flexural, compressive, and tensile strength using both direct tensile and splitting methods. Based on the obtained results, the following conclusions were drawn:

- Extending the time interval between layers in 3D concrete printing (3DCP) has a negative effect on flexural strength in the direction perpendicular to the layers. A 50 min interval between successive layers resulted in a 25% reduction in strength compared to samples printed without interruption due to weakened interlayer bonding. In contrast, time gaps had no significant impact on strength in the parallel direction; however, the testing orientation itself led to a 60% reduction in strength compared to both perpendicular and cast specimens.
- Increasing the time interval between layers also caused a decrease in compressive strength in both directions—perpendicular and parallel to the printed layers. This effect was more pronounced in the perpendicular orientation, underscoring the importance of maintaining continuous layer deposition in 3DCP technology.
- Despite the use of the same material, the forming method significantly influenced the final strength of the concrete. Printed samples (3DCP) achieved only about 25–30% of the compressive strength of cast specimens. However, the flexural strength of cast specimens was comparable to that of printed specimens tested perpendicular to the layers. Nevertheless, further work is needed to improve interlayer adhesion and to optimize 3D printing parameters.
- Direct tensile testing proved more sensitive to the quality of interlayer bonding, highlighting the most critical weaknesses in 3DCP structures. In contrast, splitting tensile tests primarily reflect the general material properties and microstructure, and are somewhat less influenced by printing parameters. In both methods, extended interlayer time intervals negatively impacted tensile strength, though to varying degrees.
- Compressive and flexural strength measured perpendicular to the layers showed a strong dependency on the time interval between layers, indicating degradation of interlayer bonding. Strength in the parallel direction was less affected, as it depends more on material continuity than on adhesion. Flexural strength was found to be the most anisotropic parameter.
- Structural analysis of the cross-sections showed that extending the time interval between layers results in an increased number of pores and the formation of discontinuities at the interlayer interfaces. The observed defects indicate a weakening of interlayer adhesion and a deterioration of the structural cohesion of the printed material.
- In cases where extended time intervals between layers are unavoidable, particular attention should be paid to the shrinkage behavior of the printing material. Significant volumetric changes during setting and early curing may lead to geometric distortions and, consequently, to the reduced stability and strength of 3D-printed structures.

In the context of materials engineering and 3D concrete construction, optimizing the time interval between layer depositions is critical to ensuring structural quality and safety. The interlayer time gap is a key design parameter in 3D-printed concrete structures and should be minimized, particularly when high strength is required in the direction perpendicular to the printed layers.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ma18163845/s1>, Table S1: The results of the flexural strength perpendicular to the layer–interface plane. Table S2: The results of the flexural strength parallel to the layer–interface plane. Table S3: The results of the flexural strength of mold cast specimens. Table S4: The results of the compressive strength of 3D-printed materials, perpendicular to the layer. Table S5: The results of the compressive strength of 3D-printed materials, parallel to the layer. Table S6: The results of the compressive strength of mold cast specimens. Table S7: The results of the direct tensile strength of 3D printed specimens. Table S8: The results of the splitting strength of 3D printed specimens.

Author Contributions: Conceptualization, M.M., I.H., K.M. and M.H.; methodology, M.M. and K.M.; software, M.M., M.S. and K.M.; validation, M.M. and M.H.; formal analysis, M.M., I.H., K.M., M.S. and M.H.; investigation, M.M., K.M. and M.S.; resources, I.H., M.S. and M.H.; data curation, M.M. and M.H.; writing—original draft preparation, M.M., K.M., M.S. and M.H.; writing—review and editing, M.M. and M.H.; visualization, M.M.; supervision, M.H.; project administration, M.M., I.H. and M.H.; funding acquisition, I.H. and M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been supported by the Ministry of Science and Higher Education within the program “Implementation Doctorate”, DWD/5/0237/2021.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article and Supplementary Materials. Further inquiries can be directed to the corresponding authors.

Acknowledgments: We would like to acknowledge support by the Ministry of Science and Higher Education within the program “Implementation Doctorate”. We would like to thank Patrycja Sikora for helping in data gathering.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Al-Tamimi, A.K.; Alqamish, H.H.; Khaldoune, A.; Alhaidary, H.; Shirvanimoghaddam, K. Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges. *Buildings* **2023**, *13*, 827. [[CrossRef](#)]
2. Rehman, A.U.; Kim, I.-G.; Kim, J.-H. Towards Full Automation in 3D Concrete Printing Construction: Development of an Automated and Inline Sensor-Printer Integrated Instrument for in-Situ Assessment of Structural Build-up and Quality of Concrete. *Dev. Built Environ.* **2024**, *17*, 100344. [[CrossRef](#)]
3. Home Innovation Research Labs. *3D Concrete Printed Construction Systems Part 1: Identifying Barriers and Opportunities Market Research Findings—Final Report*; U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research: Washington, DC, USA, 2023.
4. Rollakanti, C.R.; Prasad, C.V.S.R. Applications, Performance, Challenges and Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies as the Future of Sustainable Construction—A State of the Art Review. *Mater. Today Proc.* **2022**, *65*, 995–1000. [[CrossRef](#)]
5. Buswell, R.A.; Soar, R.C.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, A. Freeform Construction: Mega-Scale Rapid Manufacturing for Construction. *Autom. Constr.* **2007**, *16*, 224–231. [[CrossRef](#)]
6. Du Plessis, A.; Babafemi, A.J.; Paul, S.C.; Panda, B.; Tran, J.P.; Broeckhoven, C. Biomimicry for 3D Concrete Printing: A Review and Perspective. *Addit. Manuf.* **2021**, *38*, 101823. [[CrossRef](#)]
7. Perrot, A.; Rangeard, D.; Courteille, E. 3D Printing of Earth-Based Materials: Processing Aspects. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *172*, 670–676. [[CrossRef](#)]

8. Dvorkin, L.; Marchuk, V.; Mróz, K.; Maroszek, M.; Hager, I. Energy-Efficient Mixtures Suitable for 3D Technologies. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 3038. [[CrossRef](#)]
9. Kaszyńska, M.; Hoffmann, M.; Skibicki, S.; Zieliński, A.; Techman, M.; Olczyk, N.; Wróblewski, T. Evaluation of Suitability for 3D Printing of High Performance Concretes. *MATEC Web Conf.* **2018**, *163*, 01002. [[CrossRef](#)]
10. Khorasani, M.; Ghasemi, A.; Rolfe, B.; Gibson, I. Additive Manufacturing a Powerful Tool for the Aerospace Industry. *Rapid Prototyp. J.* **2022**, *28*, 87–100. [[CrossRef](#)]
11. Xu, T.; Shen, W.; Lin, X.; Xie, Y.M. Additively Manufactured Thermoplastic Polyurethane (TPU) Mold for Concrete Casting of Complex Structure. *Rapid Prototyp. J.* **2022**, *28*, 1717–1730. [[CrossRef](#)]
12. Ali, M.H.; Issayev, G.; Shehab, E.; Sarfraz, S. A Critical Review of 3D Printing and Digital Manufacturing in Construction Engineering. *Rapid Prototyp. J.* **2022**, *28*, 1312–1324. [[CrossRef](#)]
13. Wang, X.; Li, W.; Guo, Y.; Kashani, A.; Wang, K.; Ferrara, L.; Agudelo, I. Concrete 3D Printing Technology for Sustainable Construction: A Review on Raw Material, Concrete Type and Performance. *Dev. Built Environ.* **2024**, *17*, 100378. [[CrossRef](#)]
14. Liu, D.; Zhang, Z.; Zhang, X.; Chen, Z. 3D Printing Concrete Structures: State of the Art, Challenges, and Opportunities. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *405*, 133364. [[CrossRef](#)]
15. Weng, Y.; Li, M.; Zhang, D.; Tan, M.J.; Qian, S. Investigation of Interlayer Adhesion of 3D Printable Cementitious Material from the Aspect of Printing Process. *Cem. Concr. Res.* **2021**, *143*, 106386. [[CrossRef](#)]
16. Ilcan, H.; Sahin, O.; Kul, A.; Yildirim, G.; Sahmaran, M. Rheological Properties and Compressive Strength of Construction and Demolition Waste-Based Geopolymer Mortars for 3D-Printing. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *328*, 127114. [[CrossRef](#)]
17. Nerella, V.N.; Mechtcherine, V. Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D). In *3D Concrete Printing Technology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 333–347, ISBN 978-0-12-815481-6.
18. Ahmed, G.H. A Review of “3D Concrete Printing”: Materials and Process Characterization, Economic Considerations and Environmental Sustainability. *J. Build. Eng.* **2023**, *66*, 105863. [[CrossRef](#)]
19. Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hutyra, A.; Dziura, P.; Hebda, M. Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 11866. [[CrossRef](#)]
20. Adaloudis, M.; Bonnin Roca, J. Sustainability Tradeoffs in the Adoption of 3D Concrete Printing in the Construction Industry. *J. Clean. Prod.* **2021**, *307*, 127201. [[CrossRef](#)]
21. Diks, T. The Roadmap to Standards for 3D Concrete Printing: Research on the Interplay Between Technological and Legislative Developments. Bachelor’s Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2019.
22. Alanazi, N.; Kolawole, J.T.; Buswell, R.; Susmel, L. The Theory of Critical Distances to Assess the Effect of Cracks/Manufacturing Defects on the Static Strength of 3D-Printed Concrete. *Eng. Fract. Mech.* **2022**, *269*, 108563. [[CrossRef](#)]
23. Marchment, T.; Sanjayan, J.G.; Nematollahi, B.; Xia, M. Interlayer Strength of 3D Printed Concrete. In *3D Concrete Printing Technology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 241–264, ISBN 978-0-12-815481-6.
24. Van Der Putten, J.; De Schutter, G.; Van Tittelboom, K. Surface Modification as a Technique to Improve Inter-Layer Bonding Strength in 3D Printed Cementitious Materials. *RILEM Tech. Lett.* **2019**, *4*, 33–38. [[CrossRef](#)]
25. Nerella, V.N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V. Effects of Layer-Interface Properties on Mechanical Performance of Concrete Elements Produced by Extrusion-Based 3D-Printing. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *205*, 586–601. [[CrossRef](#)]
26. Lao, W.; Li, M.; Masia, L.; Tan, M.J. Approaching Rectangular Extrudate in 3D Printing for Building and Construction by Experimental Iteration of Nozzle Design. In Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA, 10–13 August 2025.
27. Ding, T.; Xiao, J.; Mechtcherine, V. Microstructure and Mechanical Properties of Interlayer Regions in Extrusion-Based 3D Printed Concrete: A Critical Review. *Cem. Concr. Compos.* **2023**, *141*, 105154. [[CrossRef](#)]
28. Tay, Y.W.D.; Ting, G.H.A.; Qian, Y.; Panda, B.; He, L.; Tan, M.J. Time Gap Effect on Bond Strength of 3D-Printed Concrete. *Virtual Phys. Prototyp.* **2019**, *14*, 104–113. [[CrossRef](#)]
29. Wolfs, R.J.M.; Bos, F.P.; Salet, T.A.M. Hardened Properties of 3D Printed Concrete: The Influence of Process Parameters on Interlayer Adhesion. *Cem. Concr. Res.* **2019**, *119*, 132–140. [[CrossRef](#)]
30. İlcan, H.; Özkılıç, H.; Tuğluca, M.S.; Şahmaran, M. Interlayer Mechanical Performance of 3D-Printed Cementitious Systems: A Comprehensive Study on Operational and Material Parameters. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *419*, 135463. [[CrossRef](#)]
31. Pan, T.; Jiang, Y.; Ji, X. Interlayer Bonding Investigation of 3D Printing Cementitious Materials with Fluidity-Retaining Polycarboxylate Superplasticizer and High-Dispersion Polycarboxylate Superplasticizer. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *330*, 127151. [[CrossRef](#)]
32. Chen, Y.; Jansen, K.; Zhang, H.; Romero Rodriguez, C.; Gan, Y.; Çopuroğlu, O.; Schlangen, E. Effect of Printing Parameters on Interlayer Bond Strength of 3D Printed Limestone-Calcined Clay-Based Cementitious Materials: An Experimental and Numerical Study. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *262*, 120094. [[CrossRef](#)]

33. Hager, I.; Maroszek, M.; Mróz, K.; Kęsek, R.; Hebda, M.; Dvorkin, L.; Marchuk, V. Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials* **2022**, *15*, 4112. [[CrossRef](#)]
34. Luo, S.; Lin, Q.; Xu, W.; Wang, D. Effects of Interval Time and Interfacial Agents on the Mechanical Characteristics of Ultra-High Toughness Cementitious Composites under 3D-Printed Technology. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *374*, 130936. [[CrossRef](#)]
35. Liu, H.; Liu, C.; Wu, Y.; Bai, G.; He, C.; Yao, Y.; Zhang, R.; Wang, Y. 3D Printing Concrete with Recycled Coarse Aggregates: The Influence of Pore Structure on Interlayer Adhesion. *Cem. Concr. Compos.* **2022**, *134*, 104742. [[CrossRef](#)]
36. Panda, B.; Noor Mohamed, N.A.; Paul, S.C.; Bhagath Singh, G.; Tan, M.J.; Šavija, B. The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. *Materials* **2019**, *12*, 2149. [[CrossRef](#)]
37. Zhang, Y.; Yang, L.; Qian, R.; Liu, G.; Zhang, Y.; Du, H. Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete: Influence of Layer Stacked Vertically. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *399*, 132424. [[CrossRef](#)]
38. Şahin, H.G.; Mardani, A. Mechanical Properties, Durability Performance and Interlayer Adhesion of 3DPC Mixtures: A State-of-the-art Review. *Struct. Concr.* **2023**, *24*, 5481–5505. [[CrossRef](#)]
39. Babafemi, A.J.; Kolawole, J.T.; Miah, M.J.; Paul, S.C.; Panda, B. A Concise Review on Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing. *Sustainability* **2021**, *13*, 7137. [[CrossRef](#)]
40. Zareian, B.; Khoshnevis, B. Effects of Interlocking on Interlayer Adhesion and Strength of Structures in 3D Printing of Concrete. *Autom. Constr.* **2017**, *83*, 212–221. [[CrossRef](#)]
41. EN 196-1:2016; Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength. iTeh Standards: San Francisco, CA, USA, 2016.
42. EN 1015-3:1999; Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). CEN: Brussels, Belgium, 1999.
43. Paritala, S.; Singaram, K.K.; Bathina, I.; Khan, M.A.; Jyosyula, S.K.R. Rheology and Pumpability of Mix Suitable for Extrusion-Based Concrete 3D Printing—A Review. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *402*, 132962. [[CrossRef](#)]
44. Ma, L.; Jia, Z.; Chen, Y.; Jiang, Y.; Huet, B.; Delaplace, A.; Zhang, Y.; Zhang, Q. Water Loss and Shrinkage Prediction in 3D Printed Concrete with Varying w/c and Specimen Sizes. *Cem. Concr. Compos.* **2024**, *149*, 105523. [[CrossRef](#)]
45. Zhu, L.; Zhang, M.; Zhang, Y.; Yao, J.; Yang, G.; Guan, X.; Zhao, Y. Research Progress on Shrinkage Properties of Extruded 3D Printed Cement-Based Materials. *J. Build. Eng.* **2023**, *77*, 107394. [[CrossRef](#)]
46. Wu, Y.; Liu, C.; Bai, G.; Liu, H.; Cao, S.; Ma, Z.; Sun, Y. Effect of Time Interval on the Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete with Recycled Sand: Multi-Factor Influencing Mechanisms and Superabsorbent Polymer Enhancement. *Addit. Manuf.* **2024**, *86*, 104206. [[CrossRef](#)]
47. Moelich, G.M.; Kruger, J.; Combrinck, R. Modelling the Interlayer Bond Strength of 3D Printed Concrete with Surface Moisture. *Cem. Concr. Res.* **2021**, *150*, 106559. [[CrossRef](#)]
48. Ghosh, D.; Anleu, P.B.; Le Pape, Y.; Ma, Z.J. Effect of Interlayer Time-Lapse and Workability Retention on Printed Concrete Performance. *J. Mater. Civ. Eng.* **2023**, *35*, 04023362. [[CrossRef](#)]
49. Mishra, S.K.; Snehal, K.; Das, B.B.; Chandrasekaran, R.; Barbhuiya, S. From Printing to Performance: A Review on 3D Concrete Printing Processes, Materials, and Life Cycle Assessment. *J. Build. Pathol. Rehabil.* **2025**, *10*, 117. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Supplementary Materials

Table S1. The results of the flexural strength perpendicular to the layer–interface plane.

Time Between Layers (min)	No	Height h (mm)	Width b (mm)	Support Span a (mm)	F_{\max} (N)	$\sigma_{\max,B}$ (MPa)	Average (MPa)
0	1	41.7	26.5	100	1540	5.01	4.76
	2	42.2	25.1		1130	3.79	
	3	41.1	28.0		1800	5.71	
	4	42.7	24.2		1370	4.66	
	5	41.6	27.0		1560	5.01	
	6	41.8	26.6		1360	4.39	
25	1	37.0	36.0	100	1410	4.29	4.39
	2	35.5	37.5		1240	3.94	
	3	36.6	36.5		1470	4.51	
	4	34.5	36.8		1340	4.60	
	5	36.0	36.7		1190	3.75	
	6	37.0	34.5		1660	5.27	
50	1	41.0	29.6	100	1190	3.59	3.56
	2	36.8	33.8		1020	3.35	
	3	41.7	32.5		1320	3.50	
	4	40.3	30.8		1040	3.12	
	5	39.0	31.5		1390	4.35	
	6	36.5	33.3		1020	3.45	

Table S2. The results of the flexural strength parallel to the layer–interface plane.

Time Between Layers (min)	No	Height h (mm)	Width b (mm)	Support Span a (mm)	F_{\max} (N)	$\sigma_{\max,B}$ (MPa)	Average (MPa)
0	1	35.2	42.6	100	889	2.53	2.55
	2	35.6	41.1		922	2.66	
	3	35.9	40.9		808	2.30	
	4	35.6	41.4		826	2.36	
	5	35.5	41.4		1030	2.97	
	6	36.0	40.6		872	2.49	
25	1	35.1	47.7	100	967	2.48	2.23
	2	35.5	45.6		969	2.54	
	3	35.5	45.0		857	2.27	
	4	33.4	47.0		804	2.30	
	5	35.0	47.5		600	1.55	
50	1	33.6	41.3	100	779	2.51	2.55
	2	32.7	40.3		761	2.66	
	3	35.1	41.2		843	2.50	
	4	36.4	46.3		1130	2.77	
	5	35.3	45.5		980	2.60	
	6	35.2	46.9		867	2.24	

Table S3. The results of the flexural strength of mold cast specimens.

No	Height <i>h</i>	Width <i>b</i>	Support Span <i>a</i>	F_{max}	$\sigma_{max,B}$	Average
-	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	40.0	40.0	100	2060	4.83	4.34
2	40.0	40.0		2190	5.13	
3	40.0	40.0		1530	3.59	
4	40.0	40.0		1710	4.01	
5	40.0	40.0		1820	4.27	
6	40.0	40.0		1800	4.22	

Table S4. The results of the compressive strength of 3D-printed materials, perpendicular to the layer.

Time Between Layers	No	Cross-Section <i>S</i>	F_{max}	$\sigma_{max,C}$	Average
(min)	-	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)
0	1	1196.3	9450	7.90	9.24
	2	1076.1	10,600	9.85	
	3	1168.5	11,900	10.18	
	4	962.5	10,800	11.22	
	5	1040.0	8720	8.38	
	6	1147.0	9080	7.92	
25	1	1125.8	8600	7.64	8.15
	2	1139.5	9700	8.51	
	3	1104.6	8260	7.48	
	4	982.3	8040	8.18	
	5	1078.7	8750	8.11	
	6	994.5	8900	8.95	
50	1	1194.8	8390	7.02	7.65
	2	1191.0	9550	8.02	
	3	1136.3	9600	8.45	
	4	1052.1	7970	7.58	
	5	1100.8	7920	7.19	

Table S5. The results of the compressive strength of 3D-printed materials, parallel to the layer.

Time Between Layers	No	Cross-Section <i>S</i>	F_{max}	$\sigma_{max,C}$	Average
(min)	-	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)
0	1	1600.0*	15,700	9.81	9.31
	2		14,700	9.19	
	3		12,600	7.88	
	4		15,700	9.81	
	5		13,700	8.56	
	6		17,000	10.63	
25	1	1600.0*	14,900	9.31	8.95
	2		14,600	9.13	
	3		13,300	8.31	
	4		12,900	8.06	
	5		14,000	8.75	
	6		16,200	10.13	

50	1	1600.0*	12,300	7.69	8.36
	2		12,900	8.06	
	3		15,200	9.50	
	4		14,400	9.00	
	5		12,600	7.88	
	6		12,900	8.06	

* Pressure surface according to the dimensions of the testing machine tool- 40 × 40 mm²

Table S6. The results of the compressive strength of mold cast specimens.

No	Cross-Section S	F _{max}	σ _{max,C}	Average
-	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)
1	1600.0*	59,600	37.25	35.77
2		63,300	39.56	
3		59,900	37.44	
4		63,000	39.38	
5		58,600	36.63	
6		62,300	38.94	
7		53,300	33.31	
8		53,600	33.50	
9		51,600	32.25	
10		52,700	32.94	
11		54,100	33.81	
12		54,800	34.25	

* Pressure surface according to the dimensions of the testing machine tool – 40 × 40 mm²

Table S7. The results of the direct tensile strength of 3D printed specimens.

Time Be- tween Layers	No	Cross-Section S	F _{max}	σ _{max,D}	Average
(min)	-	(mm)	(N)	(MPa)	(MPa)
0	1	1070.65	1370.0	1.28	1.31
	2	1196.25	1720.0	1.44	
	3	1177.2	1680.0	1.43	
	4	1292.1	1930.0	1.49	
	5	1291.95	1430.0	1.11	
	6	1196.01	1330.0	1.11	
25	1	1169.1	412.0	0.35	0.77
	2	959.14	595.0	0.62	
	3	922.2	699.0	0.76	
	4	1046.4	480.0	0.46	
	5	1166.79	1590.0	1.36	
	6	1280.3	1350.0	1.05	
50	1	1220.9	1420.0	1.16	0.96
	2	1307.9	1870.0	1.43	
	3	1328.4	1170.0	0.88	
	4	1152.58	736.0	0.64	
	5	1281.28	781.0	0.61	
	6	1360.8	1400.0	1.03	

Table S8. The results of the splitting strength of 3D printed specimens.

Time Be- tween Layers	No	Length <i>L</i>	Width <i>d</i>	F_{max}	σ_{max,S}	Average
(min)	-	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)	(MPa)
0	1	44.0	29.5	2770.0	1.36	1.26
	2	43.9	30.5	3050.0	1.45	
	3	43.9	30.4	2960.0	1.41	
	4	43.8	29.5	2110.0	1.04	
	5	43.8	29.9	2000.0	0.97	
	6	43.8	30.0	2800.0	1.36	
25	1	43.9	26.5	1250.0	0.68	1.07
	2	43.9	29.5	2620.0	1.29	
	3	43.4	27.0	2390.0	1.30	
	4	43.2	30.8	2610.0	1.25	
	5	43.8	22.0	1080.0	0.71	
	6	42.6	29.5	2300.0	1.17	
50	1	42.5	27.0	1490.0	0.83	1.01
	2	41.8	32.8	2450.0	1.14	
	3	42.5	28.2	1450.0	0.77	
	4	42.0	33.6	3290.0	1.48	
	5	43.0	28.9	2170.0	1.11	
	6	42.4	25.0	1190.0	0.71	

Kraków, 22.09.2025

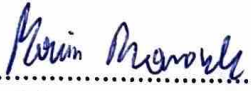
OŚWIADCZENIE - PUBLIKACJA 2

Oświadczam, iż mój wkład w powstanie publikacji pt.: „*Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers*” opublikowanej w czasopiśmie *Materials* w 2025 roku, nr DOI 10.3390/ma18163845 jest zgodny z informacją zawartą w poniższej tabeli.


Jednocześnie oświadczam, iż wyrażam zgodę na wykorzystanie wyżej wymienionej publikacji jako części rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka.

Imię i nazwisko współautora	Wkład w powstanie publikacji
Marcin Maroszek	Sformułowanie problemu badawczego oraz zaprojektowanie metodyki badań ukierunkowanej na ocenę wpływu przerw czasowych między warstwami i kierunku obciążenia na anizotropię właściwości. Przygotowanie narzędzi programistycznych do akwizycji i przetwarzania danych. Zaprojektowanie i budowa stanowiska do badania skurczu materiału drukowanego. Przygotowanie mieszanek oraz kontrola właściwości materiału świeżego metodą stolika rozplwowego. Wykonanie próbek materiałowych. Organizacja i realizacja badań parametrów mechanicznych na próbkach drukowanych i referencyjnych. Opracowanie i nadzór nad danymi pomiarowymi oraz wynikami. Walidacja wyników oraz koordynacji pracy. Przygotowanie materiałów graficznych. Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu. Przygotowanie ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.
Izabela Hager	Sformułowanie problemu badawczego oraz założeń merytorycznych. Zapewnienie zasobów niezbędnych do realizacji oraz współprowadzenie administracji projektu. Udział w analizie formalnej wyników i ich osadzeniu w aktualnym stanie wiedzy oraz pozyskanie finansowania.
Katarzyna Mróz	Dobór metodyki i programu badań obejmujących analizę wpływu kierunków obciążenia i wariantów czasu aplikacji kolejnych warstw. Przetwarzanie i interpretacja zebranych danych w kontekście jakości spoiny międzywarstwowej. Udział w realizacji testów wytrzymałościowych oraz w

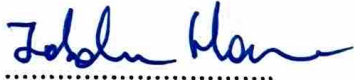
	opracowaniu części wersji wstępnej manuskryptu. Udział w redakcji końcowej wersji manuskryptu.
Mateusz Sitarz	Współprzygotowanie oprogramowania i wsparcie w przygotowaniu próbek do badań. Realizacja części pomiarów i wstępna analiza zgromadzonych danych. Współautorstwo fragmentów wstępnej wersji manuskryptu.
Marek Hebda	Sformułowanie problemu badawczego i nadzór merytoryczny nad przebiegiem prac. Zapewnienie walidacji zastosowanej metodyki oraz uzyskanych wyników badań. Organizacja i koordynacja prac projektowych. Redakcja i korekta manuskryptu po recenzjach.



 podpis oświadczającego
 mgr inż. Marcin Maroszek



 podpis oświadczającego
 dr inż. Mateusz Sitarz



 podpis oświadczającego
 dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK








 podpis oświadczającego
 dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK



 podpis oświadczającego
 dr inż. Katarzyna Mróz

Article

Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation

Paweł Dziura , Marcin Maroszek , Mateusz Góra, Magdalena Rudziewicz , Kinga Pławecka 
and Marek Hebda * 

Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; pawel.dziura@doktorant.pk.edu.pl (P.D.); marcin.maroszek@doktorant.pk.edu.pl (M.M.); mateusz.gora@doktorant.pk.edu.pl (M.G.); magdalena.rudziewicz@doktorant.pk.edu.pl (M.R.); kinga.plawecka@pk.edu.pl (K.P.)

* Correspondence: marek.hebda@pk.edu.pl

Abstract: The intensive development of 3D Concrete Printing (3DCP) technology causes constantly increased its share in the construction sector. However, in order to produce products with controlled properties, optimization of the technological process is still required. Automation of production based on additive manufacturing methods streamlines the process by comprehensively manufacturing building components that meet, among others, strength, visual, and insulation requirements. Moreover, the possibility of using computer simulations to assess the properties of the designed elements allows for a multitude of analyzed versions of the constructed partitions, which can be verified at the design stage. Thanks to such an opportunity, the process of designing building elements can be significantly improved. The article presents results related to the assessment of the level of thermal insulation of products that can be produced by additive technology, depending on the applied spatial geometry of the vertical partition and the amount and type of materials used. Eight original solutions of in-fill pattern were designed, for which both Finite Element Method (FEM) computer simulations of thermal conductivity and experimental measurements of thermal conductivity of samples were performed. On the basis of the obtained results, both the correctness of the simulation results for the various analyzed materials and their consistency with the practical results were found. Depending on the investigated geometry, for samples of the same dimensions and using the same material, the differences in the U-factor obtained by FEM analysis amounted to 61%. The best solution from the investigated spatial geometries of the vertical partitions has been indicated. The U parameter in the variant with the best thermal insulation was $0.183 \text{ W/m}^2\text{K}$, which meets the requirements of Polish construction law. The issues discussed in this work can be the basis for the selection of the best solution possible for practical use during the production of building walls using the 3DCP method fulfilling the guidelines of applicable standards. Furthermore, they can be used as a tool for optimizing geometry in terms of energy savings and reducing waste production by both engineers developing 3DCP technologies and architects using innovative techniques for manufacturing building structures.

Keywords: 3D concrete printing; thermal conductivity; numerical simulation; geometry



Citation: Dziura, P.; Maroszek, M.; Góra, M.; Rudziewicz, M.; Pławecka, K.; Hebda, M. Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation. *Materials* **2023**, *16*, 5772. <https://doi.org/10.3390/ma16175772>

Academic Editor: Xiaoming Liu

Received: 31 July 2023

Revised: 17 August 2023

Accepted: 18 August 2023

Published: 23 August 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Three-dimensional printing technology is now a widely known additive manufacturing method of elements from many different materials. The constantly growing range of applications, easier access, and thus greater interest in this technique allowed for its huge development in recent years. Currently, the most widespread is printing from polymers and metals, which enables the production of elements of almost any shape. In many industrial plants, this technology is a supplement to conventional machining techniques [1,2]. Its new field of application is the medical or space industries. Chen et al. present promising

results in the development of tissue printing technology; however, the complicated and lengthy process of testing and approval for use means that this technique still remains in the realm of prototypes [3]. The possibilities of 3D printing are also increasingly used in the construction sector known as 3DCP. Its intensive development in recent years is, among others, a response to the market demand, which are problems with excessive waste production and the lack of qualified workers [4–6]. In the construction industry, 3D printing technology is perceived as environmentally friendly due to the freedom of design, automation, less waste generation, lower consumption of raw materials, and lower labor costs [7]. These benefits also include the reduction in production costs resulting from the elimination of formwork and the reduction in workload, thus shortening the duration of projects, which translates into an increase in the competitiveness of modern additive technologies in relation to traditional methods of manufacturing building elements [8]. This makes the interest in this technology not only related to the research area but also to the industrial sector as a technology that allows the implementation of innovation and competitiveness of solutions in relation to competition [4,9,10]. An additional advantage of this technology may be solutions that allow the construction of building partitions with individual geometry and from materials ensuring both mechanical strength and high thermal insulation parameters. In the construction industry, Portland cement is still the most commonly used material in the world, which is characterized by resistance to fire, rust, and decay, as well as flexibility in forming and shaping [11–14]. The intensive use of this material has been discussed by many researchers on its impact on the natural environment in the last decades because the production of cement has a negative impact on the environment through the use of large amounts of raw materials and high energy requirements [15,16]. These factors translate into a large amount of carbon dioxide released into the atmosphere, and thus global warming [12,13,17]. Therefore, it is necessary to reduce the amount of Portland cement used in the construction sector, which can be achieved by developing new alternative materials, e.g., geopolymers binders, or by producing building elements based on geometries that require less material and reduce the generation of waste. The 3DCP method gives almost endless possibilities in terms of the geometry of the created elements. Its principle of operation consists in transforming a 3D solid saved in a digital file into a physical spatial structure [18,19]. Based on these features of the technology, it is possible to develop optimal geometries of vertical partitions of buildings, which, apart from lower demand for building material, will meet the requirements of both construction and thermal insulation layers [20,21]. Obtaining a thermal partition of the building with appropriate properties is necessary both for economic reasons, by reducing the costs of heating and cooling utility rooms, and for environmental reasons, in order to minimize energy losses. Moreover, actions aimed at improving the thermal insulation of building partitions and reducing the overall energy consumption for heating are required in accordance with the objective of the European Energy Efficiency Directive, which is the climate neutrality of buildings by 2050 [22]. According to the latest construction requirements for the thermal protection of buildings in Poland (WT 2021), the maximum value of the heat transfer coefficient $U_{c(max)}$ for vertical partitions is $0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [23]. Such requirements mean that each new building must be carefully protected against loss of thermal energy through all external partitions. In order to achieve such a level of thermal protection, it is necessary to use an appropriate thickness of insulating materials, which are traditionally installed as an additional layer on external walls [22]. Such solutions, however, generate a significant amount of waste and require a lot of work by qualified employees [21]. In addition, when insulating vertical partitions with an external insulating layer, the outline of the building itself increases significantly, which also often causes problems and is not possible in all places. Using the possibility of 3D printing to produce a vertical partition having both the parameters of the load-bearing wall and the insulation layer would allow for a significant reduction in the amount of work, the amount of waste, and thus the costs of building production [24]. However, the production of vertical partition of a building using 3DCP requires its prior full modeling. During this operation, it is necessary to take

into account not only its external dimensions but also the internal structure of the filling, so as to ensure adequate stability during the printing process, the required load capacity of the structure, and the assumed thermal insulation [5,25]. In addition to the advantages of creating arbitrary geometries with internal voids and using different materials during detail printing, the capabilities of 3DCP technology can also positively affect a wide variety of building features [26,27]. This is being studied in detail by researchers, who are testing the parts produced with this technology from many different aspects. Prasittisopin et al. verified the thermal and acoustic insulation properties in walls printed from material with different compressive strengths and textures of the printed panels. They showed that blends with lower compressive strength, which have more pores, insulate better. Similarly, wall structures having more pores or air voids show better thermal insulation [28]. Advanced numerical analyses, on the other hand, were carried out by Suntharalingam et al. which determined the level of fire performance of printed walls, depending on the wall structure as well as the insulation used [29]. Intensive work on the development of 3DCP is also underway in terms of reducing the materials and energy consumed in the printing process, which undoubtedly benefits the environment [30,31].

The article presents the results of a comparison of computer simulations and experimental measurements related to 3DCP printing of vertical partitions made of a combination of concrete and insulating material, so that, in contrast to conventional construction, the Umax parameter of the partition was reduced without increasing the outline of the building.

2. Materials and Methods

In order to achieve the best possible results of partition insulation, it is necessary to use such an internal geometry that will maximize its thermal resistance. Insulating materials such as foams or wools, whose low thermal conductivity reduces energy losses, are perfect for this purpose. However, the partitions of buildings are also to ensure adequate load-bearing capacity, for which it is necessary to use solid materials such as concrete, whose insulating properties are much weaker. Therefore, it is important to prepare the internal geometry of the partition in a way that maximizes the energy flow path through the solid material of the partition. Such a solution will also reduce thermal bridges in places where the internal and external surface of the partition is connected to a well-conductive material. The presence of such connectors is, in turn, determined mainly by the technological requirements of 3DCP, but also by the need to close the space inside the partition before filling it with insulating material in order to ensure adequate load-bearing capacity of the partition produced [5]. At this point, it should also be mentioned that the performance of the partition is also influenced by the surface itself, which in the vast majority of 3DCP printing cases has a characteristic texture in the form of high roughness and fine grooves between layers, which is particularly evident in 3DCP analysis based on architectural perspective [32,33]. However, this is not a rule because there are solutions on the market in which the print head is constructed in such a way as to smooth the lines of the applied material, getting rid of the above imperfections [34]. During the implementation of these studies, it was decided to omit the aspect of wall roughness and rendering the texture of layering. Based on the above assumptions and additionally taking into account the reduction in production costs and minimization of waste, the evaluation of thermal insulation parameters was carried out using a computer FEM simulation for eight original concepts of partition geometry. The numerical simulation was carried out in the SolidWorks 2022 program with the use of the Simulation module, which enables calculations of heat transport in a given system. Each concept was created taking into account the technological possibilities of 3DCP printing. The base element was a prepared architectural 3D model of the partition with overall dimensions: 1000 mm × 700 mm × 430 mm. This model also contained information about the component materials, which included normal strength concrete as a load-bearing part and polyurethane (PUR) foam as a filling and thermal insulation of the partition. The simulation module required supplementing the data on the boundary conditions of the performed

analysis and the method of performing the calculations. Verification of the numerical results was carried out on a reduced scale using the HFM 446 Lambda Eco-Line heat flow meter by Netzsch, on samples with dimensions of 200 mm × 200 mm × 50 mm. Such a small thickness of the sample made it impossible to produce it using the 3DCP method. The minimum possible nozzle size in 3DCP technology is usually larger than 20 mm, as it depends on the material used and its aggregate fraction components. Therefore, all the tested variants of the geometry were rescaled while maintaining all proportions. To make samples on a smaller scale, the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing method was used, which allowed to obtain the required properties. Due to the verification of only the geometry of the partition, the impact of the printing method on the obtained results was considered negligible. The numerical determination of thermal conductivity levels in all geometry variants was based on prepared architectural 3D models and material data. In the simulations, normal strength concrete was the material for the construction of printed building elements. The printed geometries were to meet the requirements of transferring compressive stresses generated by the weight of the entire building and to give the final shape to the resulting elements. The voids created inside the partition were filled with an insulating material—PUR foam, in order to improve the thermal insulation properties of the designed partitions. Table 1 shows the properties of the materials used in the computer simulation. The calculations were also supplemented with an analysis of the configuration, in which the carrier material was polylactic acid (PLA) used in the verification process.

Table 1. Properties of materials used in an investigation of the concept of partition insulation geometry.

Material Property	Normal Strength Concrete	PUR Foam	PLA	Units
Elastic Modulus	32,000	2200	2950	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.2	0.32	0.33	-
Shear Modulus	13,300	830	1200	N/mm ²
Density	2460	16.02	1250	kg/m ³
Tensile Strength	3	0.79	45	N/mm ²
Compressive Strength	25	0.64	60	N/mm ²
Yield Strength	-	-	35	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	10 ⁻⁵	6.5 × 10 ⁻⁵	7 × 10 ⁻⁵	K ⁻¹
Thermal Conductivity λ	0.5	0.027	0.13	W/(mK)
Specific Heat Capacity	750	1.2	1800	J/(kgK)

Models for testing on the HFM 446 Lambda Eco-Line heat flow meter were made in FDM technology on the Bambu Lab X1 device. The main printing parameters were presented in Table 2.

Table 2. FDM printing parameters.

Parameter	Value	Units
Nozzle diameter	0.6	mm
Layer Height	0.32	mm
Wall line count	6	N/A
Infill	100	%
Printing Temperature	210	C
Bed Temperature	60	C
Printing Speed	50	mm/s

The FEM thermal simulations were performed as a stationary heat flow (steady-state conditions/heat transfer) through a segment of the designed vertical partition of the building. In addition to preparing the 3D model, before starting the simulation, it was required to define the assumptions and boundary conditions of the observed phenomenon. The

considered case was described using the convection phenomenon (Convection Thermal Load function—Simulation SW 2022 module), for which the following parameters were set: external temperature (cold side) 273.15 K and external film coefficient 25 W/(m²K) (Figure 1a); internal temperature (hot side) 293.15 K and internal film coefficient 7.7 W/(m²K) (Figure 1b) [20,28,29]. The values of the coefficients depend, among others, on the type of convection and the fluid in contact with the partition. Natural convection, which usually occurs inside the rooms, has lower values than forced convection, operating from the outside of the partition, where the wind forcing air movement intensifies the heat flow process.

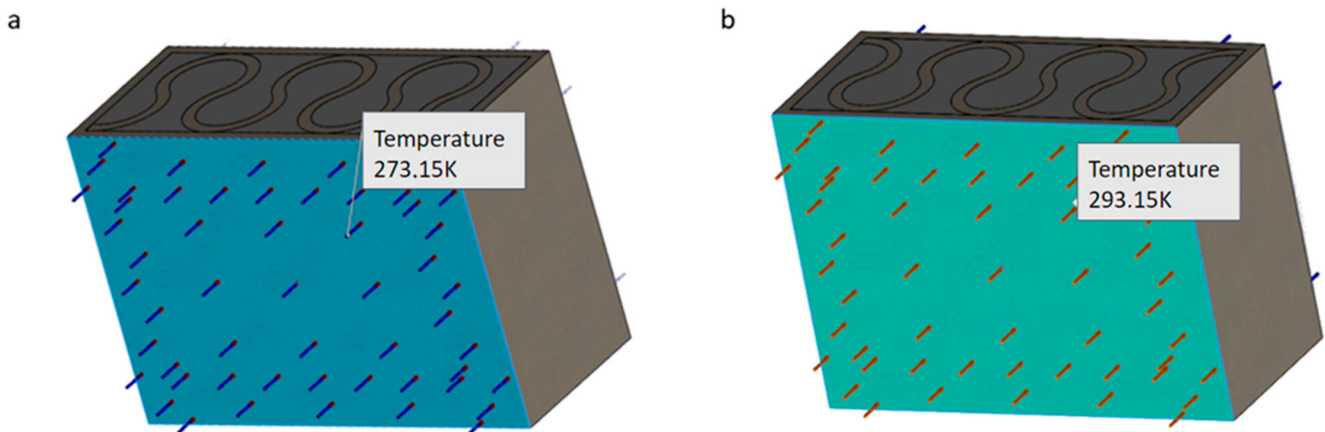


Figure 1. Model presenting the influence of temperature on the sample: (a) 273.15 K on the cold side and (b) 293.15 K on the hot side.

In order to obtain repeatable and error-free results, high quality mesh was used, the parameters of which for one of the geometries are listed in Table 3. The average aspect ratio value was in the range of 1–3, while the maximum aspect ratio was less than 100. A mesh of such quality allowed to obtain accurate and repeatable results of simulations of processes related to heat transport through the partition [35].

Table 3. Mesh parameters for simulation processes.

Details Mesh Type	Solid Mesh
Mesher used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for high quality mesh	16 points
Max element size	38.0215 mm
Min element size	12.6737 mm
Mesh quality	High
Total nodes	88,252
Total elements	48,751
Maximum aspect ratio	18.272
Percentage of elements with aspect ratio < 3	97
Percentage of elements with aspect ratio > 10	0.107

After the simulation, the average heat flow through the entire surface of the wall was determined, which was used for further calculations. The obtained result was divided by the difference of the set temperatures, thanks to which the coefficient of thermal conductivity U was obtained, according to the Equation (1). In all measurements, a temperature difference of 20 K was assumed.

$$U = \frac{Hf_{AVG}}{\Delta T} \quad \left(\frac{W}{m^2K} \right) \quad (1)$$

Hf_{AVG} —average heat flow (W/m²)

ΔT —temperature difference (K).

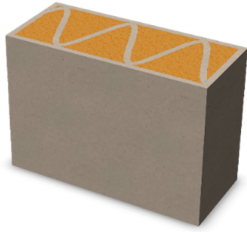




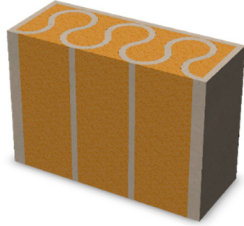


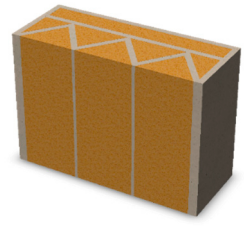





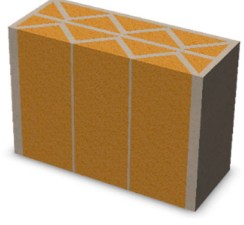
3. Results and Discussion

Nowadays, generally, the created structures have fillings where the opposite walls of the partition were connected with each other with perpendicular lines [20]. This solution adversely affects the 3D printing technology as well as the thermal insulation of the wall, due to the minimization of the length of the thermal bridge between the hot (internal) and cold (external) sides. Therefore, in the presented solutions, the geometrical concept of the partition was designed in such a way as to extend the connectors between the internal and external surfaces of the partition as much as possible. These elements are structurally necessary because they are designed to increase the load capacity and stiffness of the product. On the other hand, extending these sections can significantly reduce the occurrence of thermal bridges resulting from intensive heat conduction through the carrier material, which has low insulating properties. Table 4 presents the eight author’s concepts of the geometry of the vertical partition. Each of the analyzed solutions was characterized by the same overall dimensions (1000 mm × 700 mm × 430 mm) and the same path thickness of 30 mm. The visualizations were supplemented with information on the volumetric share of the load-bearing material in the analyzed samples.

Table 4. Visualization of variants of the analyzed geometries of the vertical partition with information on the volume fraction of the load-bearing material.

Samples Designation	Projection	Cross-Section	Cross-Section, Parallel to Wall Surface	Volume Fraction of Load-Bearing Material in the Sample
Variant 1				35%
Variant 2				34%
Variant 3				35%

Table 4. Cont.

Samples Designation	Projection	Cross-Section	Cross-Section, Parallel to Wall Surface	Volume Fraction of Load-Bearing Material in the Sample
Variant 4				34%
Variant 5				39%
Variant 6				33%
Variant 7				43%
Variant 8				43%

In the first concept, the reinforcement printed between the external and internal sides of the partition takes the shape of a triangle, which is filled with insulating material. These fasteners are set at an angle of 65 degrees to the external surfaces. In the second concept, the geometry of the printed reinforcement adopts a shape similar to that of concept 1, while roundings have been additionally used to optimize the movement of the printing head and increase the length of joining the extreme surfaces. The reinforcement path has been tangentially connected to the path of the outer surfaces. The third and fourth concepts

correspond, respectively, to the first and second variants in terms of cross-section. In a section parallel to the outer surface, however, the partitions change their arrangement at an angle of 70 degrees to the base. Such geometry is made by shifting each of the layers of the printed reinforcement perpendicularly to the direction of component growth. A visualization of the differences between these geometries was presented in Table 2 in the column “cross-section parallel to the external surface of the partition” for variants 3 and 4. The fifth concept consists of a strongly corrugated filling, which was created on the basis of externally tangential circles with a diameter of 200 mm. The intention of this concept was to maximize the length of the heat flow path through the carrier material. In concept 6, from the inside of the building, a rectangular filling was designed to cover 30% of the width of the partition, and the reinforcement structure from the outside takes the shape of a triangle. Concepts 7 and 8 consist of two equal-sized chambers, each with a triangular geometry. However, in concept 7 the triangles are arrayed and in concept 8 they are mirrored.

Due to the fact that the process of producing partitions in the 3DCP technology will take place in a vertical orientation, the FDM models were printed in a similar way (Figure 2).

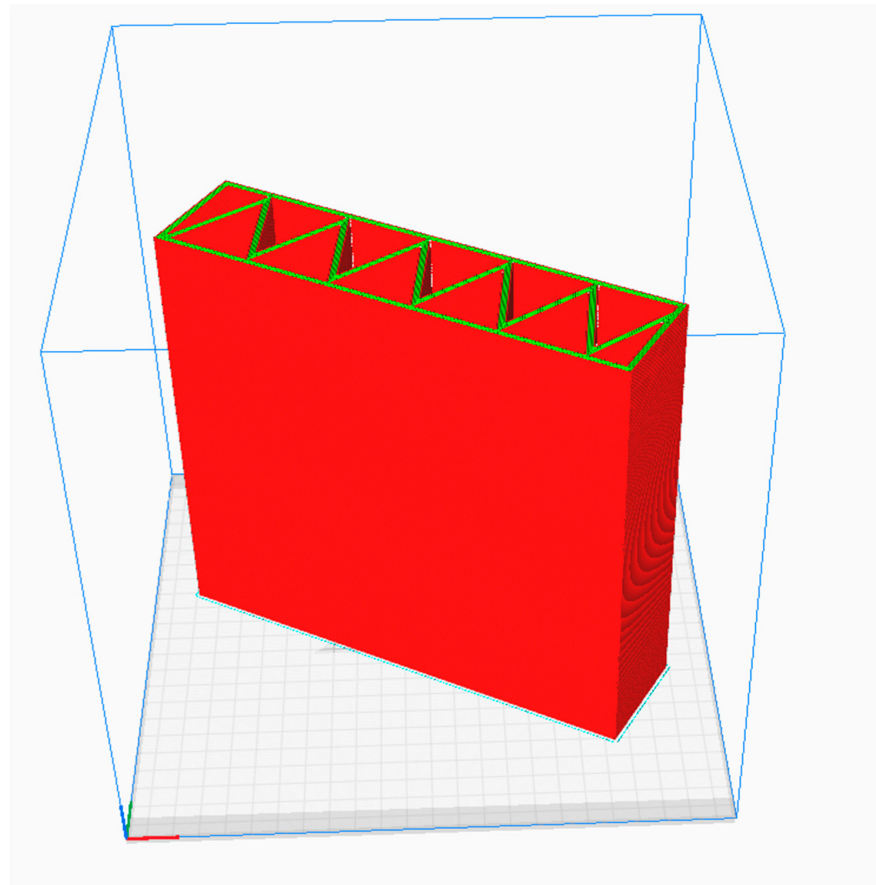


Figure 2. Orientation of the building partition during printing in FDM technology—preview of the program for preparing the printing process.

Examples of samples calibrated and printed with PLA are shown in Figure 3. The printed samples were filled with an insulating material, i.e., expanded PUR foam. The effect of the produced samples was shown in Figure 3.

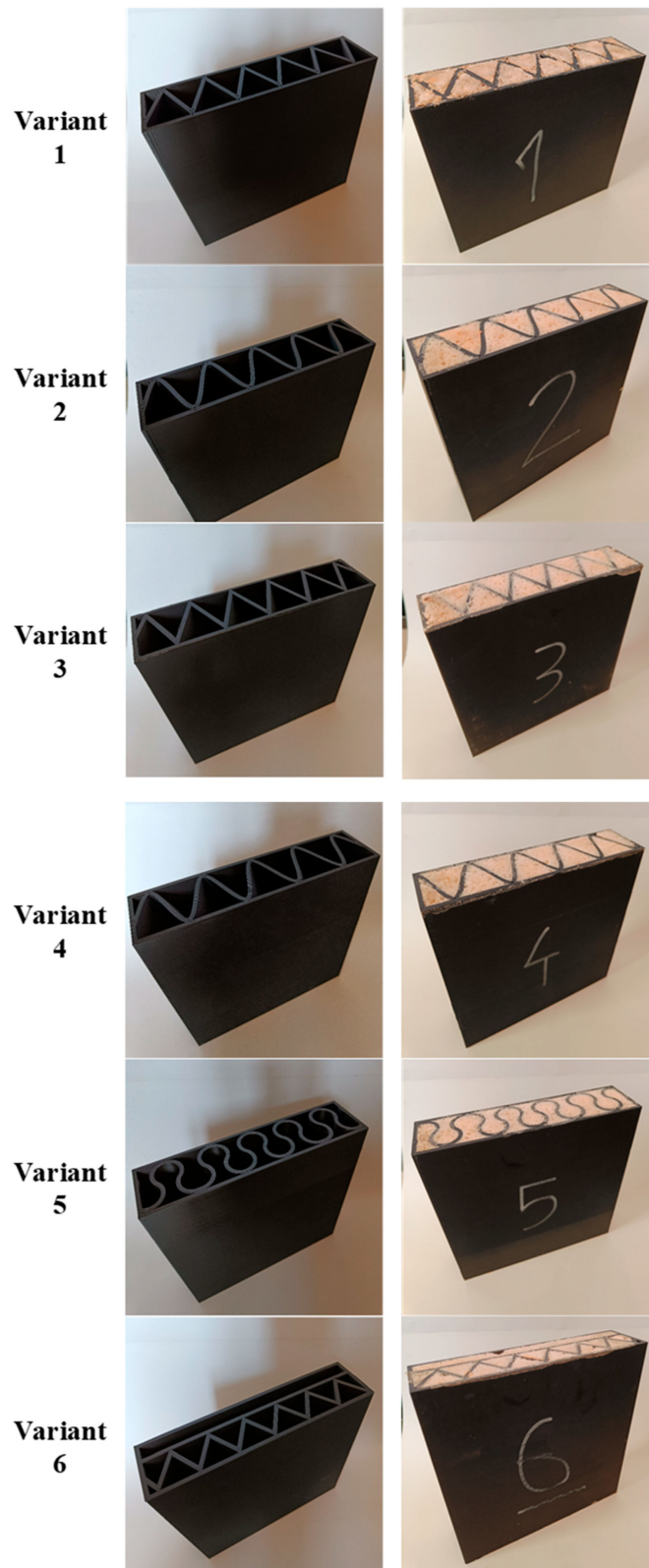


Figure 3. Cont.

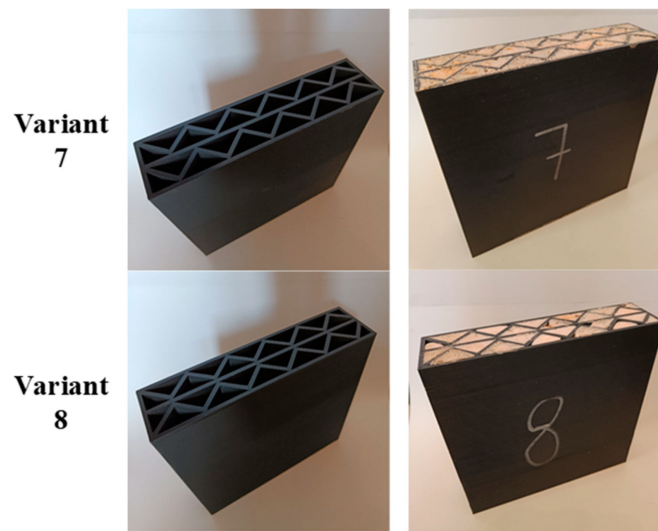


Figure 3. View of variants of partitions printed in FDM printing technology from PLA (left) and samples ready for testing after filling with insulating material—PUR foam (right).

3.1. Thermal Simulation Analysis

FEM computer thermal simulation allowed to obtain the distribution of heat flow values in the space of the analyzed sample. The analyses were performed with the assumption that the load-bearing material was concrete (Figure 4) or PLA (Figure 5). If a point or space of the obtained simulation was closer to red, it meant a greater heat flow (energy loss) in this place of the sample. On the other hand, if the color was closer to navy blue, the less heat flow occurred, which means more effective insulation.

Based on the obtained simulation results, it was possible to visualize and indicate the exact locations of thermal bridges. PUR foam, as an insulating material, resists the flow of heat in a very effective way. Therefore, in the developed variants of the partition geometry, it was crucial to make the most of its advantages and to reduce the occurrence of thermal bridges as much as possible. Due to this, it was important to obtain the longest heat flow path through the carrier material. For each simulated concept, the average heat flow through the outer and inner sides of the partition was determined, and then the arithmetic mean was calculated from them. The results of the calculations were summarized and presented in Table 5.

Table 5. Values of heat flow depending on the geometry of the tested partitions and the type of carrier material.

Variant No.	Concrete		PLA	
	Avg. Heat Flux $Hf_{AVG,C}$ (W/m ²)	Thermal Transmittance of Wall Systems U_C (W/m ² K)	Avg. Heat Flux $Hf_{AVG,P}$ (W/m ²)	Thermal Transmittance of Wall Systems U_P (W/m ² K)
1	6.289	0.3145	2.451	0.1225
2	5.666	0.2833	2.370	0.1185
3	6.398	0.3199	2.492	0.1246
4	5.794	0.2897	2.431	0.1215
5	6.830	0.3415	2.639	0.1320
6	3.654	0.1827	2.096	0.1048
7	4.768	0.2384	2.321	0.1161
8	4.962	0.2481	2.354	0.1177

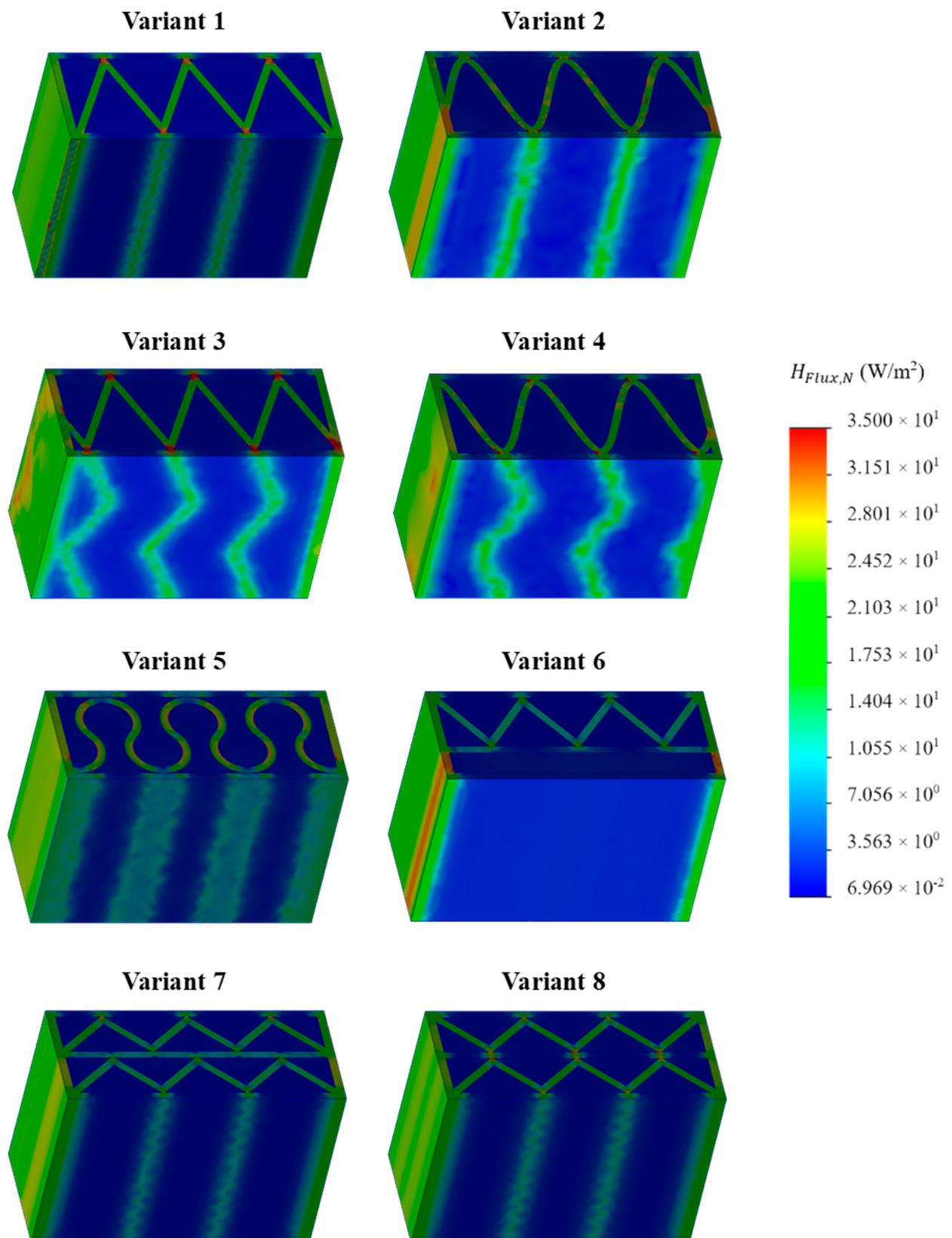


Figure 4. Results of thermal simulation of heat flow for individual variants of the tested samples, assuming that the load-bearing material was concrete.

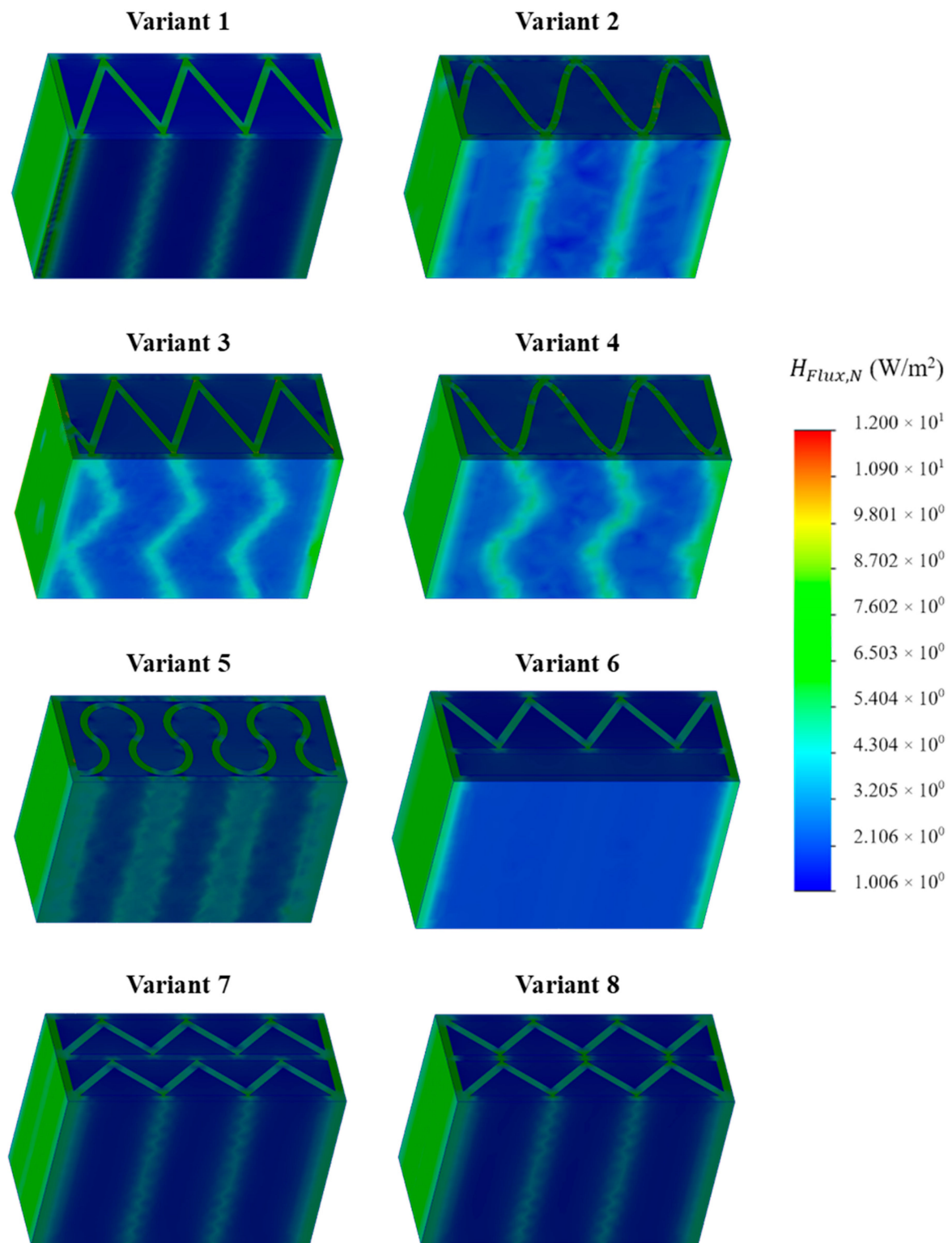


Figure 5. Results of thermal simulation of heat flow for individual variants of the tested samples, assuming that the load-bearing material was PLA.

On the basis of the obtained results, a significant difference in the heat flow, and thus also in the U-value, was found between the two analyzed material configurations. This effect was the result of a significant difference in the thermal insulation properties of both load-bearing materials, where the thermal conductivity coefficient for PLA is more than 70%

lower than for concrete. Ignoring this factor and focusing on the comparison and analysis of individual partition geometry variants, a visible and repeatable hierarchy of the analyzed solutions was found. Among the tested samples, the lowest heat transfer coefficient was obtained by concept no. 6, with the result of UC 0.1827 W/m²K for concrete and UP 0.1048 W/m²K in the configuration with PLA. The wall with a triangular filling with an additional narrow space filled with insulating material was certainly distinguished by the elimination of the connectors of the internal and external surface of the partition in part of the cross-section. Their absence limited the formation of thermal bridges, and thus limited losses. The essence of these loss sources was evident in the U-factor of the best variant, which was, respectively, 23% and 10% lower for concrete and PLA compared to the second-best result. Variant 6 was a geometric solution that most closely resembles the combination of a hollow brick and a layer of polystyrene known from conventional construction, with the advantage that in 3D printing technology, free spaces in the load-bearing zone can be insulated as part of one automatic process. Analyzing further simulation results, the second-best geometrical concept in terms of thermal insulation was variant number 7, in which two rows of ribs with an extended distance between the extreme surfaces of the partition were used. The U-value for this variant was UC 0.2384 W/m²K and UP 0.1161 W/m²K, for concrete and PLA, respectively. These results are, respectively, 4 and 1.5% lower than concept no. 8, which also had two rows of ribs but had a shorter distance between the extreme surfaces—the difference was shown in Figure 6. The next results were for the pair of concepts 2 and 4. They were similar to each other in terms of the geometry of the cross-section, while in variant 4, an additional inclination of the walls along the increment of the partition was also used. This solution turned out to have a negative impact on the level of insulation. A similar situation occurred in the case of variants 1 and 3. In the conducted study, the lowest insulation parameters were obtained by variant no. 5, which obtained an almost twice as high coefficient in the variant with concrete and an almost 30% worse result in the PLA configuration.

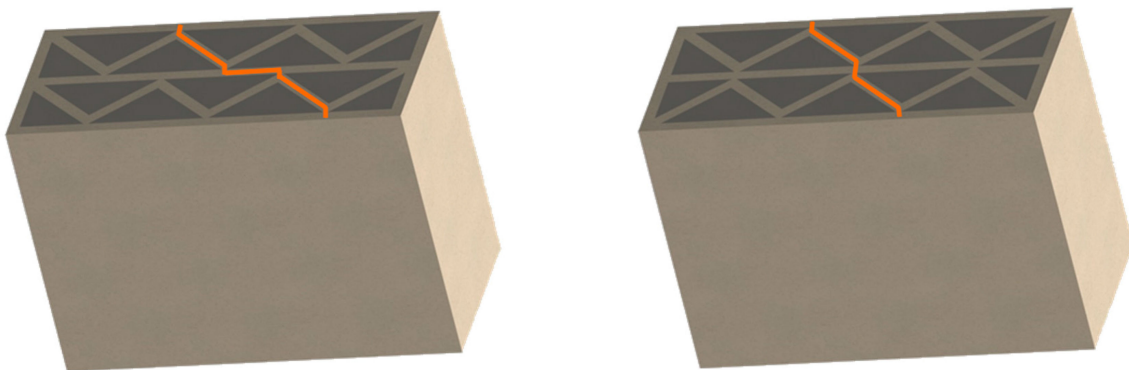


Figure 6. The distance along the load-bearing material between the inner and outer surface of the partition for variants 7 and 8. The orange line represents the shortest distance through the in-fill patterns.

3.2. Micro-Scale Wall Testing

The results of thermal resistance for all analyzed variants of the samples and the heat transfer coefficient U calculated on this basis (Equations (2) and (3)) were presented in Table 6. As in the case of simulation results, also in the verification test, the best results in terms of thermal insulation were obtained by samples designated as variant no. 6 and no. 7. The values of the U coefficient of these partitions reached high values, i.e., 0.899 and 1.038 W/m²K, respectively. However, the analyzed samples were only 50 mm thick, and this has a direct impact on the thermal resistance and thus the U parameter. Therefore, the

achievable U parameter was also estimated for a partition with a thickness of 430 mm, i.e., equal to that assumed in the computer simulation.

$$U = \frac{1}{R} \quad \left(\frac{W}{m^2K} \right) \quad (2)$$

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \left(\frac{m^2K}{W} \right) \quad (3)$$

where:

R —thermal resistance (m^2K/W),

d —thickness of the wall (m),

λ —thermal conductivity (W/mK).

Considering that the target wall will be much thicker, the U-value will oscillate around 0.10–0.14 W/m^2K . It should be noted that such coefficient values, although they prove a high degree of thermal insulation, will not be able to be obtained in the final implementations, due to the PLA material used. However, these results can be used to verify the simulation.

Table 6. Thermal resistance, thermal conductivity, and thermal transmittance of samples depending on the tested variant of partition geometry.

Version No.	Thermal Resistance R (m^2K/W)	Thermal Conductivity λ (W/mK)	Thermal Transmittance of Wall Systems U_T (W/m^2K)	Thermal Transmittance of Wall Systems U_T (Wall Thickness 430 mm) (W/m^2K)
1	0.8578	0.0584	1.168	0.1358
2	0.9050	0.0555	1.109	0.1290
3	0.8593	0.0586	1.171	0.1362
4	0.8915	0.0563	1.126	0.1309
5	0.8642	0.0579	1.158	0.1347
6	1.1391	0.0449	0.899	0.1045
7	0.9636	0.0519	1.038	0.1207
8	0.8671	0.0579	1.158	0.1347

In order to compare the results obtained from the simulation with the experimental data, the values of the U parameter were summarized and presented in Figure 7. On the basis of the analysis of the obtained results, it was generally found that the simulations were consistent with the measurements and that the sequence of individual variants was maintained in terms of their thermal insulation properties.

The results of the thermal measurements carried out also showed some differences in relation to computer calculations. The position of the result of variant no. 5 and variant no. 8 changed significantly, while the sequence of variants showing the best thermal insulation results was maintained (Table 7). The order in variants 1–4 was similarly maintained, where the effect of no increase in the thermal insulation of the samples was confirmed with the introduction of the inclination along their increment during printing.

Based on the results of the heat transfer coefficient through the proposed variants of partitions, a significant difference in its value was found depending on the geometry of the sample. The trends of the tested geometries were maintained regardless of the type of material used (Figure 8). Moreover, a decrease in the U-factor was observed for variant no. 7 and no. 8, despite the higher share of the load-bearing material necessary to make these geometries.

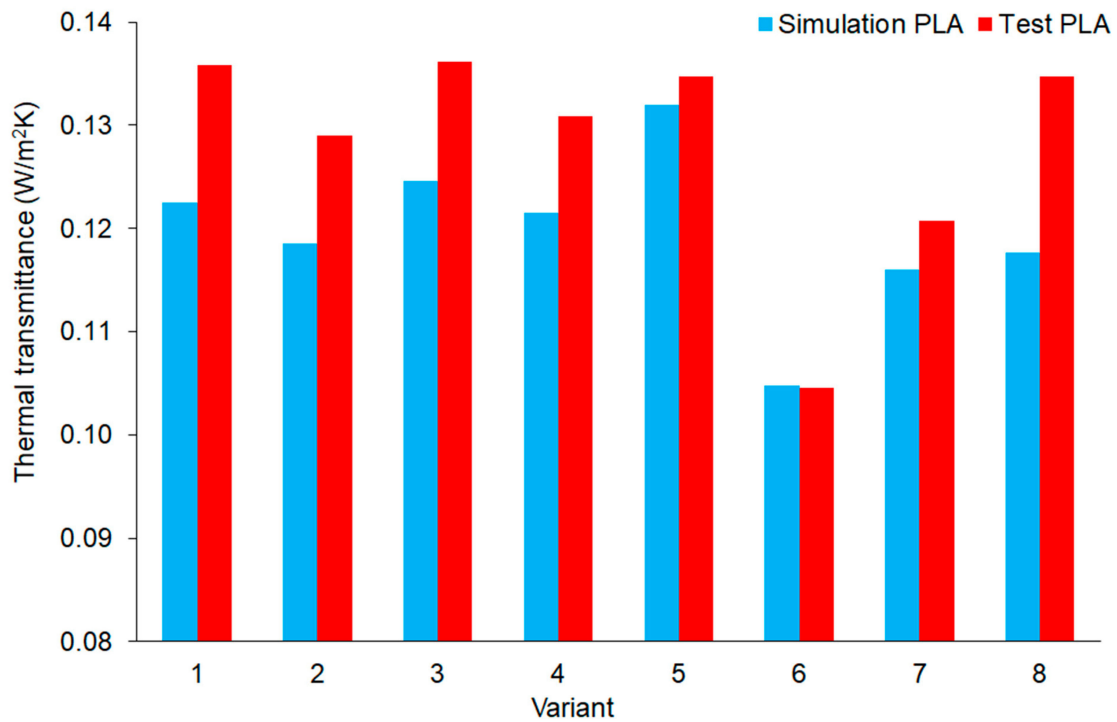


Figure 7. Comparison of computer simulation results and recorded results from thermal measurements, depending on the tested variant of the sample geometry, for the load-bearing material PLA.

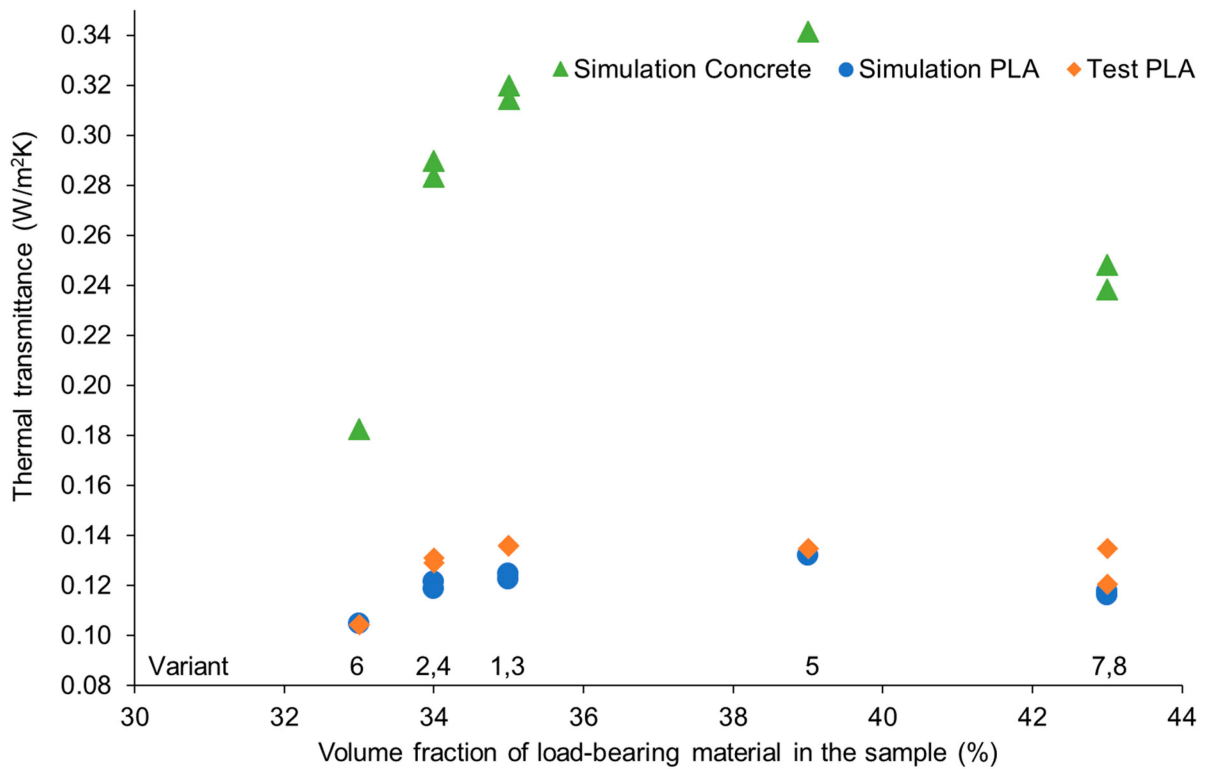


Figure 8. Heat transfer coefficient (measured or determined on the basis of simulation) depending on the type and volumetric share of the load-bearing material and the geometry of the analyzed partition.

Table 7. Comparison of U-factor order recorded from the thermal measurements and obtained from computer simulation depending on the tested variant of the sample geometry, and the load-bearing materials. The green color represents the best results in each category, while the more red the shade, the weaker the results in each category.

Variant No.	Simulation Concrete	Simulation PLA	Test PLA
Variant 1	6	6	7
Variant 2	4	4	3
Variant 3	7	7	8
Variant 4	5	5	4
Variant 5	8	8	5
Variant 6	1	1	1
Variant 7	2	2	2
Variant 8	3	3	6

4. Conclusions

The internal geometries of the walls described in this article have a high potential for use in the construction industry for the production of building partitions. The properties of 3D printing technology and the vast possibilities it offers in terms of customization suggest it can be used for the automatic production of walls with parameters that meet the requirements of construction standards.

The results of the study clearly indicate that the internal geometry of the partition has an impact on thermal insulation. The geometrical concept of the investigated partitions was designed in such a way as to extend the connections between the internal and external surfaces of the partition to maximize the length of the thermal bridge and therefore improve the thermal insulation of the wall. During the computer simulation, eight samples made of the same materials (concrete + PUR foam) and with the same external dimensions (1000 × 700 × 430 mm) with the difference in the in-fill pattern were analyzed. Scaled samples, made of PLA as a load-bearing material + PUR foam as insulation, were used for the experiment. The results showed a difference of 61% between the specimen with the highest and the lowest value of the heat transfer coefficient U for the simulation and 23% for the values achieved during the investigation.

Experimental verification of simulation studies confirmed the potential of the considered variants of partitions, marked with numbers 6 and 7, in terms of thermal insulation. The heat transfer coefficient U for variant number 6, where concrete was used as the load-bearing material, was 0.183 W/m²K. The geometry of such partition meets the construction requirements for thermal insulation, the limit value of which is 0.2 W/m²K.

The obtained results also confirm the correctness of using simulation as a tool for initial analysis and narrowing down the number of tested variants of samples in subsequent iterations of research.

The continuation of the results presented in this work will be the analysis of a selected variant of the partition geometry in full scale, made by 3DCP from materials adapted to the production of building elements. In addition, an important issue will also be the development of research on the simulation and verification of building structures in terms of mechanical strength, which is very important in the construction sector. Obtaining an advanced tool for the initial and comprehensive computer analysis of building elements will translate into the possibility of verifying complex versions of such elements at the design stage, and this will strengthen the competitiveness and potential of 3DCP technology.

Author Contributions: Conceptualization, P.D., M.M., M.G. and M.H.; Data curation, M.G., K.P. and M.H.; Formal analysis, P.D., M.G., M.R., K.P. and M.H.; Funding acquisition, M.H.; Investigation, P.D., M.M. and K.P.; Methodology, M.M., M.G., M.R., K.P. and M.H.; Project administration, M.H.; Resources, M.G. and M.H.; Software, P.D. and M.M.; Supervision, M.H.; Validation, M.H.; Visualization, P.D., M.M., M.R. and M.H.; Writing—original draft, P.D., M.M. and M.H.; Writing—review and editing, P.D., M.M. and M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been supported by the Ministry of Education and Science within the program “Implementation Doctorate”.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Nie, J.; Xu, X.; Yue, X.; Guo, Q.; Zhou, Y. Less is more: A strategic analysis of 3D printing with limited capacity. *Int. J. Prod. Econ.* **2023**, *258*, 108816. [[CrossRef](#)]
2. Freund, C.; Mulabdic, A.; Ruta, M. Is 3D printing a threat to global trade? The trade effects you didn't hear about. *J. Int. Econ.* **2022**, *138*, 103646. [[CrossRef](#)]
3. Chen, Z.; Han, Y.; Cai, P.; Mo, X.; Zhang, Y.; Wu, J.; Sun, B. Application of gel suspension printing system in 3D bio-printing. *Mater. Lett.* **2023**, *341*, 134235. [[CrossRef](#)]
4. Ma, G.; Buswell, R.; da Silva, W.R.L.; Wang, L.; Xu, J.; Jones, S.Z. Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cem. Concr. Res.* **2022**, *156*, 106774. [[CrossRef](#)]
5. Sun, J.; Xiao, J.; Li, Z.; Feng, X. Experimental study on the thermal performance of a 3D printed concrete prototype building. *Energy Build.* **2021**, *241*, 110965. [[CrossRef](#)]
6. Marczyk, J.; Ziejewska, C.; Gądek, S.; Korniejenko, K.; Łach, M.; Góra, M.; Kurek, I.; Doğan-Sağlamtimur, N.; Hebda, M.; Szechyńska-Hebda, M. Hybrid Materials Based on Fly Ash, Metakaolin, and Cement for 3D Printing. *Materials* **2021**, *14*, 6874. [[CrossRef](#)]
7. Hager, I.; Maroszek, M.; Mróz, K.; Kęsek, R.; Hebda, M.; Dvorkin, L.; Marchuk, V. Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials* **2022**, *15*, 4112. [[CrossRef](#)]
8. Bhattacharjee, S.; Basavaraj, A.S.; Rahul, A.; Santhanam, M.; Gettu, R.; Panda, B.; Schlangen, E.; Chen, Y.; Copuroglu, O.; Ma, G.; et al. Sustainable materials for 3D concrete printing. *Cem. Concr. Compos.* **2021**, *122*, 104156. [[CrossRef](#)]
9. Kurek, I.; Florek, E.; Gozdur, W.; Ziejewska, C.; Marczyk, J.; Łach, M.; Korniejenko, K.; Duży, P.; Chojińska, M.; Szechyńska-Hebda, M.; et al. Foamed Eco-Geopolymer Modified by Perlite and Cellulose as a Construction Material for Energy-Efficient Buildings. *Energies* **2022**, *15*, 4297. [[CrossRef](#)]
10. Perkins, I.; Skitmore, M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *Int. J. Constr. Manag.* **2015**, *15*, 1–9. [[CrossRef](#)]
11. Wu, Y.; Lu, B.; Bai, T.; Wang, H.; Du, F.; Zhang, Y.; Cai, L.; Jiang, C.; Wang, W. Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *224*, 930–949. [[CrossRef](#)]
12. Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. Sustainable cement production—Present and future. *Cem. Concr. Res.* **2011**, *41*, 642–650. [[CrossRef](#)]
13. Yan, B.; Duan, P.; Ren, D. Mechanical strength, surface abrasion resistance and microstructure of fly ash-metakaolin-sepiolite geopolymer composites. *Ceram. Int.* **2017**, *43*, 1052–1060. [[CrossRef](#)]
14. Ziejewska, C.; Marczyk, J.; Korniejenko, K.; Bednarsz, S.; Sroczyk, P.; Łach, M.; Mikula, J.; Figiela, B.; Szechyńska-Hebda, M.; Hebda, M. 3D Printing of Concrete-Geopolymer Hybrids. *Materials* **2022**, *15*, 2819. [[CrossRef](#)]
15. Abrão, P.C.R.; Cardoso, F.A.; John, V.M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *247*, 118546. [[CrossRef](#)]
16. Ferreira, E.G.A.; Yokaichiya, F.; Rodrigues, M.S.; Beraldo, A.L.; Isaac, A.; Kardjilov, N.; Franco, M.K. Assessment of Greener Cement by employing thermally treated sugarcane straw ashes. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *141*, 343–352. [[CrossRef](#)]
17. Singh, N.; Middendorf, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *237*, 117455. [[CrossRef](#)]
18. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Compos. Part B Eng.* **2018**, *143*, 172–196. [[CrossRef](#)]
19. Marczyk, J.; Ziejewska, C.; Pławecka, K.; Bał, A.; Łach, M.; Korniejenko, K.; Hager, I.; Mikula, J.; Lin, W.-T.; Hebda, M. Optimizing the L/S Ratio in Geopolymers for the Production of Large-Size Elements with 3D Printing Technology. *Materials* **2022**, *15*, 3362. [[CrossRef](#)]

20. Cuevas, K.; Strzałkowski, J.; Kim, J.-S.; Ehm, C.; Glotz, T.; Chougan, M.; Ghaffar, S.H.; Stephan, D.; Sikora, P. Towards development of sustainable lightweight 3D printed wall building envelopes—Experimental and numerical studies. *Case Stud. Constr. Mater.* **2023**, *18*, e01945. [[CrossRef](#)]
21. Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B. Particle-bed 3D printing in concrete construction—Possibilities and challenges. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *112*, 50–65. [[CrossRef](#)]
22. Berardi, U.; Sprengard, C. An overview of and introduction to current researches on super insulating materials for high-performance buildings. *Energy Build.* **2020**, *214*, 109890. [[CrossRef](#)]
23. Regulation of the Minister of Infrastructure and Construction of November 14, 2017 Amending the Regulation on Technical Conditions to Be Met by Buildings and Their Location. Journal of Laws of 2017, Item 2285. Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20170002285> (accessed on 21 August 2023).
24. Kaszynka, M.; Olczyk, N.; Techman, M.; Skibicki, S.; Zielinski, A.; Filipowicz, K.; Wroblewski, T.; Hoffmann, M. Thermal-Humidity Parameters of 3D Printed Wall. *IOP Conf. Series Mater. Sci. Eng.* **2019**, *471*, 082018. [[CrossRef](#)]
25. Nguyen-Van, V.; Li, S.; Liu, J.; Nguyen, K.; Tran, P. Modelling of 3D concrete printing process: A perspective on material and structural simulations. *Addit. Manuf.* **2023**, *61*, 103333. [[CrossRef](#)]
26. Prasittisopin, L.; Pongpaisanseree, K.; Jiramarootapong, P.; Snguanay, C. Thermal and Sound Insulation of Large-Scale 3D Extrusion Printing Wall Panel. In Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Online, 6–9 July 2020; Bos, F., Lucas, S., Wolfs, R., Salet, T., Eds.; Springer: Cham, Switzerland; Volume 28, RILEM Bookseries. [[CrossRef](#)]
27. Suntharalingam, T.; Upasiri, I.; Nagaratnam, B.; Poologanathan, K.; Gatheeshgar, P.; Tsavdaridis, K.D.; Nuwanthika, D. Finite Element Modelling to Predict the Fire Performance of Bio-Inspired 3D-Printed Concrete Wall Panels Exposed to Realistic Fire. *Buildings* **2022**, *12*, 111. [[CrossRef](#)]
28. Prasittisopin, L.; Jiramarootapong, P.; Pongpaisanseree, K.; Snguanay, C. Lean Manufacturing and Thermal Enhancement of Single-Layered Wall of Additive Manufacturing (AM) Structure. *Zkg Int.* **2019**, *4*, 64–74.
29. Alami, A.H.; Olabi, A.G.; Ayoub, M.; Aljaghoub, H.; Alasad, S.; Abdelkareem, M.A. 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. *Buildings* **2023**, *13*, 924. [[CrossRef](#)]
30. ISO 6946; Building Components and Building Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Calculation Methods. ISO: Geneva, Switzerland, 2017.
31. De Rubeis, T.; Evangelisti, L.; Guattari, C.; De Berardinis, P.; Asdrubali, F.; Ambrosini, D. On the influence of environmental boundary conditions on surface thermal resistance of walls: Experimental evaluation through a Guarded Hot Box. *Case Stud. Therm. Eng.* **2022**, *34*, 101915. [[CrossRef](#)]
32. Anton, A.; Reiter, L.; Wangler, T.; Frangez, V.; Flatt, R.J.; Dillenburger, B. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. *Autom. Constr.* **2021**, *122*, 103467. [[CrossRef](#)]
33. Tuvayanond, W.; Prasittisopin, L. Design for Manufacture and Assembly of Digital Fabrication and Additive Manufacturing in Construction: A Review. *Buildings* **2023**, *13*, 429. [[CrossRef](#)]
34. Lao, W.; Li, M.; Tjahjowidodo, T. Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing. *Addit. Manuf.* **2021**, *37*, 101638. [[CrossRef](#)]
35. Karcz, J.; Kacperski, Ł. An effect of grid quality on the results of numerical simulations of the fluid flow field in an agitated vessel. In Proceedings of the 14th European Conference on Mixing, Warszawa, Poland, 10–13 September 2012.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Kraków, 22.09.2025

OŚWIADCZENIE - PUBLIKACJA 3

Oświadczam, iż mój wkład w powstanie publikacji pt.: „*Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation*” opublikowanej w czasopiśmie *Materials* w 2023 roku, nr DOI 10.3390/ma16175772 jest zgodny z informacją zawartą w poniższej tabeli.

Jednocześnie oświadczam, iż wyrażam zgodę na wykorzystanie wyżej wymienionej publikacji jako części rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka.

Imię i nazwisko współautora	Wkład w powstanie publikacji
Paweł Dziura	Sformułowanie problemu badawczego. Przygotowanie i obsługa narzędzi obliczeniowych oraz oprogramowania do symulacji i opracowania wyników. Planowanie i realizacja badań obejmujących wytwarzanie oraz ocenę wariantów wypełnienia. Wykonanie próbek w technologii druku 3D w celu weryfikacji doświadczalnej w skali. Analiza wyników i przygotowanie wizualizacji próbek do badań doświadczalnych. Współautorstwo wstępnej wersji manuskryptu oraz udział w jego redakcji.
Marcin Maroszek	Sformułowanie problemu badawczego oraz opracowanie metodyki postępowania badawczego. Przygotowanie i obsługa oprogramowania wspierającego obliczenia i analizę danych. Obsługa oprogramowania do projektowania graficznego testowanych geometrii. Wsparcie w doborze parametrów do przeprowadzenia symulacji komputerowej, w tym warunków brzegowych oraz typu i rozmiaru siatki. Realizacja badań oraz interpretacja uzyskanych wyników. Przygotowanie materiałów graficznych i współautorstwo wstępnej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu i redakcji ostatecznej wersji manuskryptu.
Mateusz Góra	Sformułowanie problemu badawczego i metodyki badań. Zapewnienie i organizacja zasobów niezbędnych do realizacji prac. Analiza wyników oraz współautorstwo w przygotowaniu materiałów pomocniczych.
Magdalena Rudziewicz	Dobór metodyki i wsparcie merytoryczne w zakresie doboru procedur badawczych. Wsparcie w analizie wyników.

Kinga Setlak (Pławecka)	Udział w realizacji doświadczeń, w tym przygotowaniu próbek i archiwizacji danych. Wsparcie w analizie wyników.
Marek Hebda	Sformułowanie problemu badawczego i metodyki badań. Zapewnienie zasobów oraz koordynacja i organizacja prac badawczych. Nadzór merytoryczny oraz walidacja przyjętych rozwiązań i uzyskanych rezultatów. Pozyskanie finansowania na realizację badań oraz opłatę kosztów publikacyjnych. Współautorstwo w pisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.



.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Paweł Dziura



.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Magdalena Rudziewicz



.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Marcin Maroszek



.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Kinga Setlak



.....
podpis oświadczającego
dr inż. Mateusz Góra



.....
podpis oświadczającego
dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK

Article

Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing

Marcin Maroszek ¹, Magdalena Rudziewicz ¹, Karina Rusin-Żurek ¹, Izabela Hager ² and Marek Hebda ^{1,*}

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; marcin.maroszek@doktorant.pk.edu.pl (M.M.); magdalena.rudziewicz@doktorant.pk.edu.pl (M.R.); karina.rusin-zurek@pk.edu.pl (K.R.-Ż.)

² Chair of Building Materials Engineering, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; izabela.hager@pk.edu.pl

* Correspondence: marek.hebda@pk.edu.pl

Abstract

Three-dimensional concrete printing (3DCP) is advancing rapidly, yet its sustainable adoption requires alignment with circular-economy principles. This study evaluates the substitution of natural aggregates with recycled constituents, 3DCP waste, brick debris, glass cullet, mixed rubble, fly ash, and slag, and the use of lightweight fillers (expanded perlite, lightweight expanded clay aggregate (LECA), and expanded polystyrene (EPS)) to reduce density and improve insulation. Key properties, such as particle-size distribution, printability, mechanical performance, thermal conductivity, and water absorption, were determined. Results indicate that grading strongly affected mixture behavior. Narrow distributions (fly ash, milled 3DCP waste) enhanced extrudability, while broader gradings (glass, rubble, slag) increased water demand and extrusion risks. Despite these differences, all systems remained within the printable window: flow spread decreased with most recycled additions (lowest for brick) and increased with glass. Mechanical responses were composition-dependent. Flexural strength typically decreased. Compressive strength benefited from broader gradings, with replacement levels up to ~6% enhancing strength due to improved packing. Loading anisotropy typical of 3DCP was observed, with perpendicular compressive strength reaching up to 13% higher values than parallel loading. Lightweight fillers significantly reduced thermal conductivity. LECA provided the best compromise between strength and insulation, perlite showed intermediate behavior, and EPS achieved the lowest thermal conductivity but induced significant strength penalties due to weak matrix-EPS interfaces. Water absorption decreased in recycled-aggregate mixes, whereas lightweight systems, particularly with perlite, retained higher uptake. The results demonstrate that non-reactive recycled aggregates and lightweight insulating fillers can be successfully integrated into extrusion-based 3DCP without compromising printability.

Keywords: 3D concrete printing (3DCP); recycled aggregates; lightweight additives; insulating additives; sustainable construction; circular economy; carbon footprint; thermal conductivity



Academic Editors: Swee Leong Sing, Ali Ghasemi and Jinlong Su

Received: 1 September 2025

Revised: 15 September 2025

Accepted: 17 September 2025

Published: 19 September 2025

Citation: Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Rusin-Żurek, K.; Hager, I.; Hebda, M. Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing. *Materials* **2025**, *18*, 4387. <https://doi.org/10.3390/ma18184387>

Copyright: © 2025 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The construction sector is an energy-intensive and emissions-intensive branch of industry, within which the cement industry remains the key contributor. Emission sources in this sector are distributed as follows: approximately 60% of total emissions are process

emissions resulting from limestone calcination (thermal decomposition of CaCO_3 to CaO , inevitably accompanied by CO_2 release) [1]. The remaining 40% originates mainly from fuel combustion required to achieve kiln operating temperatures. In addition, indirect emissions associated with electricity consumption account for about 6% of total CO_2 output; consequently, fuel combustion contributes ~34% and electricity ~6% of total emissions [2–4].

Recent analyses indicate that in 2023, the environmental footprint of the EU-27 cement sector was characterized by a production volume of 161.1 Mt and a consumption level of 150.8 Mt (≈ 336 kg per capita), in comparison to a global output of approximately 4.03 Gt [5]. In extra-EU trade, cement and clinker imports to the Union totaled 9.3 Mt, with Turkey (35.8%), Algeria (19.2%), and Ukraine (12.6%) representing the principal sources [6]. Current emission-intensity indicators for the EU-27 (direct emissions: fuel + process; excluding electricity) indicate ~ 0.58 t CO_2 per t of cement products (2022) and ~ 0.81 – 0.84 t CO_2 per t of clinker (2022) [5]. Applying these intensities to 2023 production yields on the order of ~ 93.9 Mt CO_2 ($161.1 \text{ Mt} \times 0.583 \text{ t CO}_2/\text{t}$) for cement and ~ 99 – 103 Mt CO_2 attributable to the clinker share in that cement, under a conservative assumption of a clinker-to-cement ratio of 0.758 (EU average, 2022; without adjusting for clinker trade) [7,8].

In response to these conditions and regulatory pressure, the cement industry increasingly substitutes conventional raw materials—primarily limestone—with secondary materials derived from industrial and post-consumer waste streams. These inputs supply the requisite oxides (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) and include, among others, fly ash (FA) from alternative-fuel combustion, metallurgical slags, dewatered sewage sludge, fine recycled aggregates from crushed concrete, and selected fractions of construction and demolition waste (CDW) [9–11]. A key advantage is their often pre-decarbonated nature, which can substantially reduce process-related CO_2 emissions during clinker manufacture.

Within the circular-economy paradigm, interest is growing not only in valorizing industrial by-products but also in incorporating CDW fractions into formulations intended for three-dimensional concrete printing (3D concrete printing, 3DCP). Recycled components in this group include, *inter alia*, recycled fine aggregate (RFA), ground brick waste (GBW), recycled concrete aggregate (RCA), and recycled clay brick waste (RCBW). Numerous studies have demonstrated their applicability as partial or complete substitutes for natural aggregates [12]. With appropriate preparation, comprising crushing, screening, and, where necessary, surface modification, demolition-derived fractions can replace aggregates without compromising the key mechanical and rheological parameters required in additive manufacturing systems [13]. In practice, successful implementation requires not only feed-stock preparation but also control of fines content, cleanliness (removal of contaminants and adhered mortar), and shaping of the grading curve to limit segregation and ensure stable layer-by-layer deposition [13]. GBW deserves particular attention because it combines a filler effect with pozzolanic activity; this material can support strength development and durability of printed elements while diverting waste from landfills [12].

The importance of microstructure and particle geometry in 3DCP mix design has been emphasized by Ivanova and Mechtcherine: particle-size distribution, specific surface area, and grain morphology significantly govern yield stress, extrudability, and interlayer stability—parameters that determine the success of layer-by-layer deposition. This highlights the necessity of precise adjustment of particle texture and morphology, *e.g.*, surface roughness, which generally enhances thixotropy and improves shape retention upon nozzle extrusion. On the other hand, an excess of very fine fractions increases water demand and the risk of blockages within the feed and delivery system [14,15]. Accordingly, a printable mix design must balance fresh-state properties with a controlled rate of structural build-up over time.

Further experimental studies showed that incorporating RCA into fresh mixtures leads to time-dependent improvements in rheology. The yield stress of RCA-bearing mixtures increased exponentially, whereas the shear modulus rose linearly during the first 15 min after mixing. Notably, buildability, the ability of a mixture to maintain geometric stability during multi-layer printing, increased proportionally with RCA content. The observed trend can be attributed to RCA-induced modification of the water–binder equilibrium and accelerated structural build-up (SBU), which improves post-deposition filament stability. However, it also necessitates tighter control of superplasticizer dosage and mixing parameters to maintain extrusion continuity and avoid excessive flow resistance [16,17]. Moreover, partial replacement (30 wt%) of ordinary Portland cement (OPC) with recycled fines (<75 μm) sourced from RFA and RCBW has yielded cement pastes with rheological and mechanical properties suitable for additive manufacturing applications [18]. Incorporation of RFA into mortars significantly enhanced buildability: all tested mixes achieved 100% vertical stability, surpassing their cement-paste counterparts (96–98%). In contrast, mixtures containing RCBW exhibited elevated water demand, reflected by a higher liquid-to-solid (L/S) ratio of 0.42; this effect was attributed to the high porosity and absorptivity of brick-derived wastes.

As highlighted by Robayo-Salazar et al. [19], achieving an optimal balance between workability and buildability remains a central challenge in 3DCP mix design. A higher L/S increases flowability and facilitates extrusion but degrades the dimensional stability of deposited layers; a lower L/S favors shape retention and interlayer cohesion yet limits flow, potentially disrupting process continuity. Rheological analyses have shown that adding GBW markedly increases the apparent viscosity of fresh mixtures—particularly under static conditions—by reducing free water and increasing interparticle friction, while simultaneously raising yield stress. As a result, resistance to deformation and the geometric stability of extruded layers increase, which is critical in 3DCP applications where the material must retain its form without formwork. It has been demonstrated that increasing the GBW content delays both the initial and final setting; for instance, a 10% GBW substitution extended the setting time by approximately 10 min. Importantly, the same mixture achieved the highest 28-day compressive strength, registering a 12.4% increase relative to the control mix when tested perpendicular to the printed layers [20]. In another study [21] mixtures with recycled brick aggregate (RBA) attained compressive strengths of 23.75 MPa (parallel to layer depositions, D1) and 29.06 MPa (perpendicular to layer depositions, D3), representing decreases of ~14% and ~20%, respectively, relative to a conventional reference material for 3DCP. The achieved D1/D3 ratio of 0.82 indicated anisotropic behavior and weakened interlayer bonding, a typical limitation of layer-to-layer processes resulting from suboptimal cohesion at the layer interfaces. Despite the observed reduction in mechanical parameters, these results confirm the technical feasibility of incorporating ceramic recyclates into 3DCP mixtures. Further advances, through optimization of aggregate properties, grading classification, surface modifications, or tailored admixture systems, may broaden the application window for recycled components in additive construction while mitigating trade-offs in structural performance.

Complementing the strategy of using non-reactive additions are lightweight, insulating fractions in 3D-printable mixes, such as expanded perlite, lightweight expanded clay aggregate (LECA), and EPS beads. Their inclusion reduces bulk density and thermal conductivity, improving the thermal performance of building envelopes while maintaining extrudability [22–24]. In practice, this necessitates control of particle grading and morphology to mitigate segregation during extrusion, pre-wetting of porous lightweight aggregates to stabilize rheology, reduce water uptake, and provide an additional “internal curing” effect, as well as compensation for strength reductions through optimization of the liquid-

to-solid ratio, polycarboxylate ether (PCE) dosage, and fiber reinforcement [25,26]. As a spherical low-density filler, EPS can substantially lower thermal conductivity and density but, in the presence of insufficient matrix cohesion, may increase the risk of impaired interlayer bonding. Perlite and LECA typically improve buildability by raising apparent viscosity, yet they increase water absorption, which must be considered in admixture selection and curing. Consequently, properly engineered hybrid ‘structural–insulating’ mixtures can simultaneously satisfy printability requirements, extrudability, and shape stability, while enhancing the thermal performance of the wall [22–24].

Therefore, the present study investigates the physicochemical and performance-related properties of locally sourced waste materials and evaluates their possible applicability in 3DCP formulations. Mechanical properties, water absorption, and thermal conductivity of 3D-printed composites were determined. Particular focus was placed on potential recycled material use as non-reactive additions, both to stabilize the printing process and rheology, and to mitigate environmental impacts by reducing the consumption of natural aggregates and the landfilling of waste.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The reference mix was based on CEM I 52.5R Portland cement. The recipe was derived from the authors’ earlier work on 3DCP. Beyond meeting structural requirements, the mix needs to be designed to deliver the fresh-state properties essential for 3DCP: stable, continuous extrusion without clogging or segregation; dimensional stability after deposition (shape retention/buildability) sufficient to support subsequent layers without deformation or collapse; and high interlayer bond strength to ensure structural integrity and load transfer in the printed element. To meet these criteria, the composition was modified with a set of mineral additions and chemical admixtures. A set accelerator was used to shorten the time to early strength and stabilize freshly deposited layers. Rheology-controlling admixtures included a high-range water-reducing admixture (superplasticizer) and a viscosity-modifying agent (VMA) to balance flow with cohesion. Mineral fillers—most notably limestone powder and silica fume—were incorporated to tailor the cementitious matrix, increasing cohesion and effective surface area and thereby facilitating control over setting and hardening. The reference mix and all recycled additives were listed in Table 1.

Table 1. Composition and sample designation of the investigated mixtures incorporating recycled additives.

Specimens Designation	Base Components				Recycled Components				
	Cement CEM I	Quartz Sand	Additions	3D-Printed Waste	Glass	Mixed Waste	Brick	FA	GGBFS
(%)									
T2-1	25	65	10	-	-	-	-	-	-
T2-2	25	45	10	20	-	-	-	-	-
T2-3	25	45	10	-	20	-	-	-	-
T2-4	25	45	10	-	-	20	-	-	-
T2-5	25	45	10	-	-	-	20	-	-
T2-6	25	45	10	-	-	-	-	20	-
T2-7	25	45	10	-	-	-	-	-	20
T2-8	25	25	10	40	-	-	-	-	-
T2-9	25	25	10	-	40	-	-	-	-
T2-10	25	25	10	-	-	40	-	-	-
T2-11	25	25	10	-	-	-	40	-	-
T2-12	25	25	10	-	-	-	-	40	-
T2-13	25	25	10	-	-	-	-	-	40

2.1.1. Origin and Processing of Recycled Feedstocks

Secondary constituents were sourced from typical construction and demolition (C&D) contexts, where substantial waste streams arise. While part of this material can be reused on-site, most requires logistics and processing to enable circular use. The re-use of 3DCP base material (printing waste) was taken into consideration. Due to its relative homogeneity and the absence of embedded steel reinforcement in current 3DCP practice, such waste can be readily reprocessed, which constitutes a significant advantage in terms of material circularity. Additional C&D fractions included mixed rubble, brick waste, and glass cullet. Mixed rubble is prevalent after full demolitions as well as partial renovations; effective reuse requires removal of rebar, wiring, plumbing elements, and other contaminants. Brick waste is more typical of low-rise and older residential construction, while glass waste originates from windows and glazing. Industrial by-products from the energy sector were also assessed, namely fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). The FA used originated from PGE Combined Heat and Power Plant (Kraków, Poland), and the slag from the Bogdanka power plant (Poland). All secondary additives were subjected to reprocessing, which involved crushing in a ball mill (Pulverisette 6, Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Germany) followed by sieving through a 4 mm mesh. Fly ash, collected as a fine powder, did not require crushing. To reduce density and improve thermal performance, three lightweight insulating fillers were used: expanded perlite (≤ 2 mm), fine lightweight expanded clay aggregate (LECA, ≤ 4 mm), and EPS beads (3–4 mm).

2.1.2. Mix Compositions

The recycled constituents described above were incorporated at two replacement levels—20% and 40% by mass of the standard aggregate in the reference mix. For lightweight insulating fillers, three dosage levels were prepared to achieve progressively lower fresh densities; the highest dosage corresponded to the printability threshold for the equipment used. The full set of formulations investigated in this study is summarized in Table 1.

An additional set of formulations (Table 2) was developed by incorporating lightweight insulating fillers into the reference mixture, aiming to reduce the fresh density and partially replace the energy- and carbon-intensive reference material. These low-density mixtures are primarily intended for non-load-bearing applications (e.g., partition walls). Owing to their enhanced thermal performance, they may also be employed as infill in load-bearing wall systems, thereby providing an additional degree of thermal insulation.

Table 2. Composition and sample designation of the investigated mixtures with insulation additives.

Specimens Designation	Base Components			Low-Density Insulating Fillers		
	Cement CEM I	Quartz Sand	Additions	Expanded Perlite	Expanded Clay (LECA)	EPS
(%)						
T3-1	24.58	64.58	9.58	1.25	-	-
T3-2	24.17	64.17	9.17	2.5	-	-
T3-3	23.75	63.75	8.75	3.75	-	-
T3-4	23.42	63.42	8.42	-	4.75	-
T3-5	21.83	61.83	6.83	-	9.5	-
T3-6	19.47	59.47	4.47	-	16.6	-
T3-7	24.92	64.92	9.92	-	-	0.25
T3-8	24.83	64.83	9.83	-	-	0.5
T3-9	24.75	64.75	9.75	-	-	0.75

2.2. Methods

2.2.1. Particle Size Analysis

Particle size is critical to both rheology and processability in 3DCP. Grading, particle shape, and surface texture govern water demand as well as pumpability, extrudability, and buildability. Particle size distributions of the recycled fractions were measured using a laser-diffraction analyzer (Anton Paar PSA 1190D; Anton Paar GmbH, Graz, Austria) in accordance with ISO 13320:2020 [27]. Measurements were performed with wet dispersion in deionized water; sample preparation followed ISO 14887:2000 (Dispersing procedures for powders in liquids) [28]. The instrument's built-in ultrasonic dispersion module was operated continuously to suppress agglomeration and maintain a stable, homogeneous suspension. The measurable size range was 0.5–3500 μm . All measurements were performed in triplicate to ensure repeatability and data reliability. Data acquisition and analysis were carried out using the manufacturer's Kalliope software (version 2.22.1).

2.2.2. Mixture Preparation

Figure 1 outlines the workflow for recycled-feedstock reprocessing and mixture preparation. Recycled constituents were ground/milled for 6 h in a custom-built ball mill (charge volume \approx 10 L) (Figure 1; Step 1). Following milling, the materials were sieved through a 4 mm sieve (Figure 1; Step 2), corresponding to the maximum particle size permitted by the laboratory-scale 3D printers used in this study, as constrained by screw and pump-based material transport mechanisms. Batching was performed on a precision laboratory scale (\pm 0.1 g, capacity 20 kg). Mixing was carried out in a 20 L planetary mortar mixer (GEOLAB, Warsaw, Poland) following the protocol illustrated in Figure 1: dry (Figure 1; Step 3A) and liquid (Figure 1; Step 3B) constituents were premixed separately for 3 min and 30 s, respectively; the dry blend was then added to the liquid phase and mixed for an additional 5 min until a homogeneous mixture was obtained (Figure 1; Step 4). Prior to specimen fabrication, mixture consistency was verified by a flow-table test. Following consistency verification, specimens were printed using the 3D printer (Figure 1; Step 5). After 28 days of curing at 22 ± 2 °C, the printed elements were trimmed to the target dimensions (Figure 1; Step 6) and prepared for testing (Figure 1; Step 7).

2.2.3. Consistency Verification

Fresh-state consistency was assessed using the EN 1015-3 flow table test [29] (hand-operated apparatus; Figure 2). The standard truncated-cone mold was filled using a two-stage compaction procedure. After lifting the mold, the table was dropped 15 times. This method provides a small-sample indicator of printability by reflecting both extrudability and shape retention.

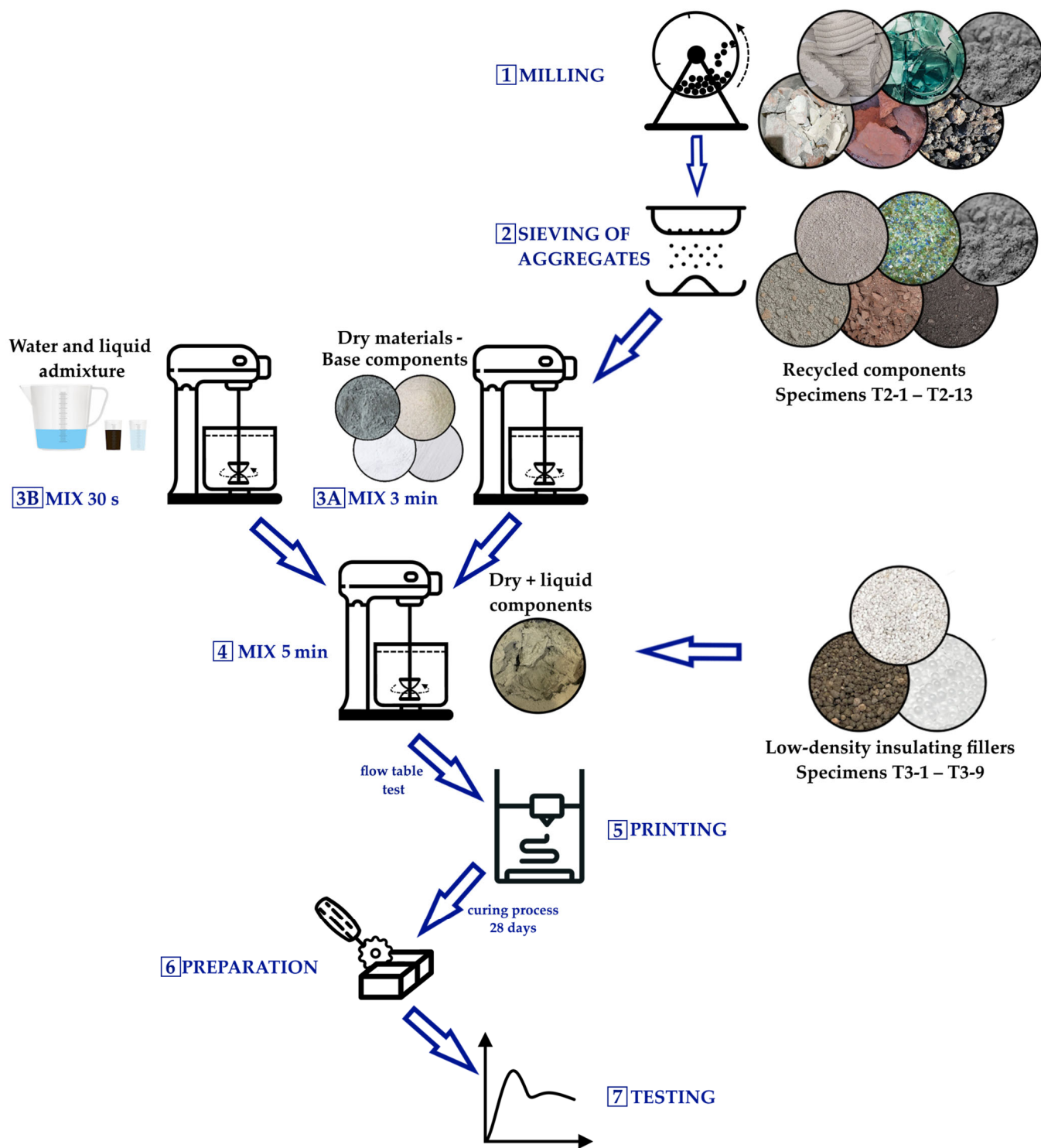


Figure 1. Schematic of the specimen preparation procedure for testing, covering steps 1 to 7.

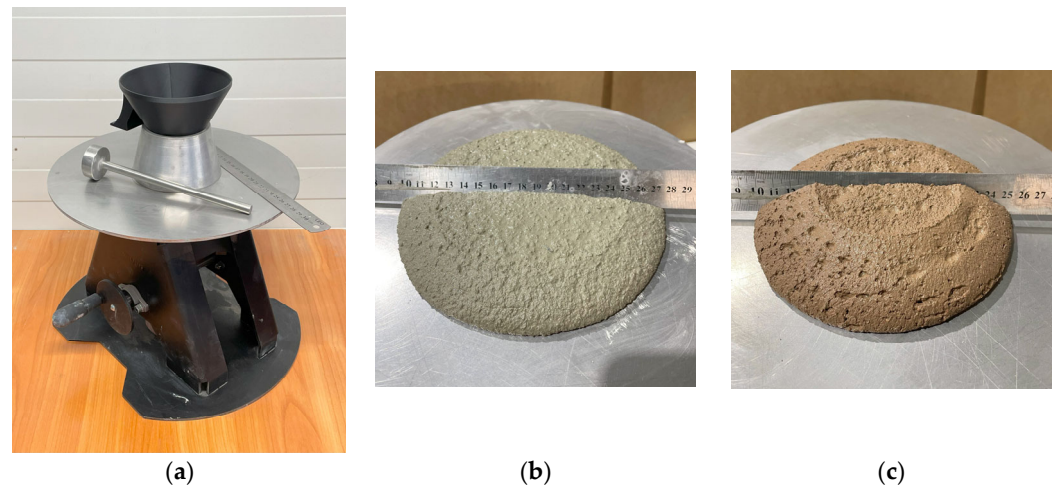


Figure 2. (a) View of the flow table test device according to the PN EN 1015-3 standard [29]; (b) material sample T2-9 at consistency test; (c) material sample T2-11 at consistency test.

Proper consistency is essential for maintaining continuous material flow during printing and preserving the geometry of the printed element [30–32]. The screw-type extruder used in this study can process materials with an EN 1015-3 [29] flow spread of 120–200 mm, a range that ensures stable extrusion and adequate shape stability. In mixtures with recycled additions, a constant solid-to-water mass ratio (S/W) of 5:1 (w/w), equivalently, $W/S = 0.20$, yielded a reference flow spread of ~165 mm for specimen T2-1. This value provided stable extrusion and sufficient structural integrity after deposition. Other recycled mixes showed minor variations in flow spread that did not preclude printing; nonetheless, any deviation in consistency directly affects extrusion efficiency and may influence the geometry and surface quality of printed elements [31]. In mixtures containing lightweight insulating fillers, the S/W ratio was adjusted to account for the substantial change in mixture volume, which also affected consistency. At excessive dosages, reduced extrudability can become a limiting factor for printability.

2.2.4. Printing and Preparation

Specimens were produced on a laboratory 3DCP setup with a build volume of $1200 \times 550 \times 400$ mm. The printer was equipped with a print head comprising a 20 L hopper with an integrated mixer and a screw-type extruder (Figure 3).

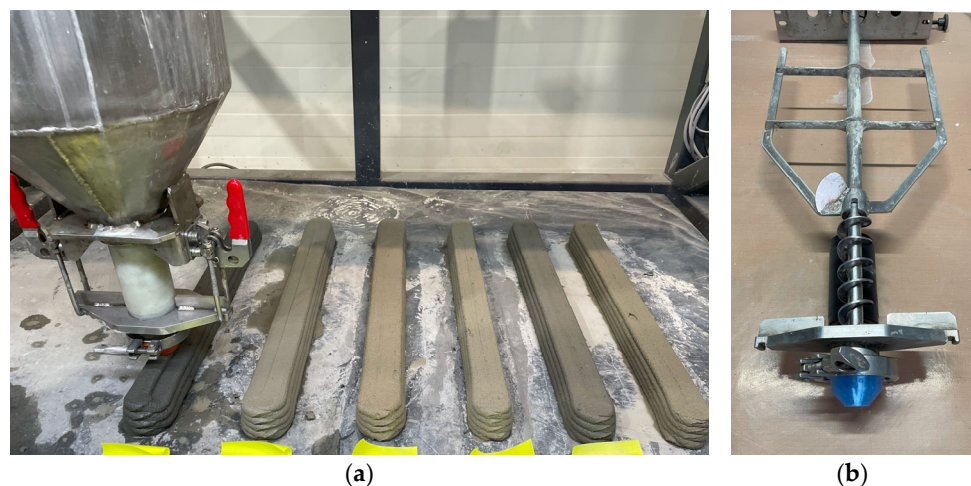


Figure 3. Cont.

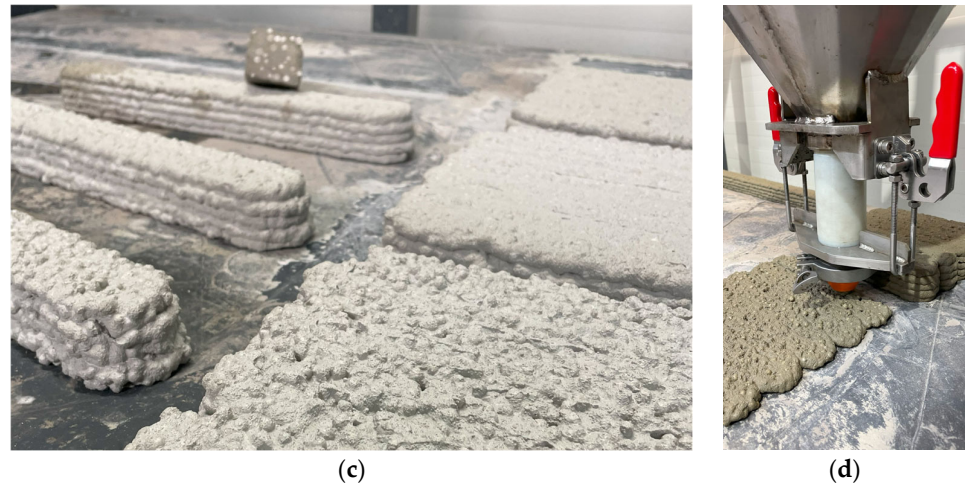


Figure 3. Laboratory setup for 3D concrete printing: (a) printer with printhead; (b) interior of the printhead with mixer and extruder; (c,d) example 3D-printed specimens with low-density components.

Following printing, the specimens were cured for 28 days under laboratory air-dry conditions, 23 °C and 40% RH, in accordance with practice for cementitious materials, to ensure adequate strength development.

2.2.5. Flexural and Compressive Strength of 3DCP Samples

Because no dedicated standards exist for determining the mechanical properties of 3D-printed cementitious elements, investigation procedures were adapted from tests developed for cast materials.

A three-point bending test was conducted on the specimens to determine their flexural strength. The load was applied at a constant rate of 50 N/s until the specimen failed.

The following formula was used to calculate the flexural strength:

$$\sigma_{max, B} = \frac{M_{g, max}}{W_g}, \quad (1)$$

$$M_{g, max} = \frac{F_{max} \cdot a}{4}, \quad (2)$$

$$W_g = \frac{bh^2}{6}, \quad (3)$$

where

$\sigma_{max, B}$ —maximum bending stress, (MPa);

$M_{g, max}$ —maximum bending moment, (Nm);

W_g —section modulus for bending, (m³);

F_{max} —maximum failure load, (kN);

a —span between supports, (m);

b —width of the cross-section, (m);

h —height of the cross-section, (m).

Compressive strength tests in accordance with EN 196-1 [33] on an MTS Criterion 43 testing machine (MTS Systems, Eden Prairie, MN, USA), controlled with MTS TestSuite 1.0 software were performed by applying load to the specimens at a constant rate of 500 N/s until failure. Two testing configurations were investigated: (i) specimens with printed layers oriented perpendicular to the loading direction, and (ii) specimens with

layers oriented parallel to the loading direction. In both cases, compressive strength was calculated using Equation (4):

$$\sigma_{max,C} = \frac{F_{max}}{S} \quad (4)$$

where

$\sigma_{max,C}$ —maximum stress in compression, compressive strength, (MPa);

F_{max} —load at failure, (N);

S —minimum cross-section determined for the narrowest cross-section, (mm²).

2.2.6. Water Absorption Test

Water absorption was measured in a dedicated tank fitted with a plastic spacer (table) at the bottom to allow free water flow beneath the specimens. The water level was maintained at 3 mm above the support surface to ensure continuous but minimal contact, enabling controlled capillary uptake (Figure 4).

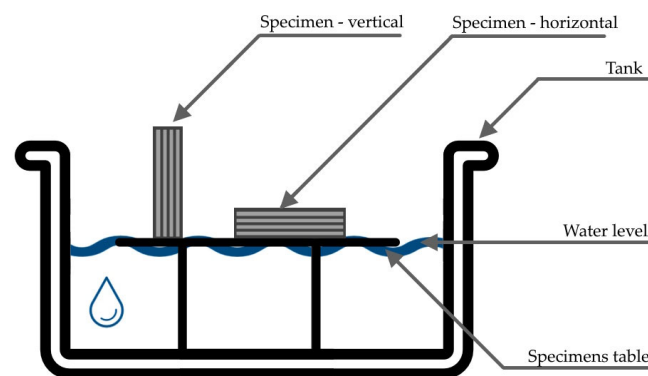


Figure 4. Schemes of water absorption test.

Additively manufactured specimens were tested in two orientations: (i) vertical, with a 40mm × 40 mm face in contact with water; and (ii) horizontal, with a 40 mm × 160 mm face in contact with water. The mass of each specimen was recorded at 1, 2, 4, 6, 12, 24, and 48 h from test start to quantify water uptake over time. In parallel, moisture ingress was monitored using a FLIR E96 thermal imaging camera; thermograms were captured every 5 min up to 4 h to visualize the wetting front.

The water absorption coefficient was determined using the following equation:

$$A = \frac{\Delta m_t}{F \times \Delta \sqrt{t}}, \quad (5)$$

where

A —water sorption coefficient, (kg/(m²h^{1/2}));

Δm_t —sample mass increase, (kg);

F —suction surface, (m²);

$\Delta \sqrt{t}$ —time square root increase, (h^{1/2}).

2.2.7. Thermal Conductivity

Thermal conductivity was measured with a FOX 314 heat-flow meter (LaserComp, New Castle, DE, USA; serial no. 1043). The instrument operates under steady-state conditions using heat-flux sensors and complies with:

- EN ISO 8301:1998 (guarded hot plate/heat-flow meter methods) [34].
- EN 12667:2002 (high/medium thermal resistance products; guarded hot plate/heat-flow meter) [35].

- ASTM C518-91 (heat-flow meter apparatus) [36].

The maximum size of the measured sample can be 305 mm × 305 mm × 100 mm. For this study, plate-type specimens of 200 mm × 200 mm × 40 mm were 3D-printed. After 28 days of curing under controlled conditions, the prints were first cut to size to remove edge artifacts. Next, the top and bottom faces were ground to obtain smooth, plane surfaces as required. Each specimen was placed within an extruded polystyrene (XPS) frame to fill the test chamber and act as lateral insulation around the measurement zone. The specimen preparation scheme is shown in Figure 5.



Figure 5. Schematic of specimen preparation for thermal conductivity testing of the 3D-printed material.

Prior to testing, specimens were stored for 5 days under laboratory air-dry conditions at 23 °C and 40% RH.

2.2.8. Microscopy Observation

Microscopic examination was performed using a Techrebal Banito B2920 digital microscope (Techrebal, Wilczyce, Poland) at 100× magnification, integrated with a Techrebal 48 MP camera (Techrebal, Wilczyce, Poland) for image acquisition.

3. Results and Discussion

3.1. Particle Size Analysis

Table 3 presents the particle-size distributions of the recycled aggregates used as additions. As is commonly known, particle size affects both water demand and hydration kinetics and thereby the resulting mechanical performance of the material [18,37].

Table 3. Particle size distribution of recycled aggregate after milling and sieving used as an additive to concrete mixtures.

Samples Designation	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	Mean Size (μm)	Span (D ₉₀ -D ₁₀)/D ₅₀
3D-Printed elem.	1.99	16.29	80.08	31.98	4.79
Glass	1.88	20.25	294.11	92.16	14.43
Mixed waste	1.67	16.35	273.68	85.81	16.64
Brick	1.31	15.89	173.35	29.76	10.83
Fly Ash (FA)	2.98	25.28	72.84	34.06	2.76
Slag (GGBFS)	2.95	25.72	216.89	48.75	8.32

Across all variants, the median size D₅₀ was in the range of 15–26 μm. Among the investigated materials, fly ash (FA) and ground 3D-printed waste exhibit the narrowest distributions (smallest span) and lie predominantly in the fine (sub-63 μm) range. By contrast, glass cullet, mixed demolition rubble, and slag (GGBFS) display broader, coarser distributions (span ≈ 8.3–16.6) with substantial tails above 100 μm. For these types of materials, a more uniform grading would require longer milling and/or optimization

of the ball charge (size and count) in the mill. The narrowest particle size distribution was recorded for FA. From a printability standpoint, narrow distributions with low D_{90} , e.g., FA, 3D-printed waste, generally reduce water demand and yield more reproducible rheology [38], whereas broad, tail-heavy gradings (glass/mixed waste/GGBFS) tend to increase water demand and impair homogeneity. In 3DCP this may limit extrudability and raise the risk of nozzle clogging [39–41].

3.2. Mixture Consistency

Consistency is critical in 3DCP, as it controls both extrusion continuity and shape stability of freshly deposited layers under the weight of subsequent layers. Flow-table results for all investigated mixes are shown in Figure 6.

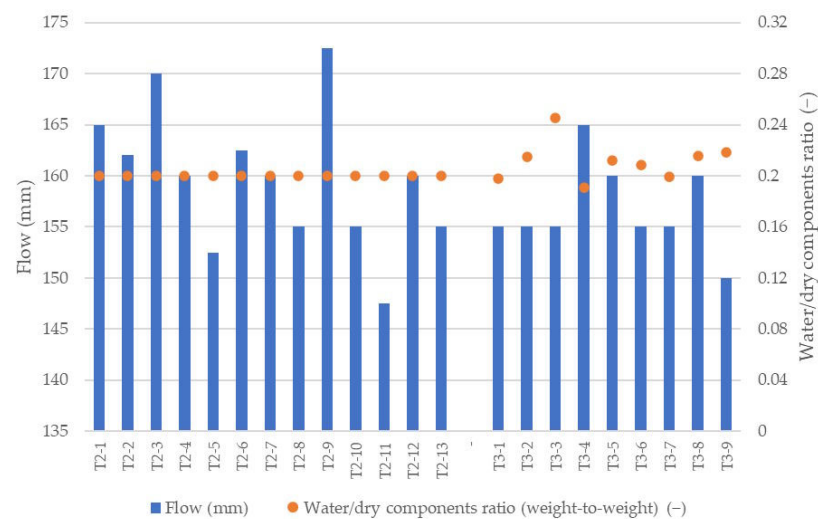


Figure 6. Consistency and water-solids ratio (W/S) of mixtures depending on their composition.

The reference mix (T2-1) (no additions) achieved a flow spread of ≈ 165 mm, a desirable level that provided stable extrusion and sufficient post-deposition integrity. Nearly all recycled aggregates increased water demand relative to the reference mix, with the exception of glass (T2-3, T2-9), which produced a slightly higher spread (~ 170 mm). The largest decrease in spread occurred with ground brick (values < 150 mm), attributable to higher internal friction and water uptake associated with fine, angular brick fines [42–44]. FA and ground 3D-printed waste produced spreads closest to the reference. These variations did not materially disrupt printing; the only observable issue was a minor deformation in T2-9 (glass), linked to excess flowability and reduced layer stability, manifested as local settling during layer deposition.

For the lightweight series (T3-1 to T3-9), the water content was adjusted because the density change pushed consistency outside the printable window; spreads < 130 mm proved insufficient for extrusion. The adjustments and resulting spreads are summarized in Figure 6. The largest water increase was applied to the perlite mix (T3-3), raising W/S from 0.20 to 0.25 and yielding a spread of ≈ 155 mm.

3.3. Macro/Micro Observations of Specimens Cross-Sections

All printed specimens were examined macroscopically and by optical microscopy on transverse sections. Macro images capture the distribution of coarse recycled constituents (e.g., glass, brick), while micrographs resolve the matrix-aggregate interfaces. Representative views for the 3DCP materials with recycled additives are compiled in Figure 7.

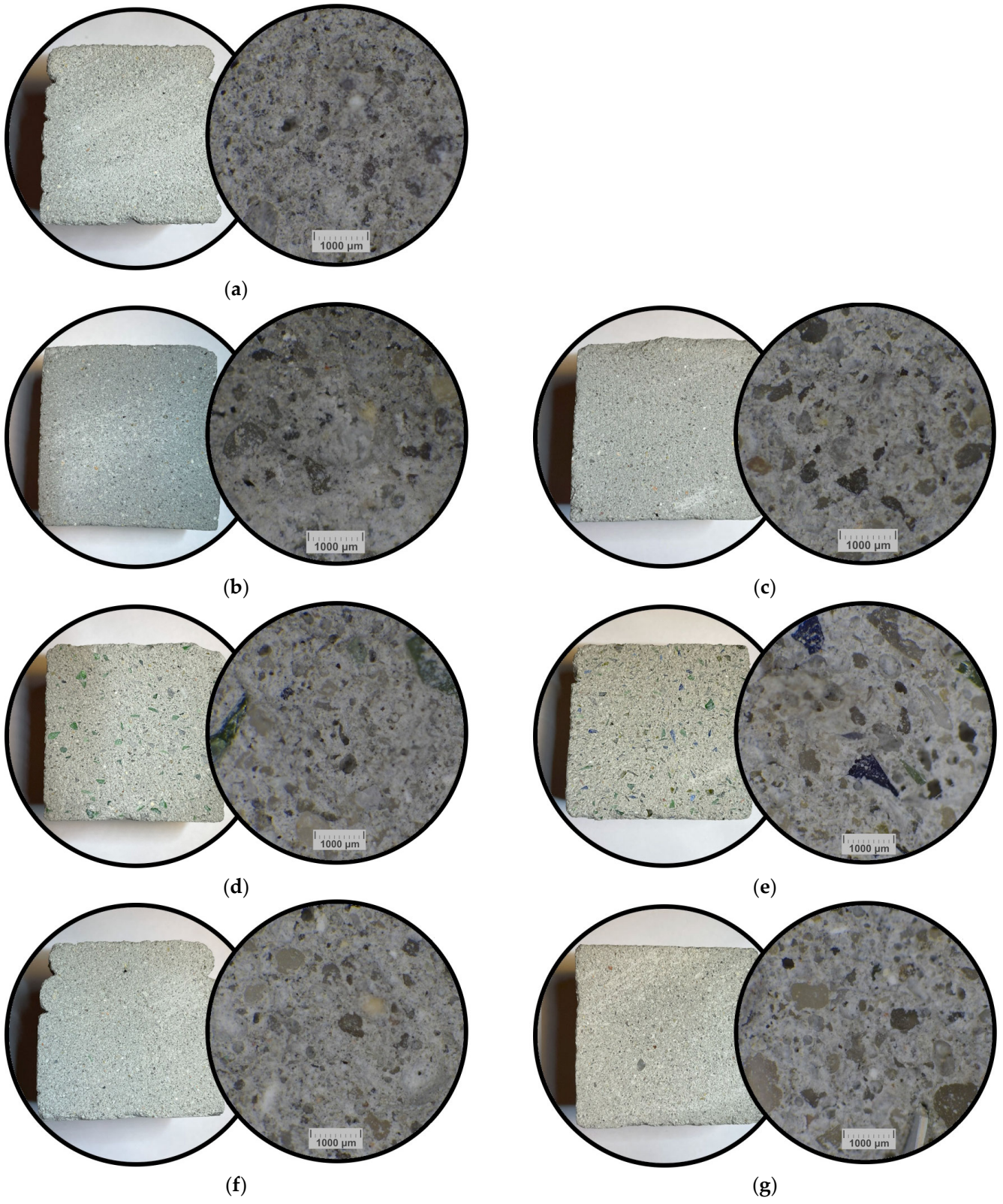


Figure 7. Cont.

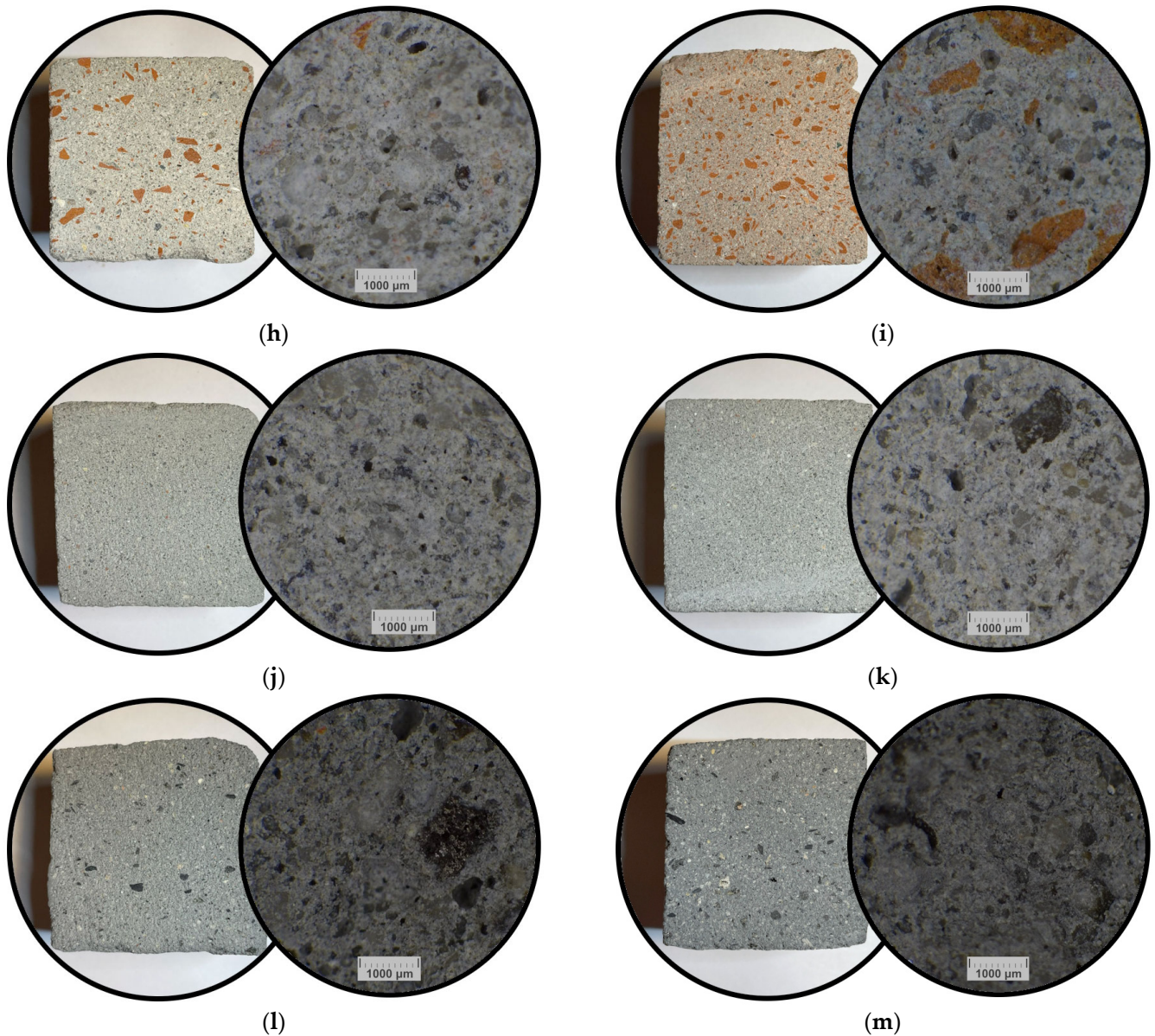


Figure 7. Representative view of cross-sections of specimens with recycled additives, left—macro photograph; right—micro photograph of: (a) T2-1; (b) T2-2; (c) T2-8; (d) T2-3; (e) T2-9; (f) T2-4; (g) T2-10; (h) T2-5; (i) T2-11; (j) T2-6; (k) T2-12; (l) T2-7; (m) T2-13.

The reference specimen (T2-1) exhibits a homogeneous matrix with a dense microstructure. Visible small voids, most likely caused by particle pull-out during surface preparation. A similarly compact microstructure was observed for T2-6 (FA). At the higher FA dosage (T2-12), local heterogeneities become apparent in the micrograph. Other mixtures reveal a greater proportion of coarse particles (often >1 mm), most pronounced in the glass, brick, and slag series, which was consistent with observations from the macro-scale images. In all cases, the recycled constituents appear uniformly dispersed within the cementitious matrix. No interfacial cracking or debonding was observed at the contacts between the matrix and the coarse recycled grains. None of the recycled additions adversely affected printability. The specimens exhibited no visible cracks, voids, or defects at the layer interfaces, confirming appropriate printing parameters and adequate mixture consistency.

An analogous microstructural analysis was performed for the lightweight formulations (Figure 8). Due to the strong color, texture contrast, and the volume fraction, the distribution of each lightweight filler was easy to observe.

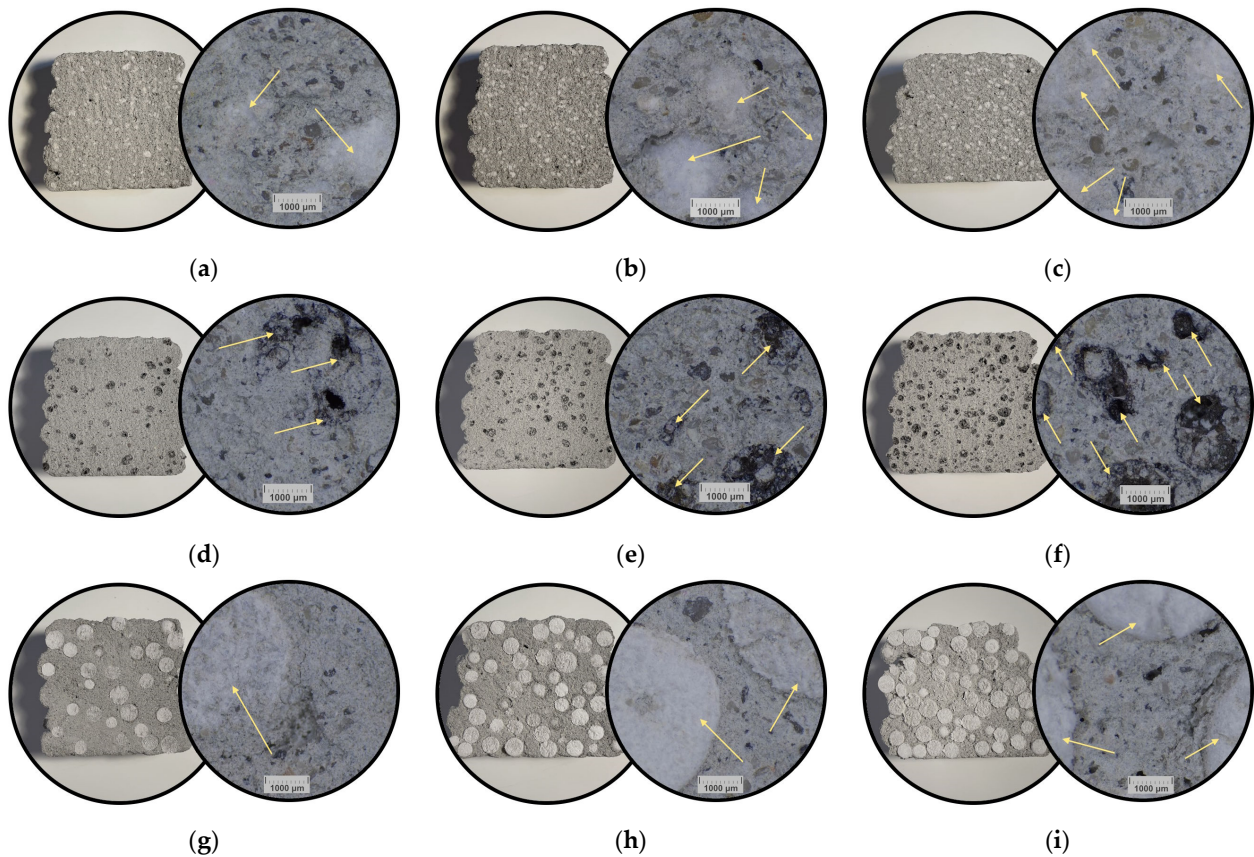


Figure 8. Representative view of cross-sections of specimens with recycled additives, left—macro photograph; right—micro photograph of: (a) T3-1; (b) T3-2; (c) T3-3; (d) T3-4; (e) T3-5; (f) T3-6; (g) T3-7; (h) T3-8; (i) T3-9. Arrows indicate the presence of a lightweight insulating additive.

In the case of specimens with insulating additions, the contrast in color between the additions and the reference material makes the effect of the addition content even more apparent. The finest addition in this set is expanded perlite, which is clearly visible when examining the macro images. The specimens produced with its inclusion, T3-1, T3-2, and T3-3, were characterized by a uniform distribution of this addition within the base matrix. The micrographs show perlite grains without sharply defined edges, which may result from the tendency of this addition to break up and abrade [45]. For perlite, it was important to add it in the final stage of mixing, yet early enough to distribute it uniformly throughout the base matrix, while avoiding excessively long mixing that would cause fragmentation [46,47].

LECA, in turn, exhibits rather clearly delineated particle edges; however, the internal structure of the granule was typically open, allowing the base matrix to penetrate its interior. Such cases are visible in the micrographs for specimens T3-5 and T3-6 (Figure 8e,f). This ingress of the base matrix into the particle interior may reduce the effectiveness of density reduction and limit the improvement in insulation. This is not a rule, however, since for specimen T3-4 the microstructural analysis indicates pores remaining inside the LECA grains.

The addition of granulated EPS was quite effective. At the highest content, the granulate fills almost the entire cross-section of the specimen. The structure was generally uniform, although there were locations where the EPS beads were in tight contact with one another and locations where a thicker coating of base matrix was visible around the bead. At lower dosages, the granulate was evenly dispersed. Microscopic analysis of the EPS-modified variants nevertheless reveals cracking at the phase boundary between the

base matrix and the bead. These microcracks (particularly visible in Figure 8i) form during curing and result from the low adhesion of the granulate to the matrix. The hydrophobic, smooth EPS surface hinders wetting and bond formation. The modulus/compliance mismatch between the soft EPS and the matrix generates stress gradients at crack initiation sites. Such interfaces were regarded as a weak link and may directly and adversely affect the strength of elements printed with this material [48–50].

3.4. Water Absorption Test

Water absorption of the printed specimens as a function of mixture composition and printing direction was determined. Capillary uptake began immediately upon samples' contact with the water surface. Most specimens absorbed water up to approximately half of their length. Horizontally oriented specimens appeared visibly wetter because their contact area with water was substantially larger, leading to greater uptake. Gravimetric mass tracking enabled calculation of the absorption coefficient. Figure 9 shows absorption-versus-time curves for vertically oriented specimens with recycled aggregates, and Figure 10 shows the average absorption coefficients after the first 24 h of test.

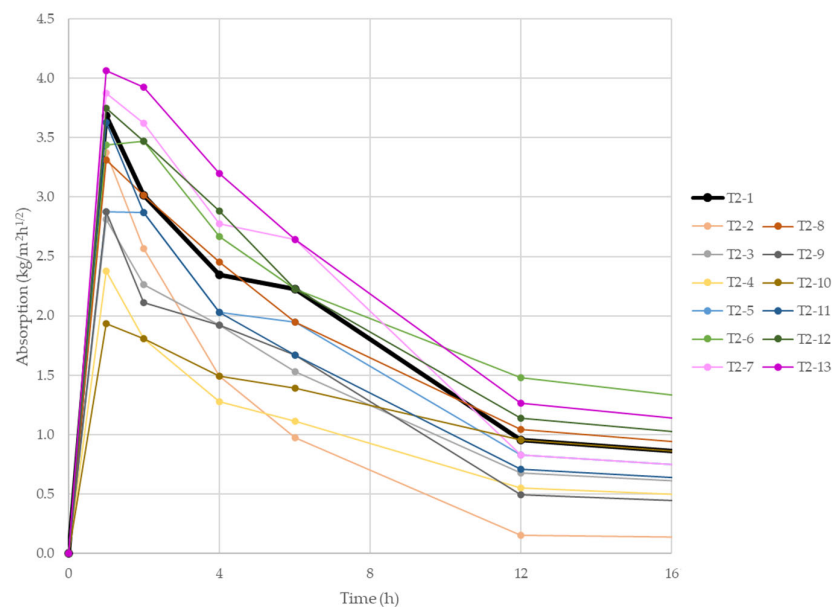


Figure 9. Absorption coefficient of 3D-printed specimens in vertical orientation depending on their composition.

Figure 9 allows comparison of sorptivity across all recycled-aggregate mixes tested vertically. The most intense absorption occurred directly after test initiation: the 1 h average coefficient ranged from ~ 2 to ~ 4 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Subsequent readings declined progressively, falling to less than half by 12 h. Thereafter the rate diminished further and nearly ceased by ~ 48 h, as visible in the full test record (Figure S1, Supplementary Materials).

Specimens with mixed rubble additions (T2-4 and T2-10) exhibited the lowest 24 h average coefficients, $1.12 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ (T2-4) and $1.25 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ (T2-10). In this case, a higher recycled-aggregate content increased absorption; conversely, for glass and fly ash additions, higher dosages reduced absorption. The highest coefficients were observed for fly ash and slag mixes. Their 24 h averages value (T2-6, T2-7, T2-12, T2-13) exceeded $2 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, surpassing the reference material (T2-1). This is somewhat unexpected given their particle-size distributions, especially FA, which showed the finest and most uniform grading, factors that would typically limit absorption [51,52]. Analogous trends were observed for horizontally tested specimens (Figures S2–S4, Supplementary Materials),

albeit with slightly lower coefficients. This may relate to 3D printing's layer-by-layer interfaces, which generally present increased porosity and reduced adhesion compared to, for example, cast monoliths. Such interfaces provide preferential fluid-migration pathways, promoting faster and more intense water ingress [52]. Moreover, printed microstructures are anisotropic: pores tend to align with the print direction, which facilitates capillary uptake—particularly along the layer orientation [53].

Infrared thermography confirmed the gravimetric results, although with lower discriminatory sensitivity, as the differences between specimens were less distinct (Figure 11). Across all series, absorption levels appeared broadly similar; slightly higher early-stage uptake was visible for T2-1 and T2-6 in the first comparison (Figure S5) and for T2-11 and T2-12 in the second (Figure S6, Supplementary Materials).

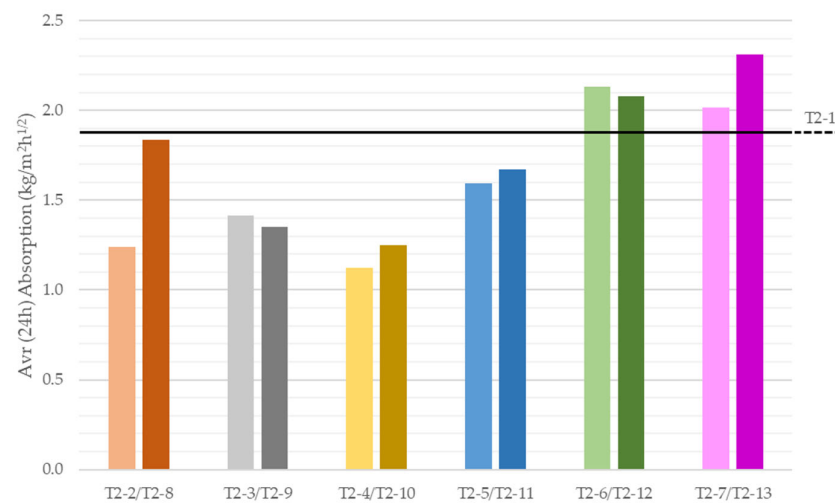


Figure 10. Average absorption coefficient of 3D-printed specimens in vertical orientation depending on their composition after 24 h of test.

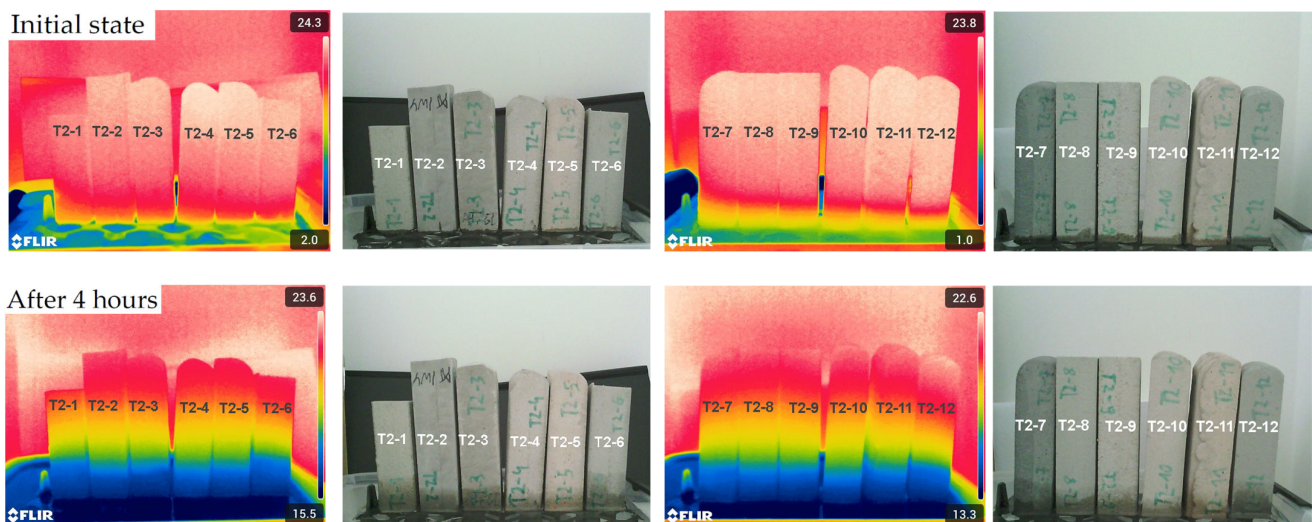


Figure 11. Images of the evolution of moisture propagation in samples numbered 1 to 12, recorded in both visible and infrared light, as a function of time and depending on the composition of the tested sample.

An analogous investigation was carried out for lightweight mixes that reduce fresh density. These tests were performed only in the vertical orientation. Figure 12 presents absorption-versus-time curves, and Figure 13 shows the average absorption coefficients after 24 h of test.

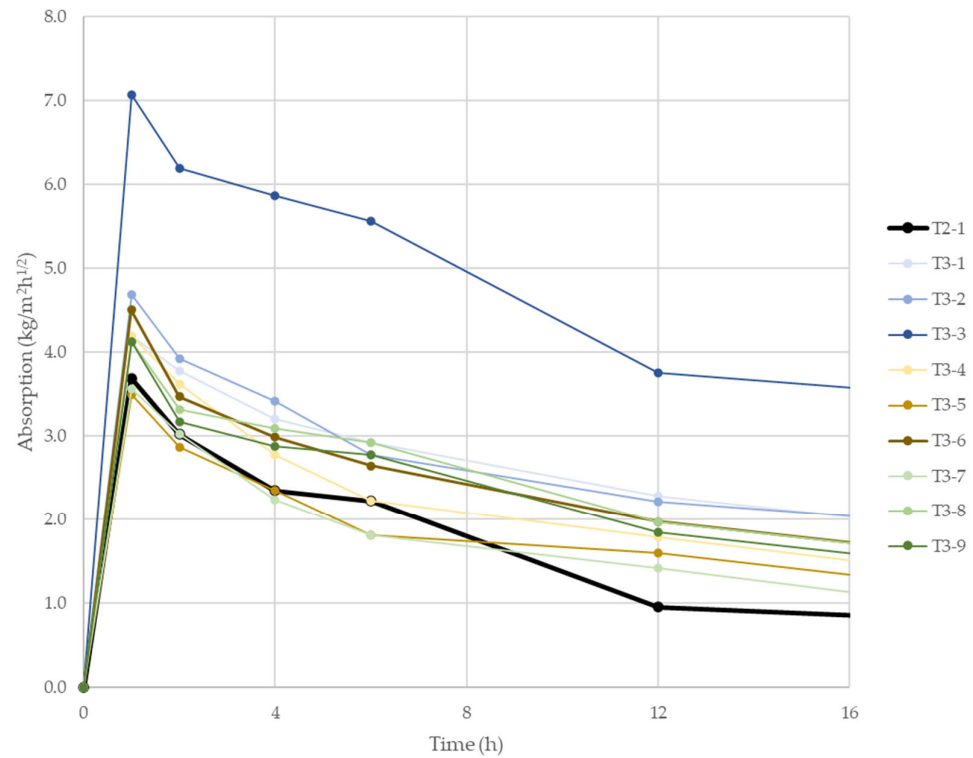


Figure 12. Absorption coefficient of 3D-printed specimens with low-density components in vertical orientation depending on their composition.

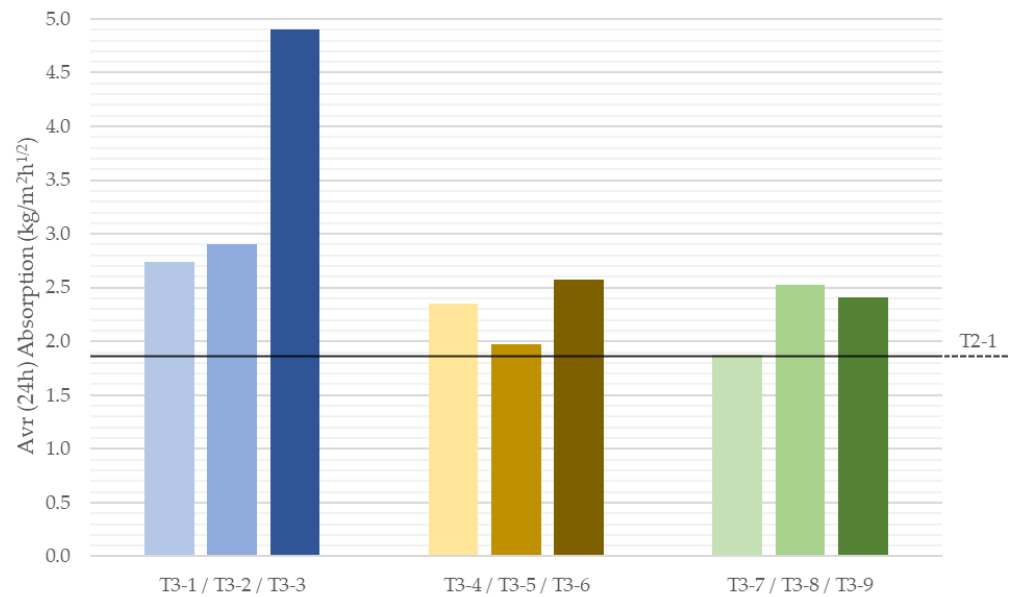


Figure 13. Average absorption coefficient of 3D-printed specimens with low-density components in vertical orientation depending on their composition after 24 h of test.

A similar overall pattern was observed: initially intense uptake followed by attenuation, yet for low-density mixes, the curve was less steep, i.e., water uptake persisted longer. This is evident in the late stage (Figure S7, Supplementary Materials), where after 48 h, the lightweight specimens were still absorbing, unlike the recycled-aggregate series. The 24 h average coefficients were also considerably higher (nearly all $>2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) than those for recycled-aggregate mixes. Each of the analyzed variants was characterized by increased absorption compared to the reference sample (T2-1). The highest values occurred with expanded perlite, especially at the largest dosage, achieving a 24 h average

of $4.89 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. This may be linked to the particle attrition noted in the microscopy analysis for perlite, which can increase water uptake [46,47].

3.5. Bending Test

Three-point bending showed that nearly all modifications relative to the reference mix decrease flexural strength (Figure 14). The sole exception was T2-4 (mixed rubble addition), which exceeded the value of reference material and reached 5.72 MPa. A plausible explanation of this phenomenon was local reinforcement due to residual fibers or other inclusions. Among the remaining variants, specimens with crushed 3D-printed waste, glass, fly ash, and slag (T2-2, T2-3, T2-6, T2-9, T2-13) clustered around 2–2.5 MPa, i.e., a little over 50% of the reference. The lowest results were recorded when the brick additions (T2-5, T2-11) were used. They reduced the flexural strength by approximately 60% compared to the reference mixture.

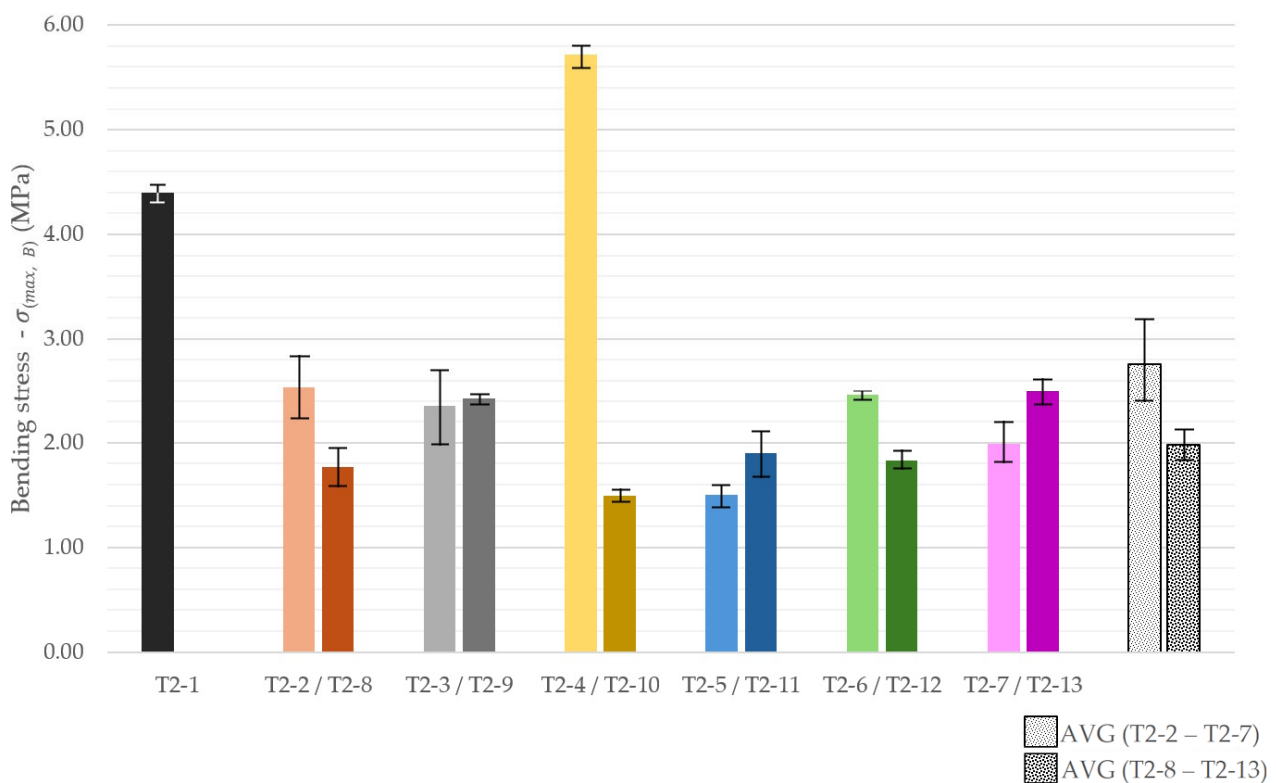


Figure 14. Flexural strength of 3D-printed concrete specimens depending on their composition.

Flexural strength of the lightweight series was analyzed in conjunction with the corresponding bulk density (Figure 15). The LECA mixes exhibited the smallest reductions relative to the reference material, averaging approximately 3 MPa ($\approx 67\%$ of the reference). Notably, the intermediate LECA dosage (T3-5) reached the highest mean value (3.33 MPa), albeit with considerable scatter. A similar trend was observed for the perlite mixes, where the intermediate variant (T3-2) displayed the highest strength (2.3 MPa). The lowest flexural strengths were recorded for the EPS mixes, averaging 0.99 MPa. Even the lowest-density EPS mix (T3-7, 1412 kg/m^3) was approximately 28% weaker than the corresponding perlite mix T3-3 (1303 kg/m^3). This reduction in strength is consistent with the microstructural observations of matrix-EPS interfacial microcracking reported in Section 3.3, which contribute to weakening of the printed elements.

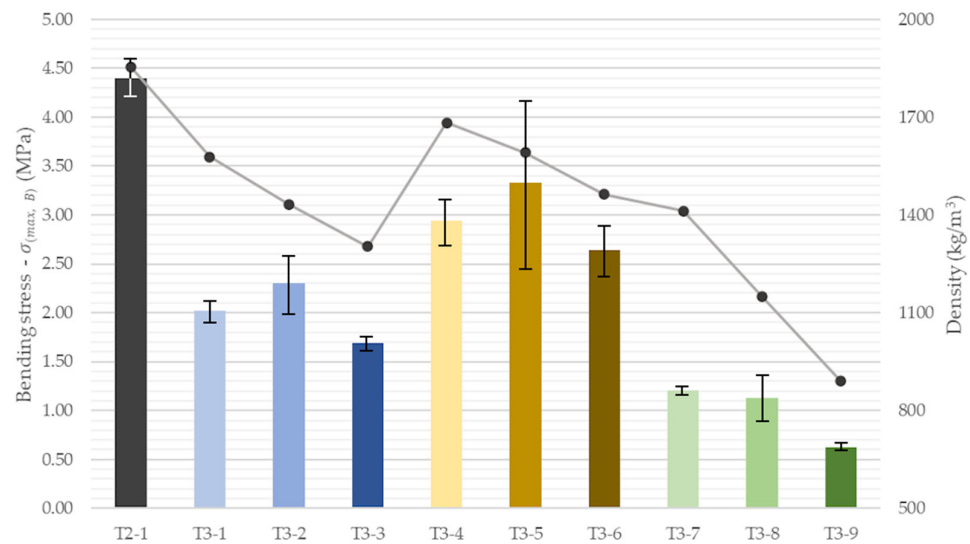


Figure 15. Flexural strength (bars) and density (line) of 3D-printed concrete specimens with insulation components.

3.6. Compressive Test

Compressive strength results were presented in Figure 16. Moreover, Figure 17 shows the averaged strength values for each material variant.

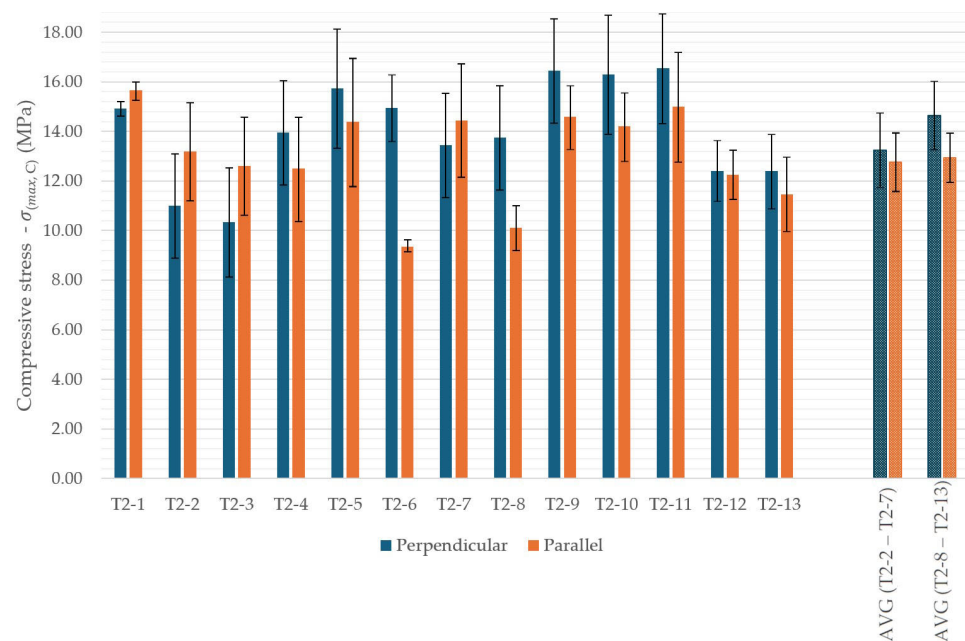


Figure 16. Compressive strength of 3D-printed concrete specimens with recycled components, depending on specimen orientation.

For the recycled-aggregate mixtures, anisotropy inherent to layer-wise fabrication was observed. In the lower-replacement group (T2-2 to T2-7), loading perpendicular to the printed layers resulted in compressive strengths approximately 4% higher than loading parallel to the layers. In the higher-replacement group (T2-8 to T2-13), this difference increased to roughly 13%. The reference mix exhibited comparable strengths in both orientations, whereas the largest orientation-dependent effects were recorded for T2-6 and T2-8.

In terms of absolute strength, specimens T2-9, T2-10, and T2-11 exceeded the reference material, reaching 15.5–16.0 MPa. These mixtures incorporated aggregates with a broad particle-size distribution, which, while slightly detrimental for flexural performance, appeared beneficial

for compressive strength due to improved particle packing. Contrary to the flexural trends, the higher-replacement group (T2-8 to T2-13) achieved, on average, approximately 6% higher compressive strength than the lower-replacement group. The lowest compressive strengths were observed in mixtures containing crushed 3D-printed waste.

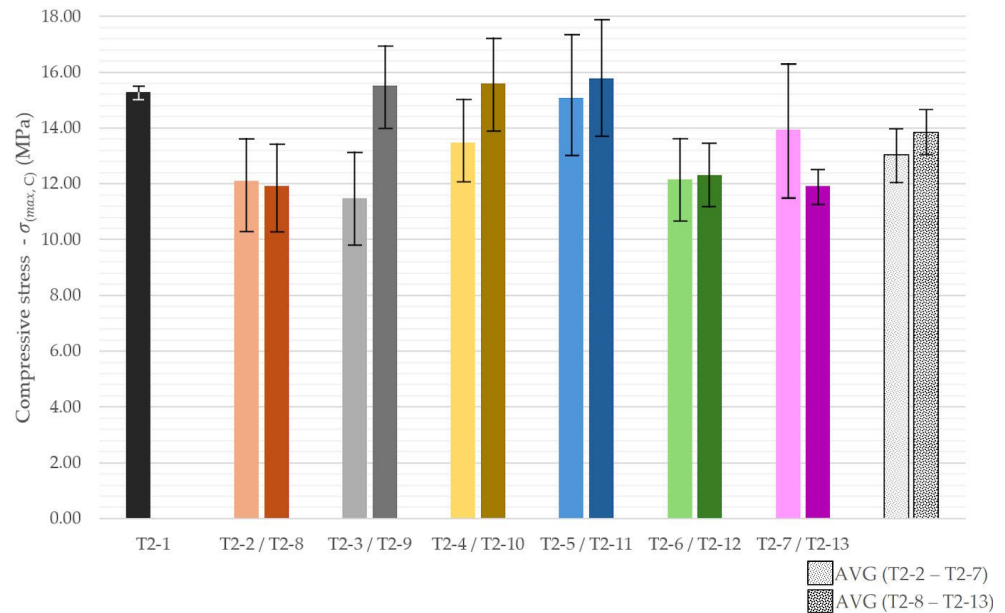


Figure 17. Compressive strength of 3D-printed concrete specimens with recycled components.

For the lightweight series, the compressive tests revealed orientation-dependent trends presented in Figure 18, with the corresponding average values summarized in Figure 19. In these mixtures containing insulating fillers, the effect of printing orientation was more dependent on the specific formulation.

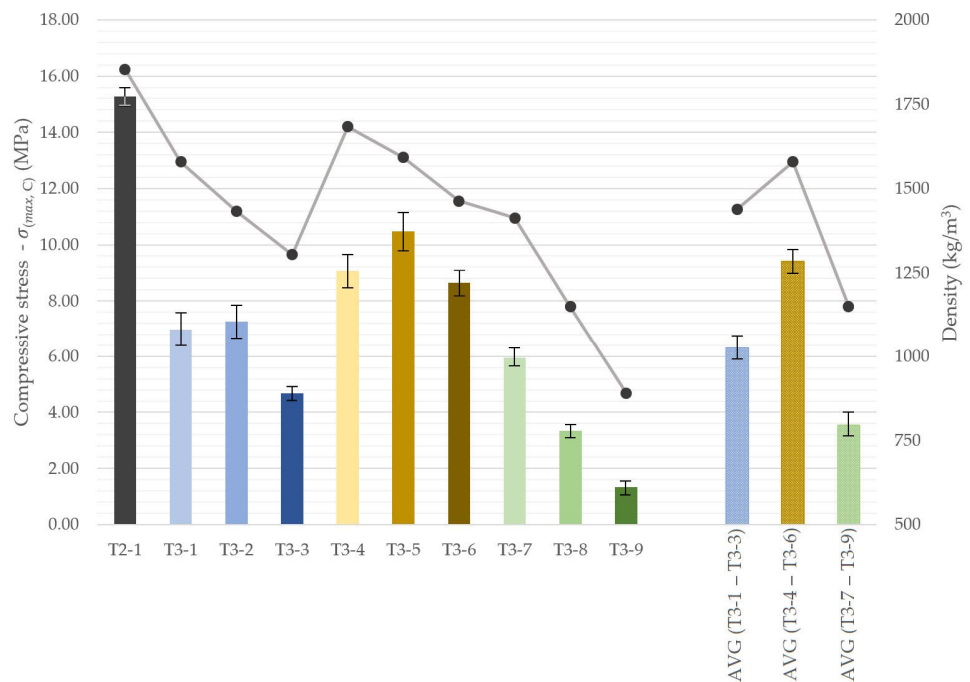


Figure 18. Compressive strength (bars) and density (line) of 3D-printed concrete specimens with insulation components, depending on specimen orientation.

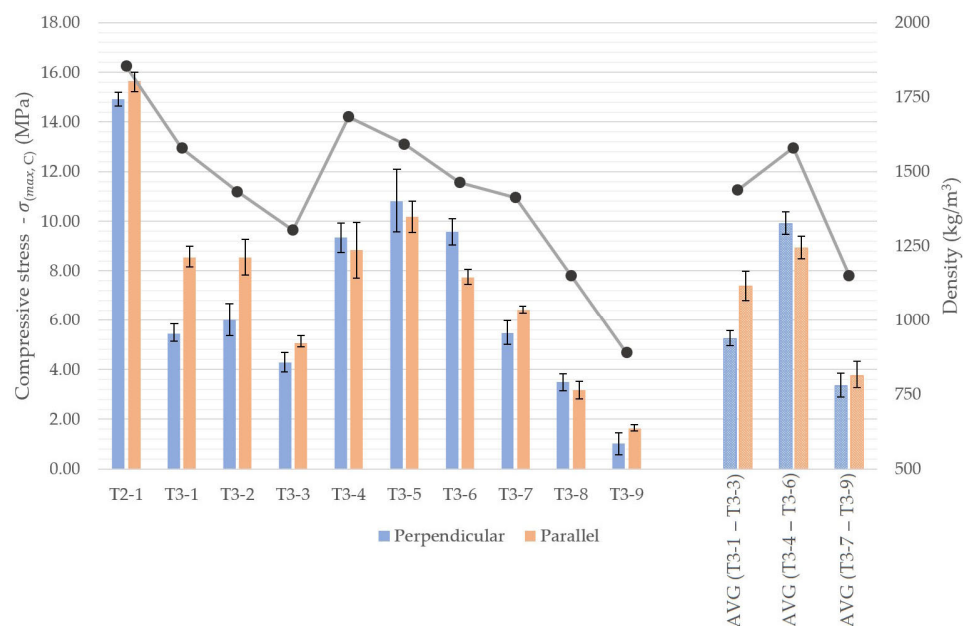


Figure 19. Compressive strength (bars) and density (line) of 3D-printed concrete specimens with recycled components.

Perlite specimens (T3-1 to T3-3) exhibited higher flexural strength when loaded parallel to the printed layers, with increases of up to 40%. EPS mixes (T3-7 to T3-9) showed a similar trend, albeit with a smaller difference of approximately 12%. In contrast, LECA specimens demonstrated higher strength when loaded perpendicular to the printed layers, with an average value of 9.9 MPa.

In terms of absolute values, the LECA mixes (T3-4 to T3-6) exhibited the highest compressive strengths, averaging 9.41 MPa, in agreement with the flexural performance trends. This behavior is consistent with density effects, as LECA reduced the bulk density the least, by an average of 14.7% relative to the reference mix. In contrast, EPS, although most effective in reducing density, resulted in the lowest compressive strengths, averaging below 4 MPa, corresponding to approximately 23% of the reference material.

3.7. Thermal Conductivity and Density

Figure 20 shows the thermal conductivity λ and density of all investigated samples.

Figure 20 reveals a clear dependency between density and thermal conductivity. As mixture density decreases, thermal conductivity is reduced, although the magnitude of this effect is strongly dependent on the type of lightweight addition. Expanded perlite (T3-1 to T3-3) reduced fresh density by 15–30% compared with the reference mix, resulting in a marked decrease in conductivity of up to 48.4%, with a minimum value of 0.475 W/m·K for T3-3. For perlite, the density–conductivity relationship is the least linear ($R^2 = 0.75$). Lightweight expanded clay aggregate (LECA) exhibited the least pronounced response: density reductions of 9–21% yielded a minimum conductivity of 0.535 W/m·K at the highest dosage (T3-6), corresponding to a ~41% decrease relative to the reference. As anticipated, EPS beads were the most effective, lowering density by 24–52% (down to 890 kg/m³ for T3-9) and producing the lowest conductivity of 0.271 W/m·K, equivalent to a ~71% reduction versus the reference. For both EPS and LECA, the conductivity–density trend was close to linear ($R^2 = 0.95$ and $R^2 = 0.97$, respectively). These findings demonstrate that all three lightweight additions improve thermal performance, with EPS providing the strongest insulating effect, perlite delivering a substantial intermediate benefit, and LECA offering a more moderate reduction in λ , consistent with its smaller impact on density.

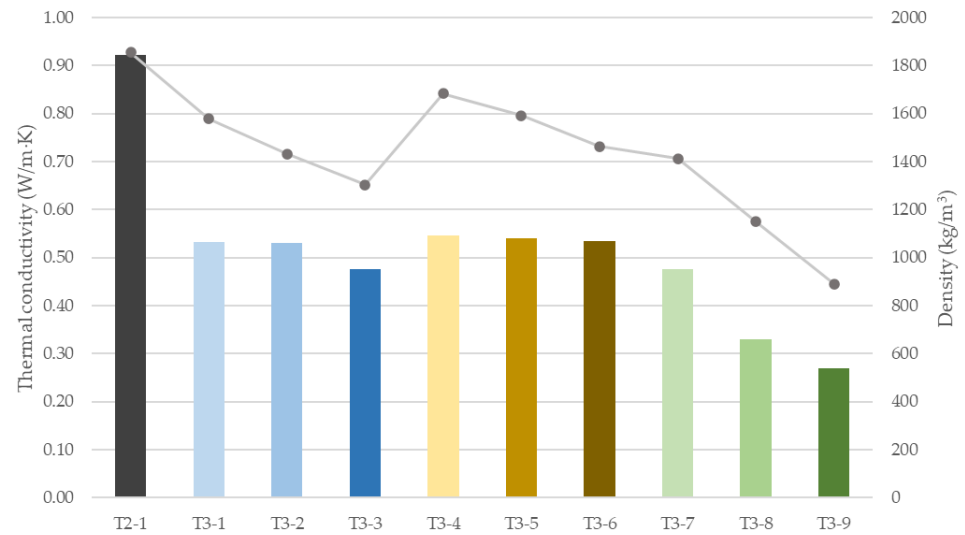


Figure 20. Thermal conductivity (λ , bars) and density (line) of 3D-printed specimens with lightweight insulating additions.

However, when applying the multi-criteria analysis (Figure 21), it becomes apparent that, despite thermal performance comparable to perlite, LECA attains substantially higher compressive and flexural strengths (by nearly 50% in both metrics). The EPS-based mix, while the most effective insulator, incurs the greatest losses in mechanical strength. Accordingly, its use would be confined to non-load-bearing applications or to insulating infill layers that markedly enhance the thermal performance of building envelopes. In terms of jointly maximizing mechanical properties and improving thermal insulation, LECA emerges as an effective compromise.

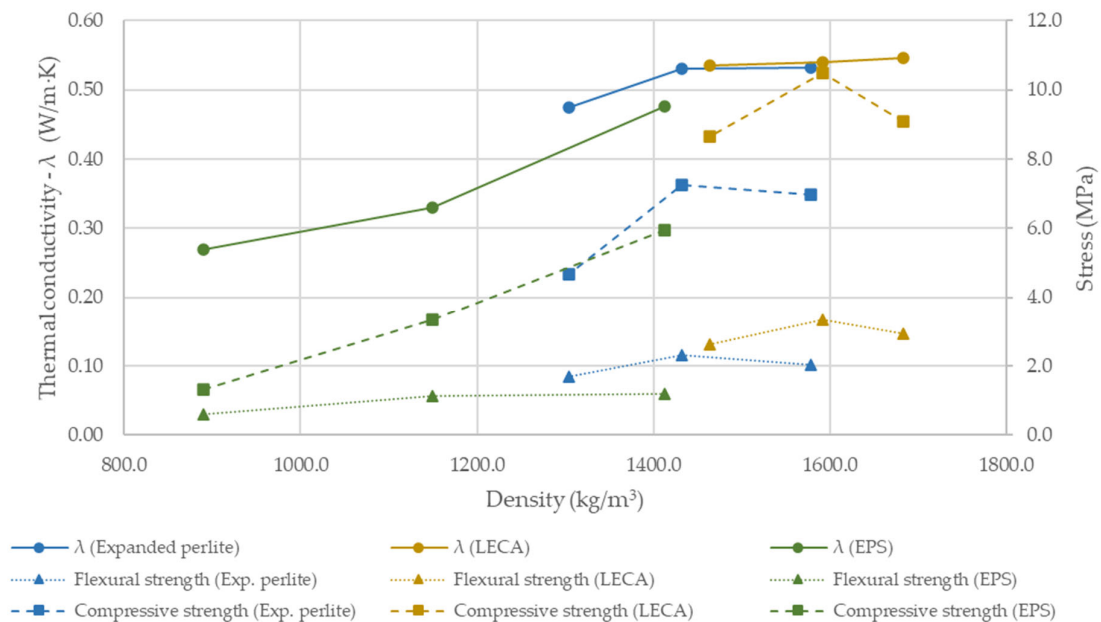


Figure 21. Thermal conductivity (λ), flexural strength, and compressive strength as functions of material density and the insulating additive used.

4. Conclusions

Three-dimensional concrete printing (3DCP) is developing rapidly; however, its implementation should be coupled with sustainability strategies consistent with circular-economy principles. The present study assessed the feasibility of substituting natural aggregates with

recycled constituents and incorporating lightweight insulating fillers to reduce density—and thereby the embodied energy and carbon—of printable cementitious mixtures.

Recycled aggregates can effectively reduce natural-aggregate demand provided that grading and surface quality are controlled. Narrow particle-size distributions (e.g., FA, ground 3DCP waste) were favorable, whereas broad gradings (glass, mixed rubble, slag) increased water demand and extrusion risks. Optimizing milling conditions and grading curves is essential.

Printability remained within acceptable limits regardless of the composition of the tested mixtures. Flow spread decreased slightly with most recycled additions (brick being the lowest), while glass increased it. Printing stability was generally preserved.

Flexural strength tended to decrease with recycled constituents, though isolated improvements were observed (e.g., rubble mix T2-4). Lower replacement levels generally allowed for better results.

Compressive strength benefited from broader gradings in certain mixes and displayed the anisotropy typical of 3DCP. Higher replacement levels yielded ~6% strength gains due to improved packing, with perpendicular loading showing up to 13% higher values than parallel loading.

Lightweight fillers improved thermal performance at the expense of mechanical strength. LECA provided the most favorable compromise, perlite showed intermediate behavior, and EPS offered the strongest insulation but caused significant strength losses due to weak matrix-EPS interfaces.

Water absorption decreased substantially in recycled-aggregate mixes after 48 h, while lightweight mixes exhibited more persistent uptake, especially at high perlite dosages.

The obtained results demonstrate that non-reactive recycled constituents and lightweight insulating fillers can be successfully employed in 3DCP to reduce environmental impact while maintaining printability. Optimized particle-size distribution, orientation-aware structural design, and improved matrix–filler interfaces are key to achieving target performance, particularly in EPS-modified systems.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ma18184387/s1>. Figure S1. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in vertical positions—test 0–48 h.; Figure S2. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in horizontal positions.; Figure S3. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in horizontal positions—test 0–48 h.; Figure S4. Average absorption coefficient from 24 h of 3D printed specimens with recycled components in vertical positions.; Figure S5. Images of the evolution of moisture dispersion in samples numbered 1 to 6, recorded in both visible and infrared light, as a function of time and depending on the composition of the tested sample.; Figure S6. Images of the evolution of moisture dispersion in samples numbered 7 to 12, recorded in both visible and infrared light, as a function of time and depending on the composition of the tested sample.; Figure S7. Absorption coefficient of 3D printed specimens with insulation components in horizontal positions—test 0–48 h.; Table S1: Summary one-way analysis of variance (ANOVA) of compressive strength results.; Table S2: Two-sample *t*-tests (equal variances assumed) between T2-1 and other groups.

Author Contributions: Conceptualization, M.M., I.H., M.R. and M.H.; methodology, M.M., M.R. and M.H.; software, M.M., K.R.-Ž. and M.R.; validation, M.M. and M.H.; formal analysis, M.M., I.H., M.R., K.R.-Ž. and M.H.; investigation, M.M., M.R., K.R.-Ž. and M.H.; resources, I.H. and M.H.; data curation, M.M. and M.H.; writing—original draft preparation, M.M., M.R. and M.H.; writing—review and editing, M.M. and M.H.; visualization, M.M.; supervision, M.H.; project administration, M.M., I.H. and M.H.; funding acquisition, I.H. and M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been supported by the Ministry of Science and Higher Education within the program “Implementation Doctorate”, DWD/5/0237/2021.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article and Supplementary Materials. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

3DCP	3D Concrete Printing
C&D	Construction and demolition
CDW	Construction and demolition waste
CEM I	Portland cement, Type I
D50	Median particle size (50th percentile)
D90	90th percentile particle size
EN	European Standard
EPS	Expanded polystyrene
EU-27	European Union (27 Member States)
FA	Fly ash
GBW	Ground brick waste
GGBFS	Ground granulated blast-furnace slag
ISO	International Organization for Standardization
LECA	Lightweight expanded clay aggregate
L/S	Liquid-to-solid ratio (by mass)
OPC	Ordinary Portland cement
PCE	Polycarboxylate ether (superplasticizer)
PGE	Polska Grupa Energetyczna (Polish Energy Group)
RBA	Recycled brick aggregate
RCA	Recycled concrete aggregate
RCBW	Recycled clay brick waste
RFA	Recycled fine aggregate
RH	Relative humidity
SBU	Structural build-up
S/W	Solids-to-water ratio (by mass)
VMA	Viscosity-modifying agent
W/S	Water-to-solids ratio (by mass)
XPS	Extruded polystyrene

References

1. Pisciotta, M.; Pilorgé, H.; Davids, J.; Psarras, P. Opportunities for Cement Decarbonization. *Clean. Eng. Technol.* **2023**, *15*, 100667. [CrossRef]
2. European Commission. *Joint Research Centre. Decarbonisation Options for the Cement Industry*; Publications Office LU: Luxembourg, 2023.
3. Spire. Strategic Research and Innovation Agenda, Processes4Planet. Available online: https://www.aspire2050.eu/sites/default/files/users/user85/p4planet_07.06.2022._final.pdf (accessed on 15 September 2025).
4. International Energy Agency. *Technology Roadmap—Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; IEA: Paris, France, 2018. Available online: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (accessed on 3 September 2025).
5. CEMBUREAU. *Key Facts & Figure*; CEMBUREAU—The European Cement Association: Brussels, Belgium, 2025.
6. CEMBUREAU. *EU Cement Industry Trade Statistics—Full Year 2023*; CEMBUREAU—The European Cement Association: Brussels, Belgium, 2025.

7. CEMBUREAU. *EU Cement Industry Performance 2021–2022*; CEMBUREAU—The European Cement Association: Brussels, Belgium, 2023.
8. CEMBUREAU. *Activity Report 2024*; CEMBUREAU—The European Cement Association: Brussels, Belgium, 2024.
9. Naqi, A.; Jang, J.G. Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability* **2019**, *11*, 537. [[CrossRef](#)]
10. Nassar, R.-U.-D.; Balachandra, A.; Soroushian, P. Formulation of High-Recycled-Content Hydraulic Cements Based on Alkali Aluminosilicate Chemistry and Mechanochemical Processing Techniques. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *437*, 137017. [[CrossRef](#)]
11. Wen, J.; Wang, B.; Dai, Z.; Shi, X.; Jin, Z.; Wang, H.; Jiang, X. New Insights into the Green Cement Composites with Low Carbon Footprint: The Role of Biochar as Cement Additive/Alternative. *Resour. Conserv. Recycl.* **2023**, *197*, 107081. [[CrossRef](#)]
12. Pickin, J.; Wardle, C.; O'Farrell, K.; Nyunt, P.; Donovan, S. *National Waste Report 2020*; Blue Environment; Department of Agriculture, Water and the Environment: Brisbane, Australia, 2020.
13. Xiao, J.; Zou, S.; Yu, Y.; Wang, Y.; Ding, T.; Zhu, Y.; Yu, J.; Li, S.; Duan, Z.; Wu, Y.; et al. 3D Recycled Mortar Printing: System Development, Process Design, Material Properties and on-Site Printing. *J. Build. Eng.* **2020**, *32*, 101779. [[CrossRef](#)]
14. Ivanova, I.; Mechtcherine, V. Evaluation of Structural Build-Up Rate of Cementitious Materials by Means of Constant Shear Rate Test: Parameter Study. In *Rheology and Processing of Construction Materials*; Mechtcherine, V., Khayat, K., Secrieru, E., Eds.; RILEM Bookseries; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; Volume 23, pp. 209–218. ISBN 978-3-030-22565-0.
15. Ivanova, I.; Mechtcherine, V. Effects of Volume Fraction and Surface Area of Aggregates on the Static Yield Stress and Structural Build-Up of Fresh Concrete. *Materials* **2020**, *13*, 1551. [[CrossRef](#)]
16. Wu, Y.; Liu, C.; Liu, H.; Zhang, Z.; He, C.; Liu, S.; Zhang, R.; Wang, Y.; Bai, G. Study on the Rheology and Buildability of 3D Printed Concrete with Recycled Coarse Aggregates. *J. Build. Eng.* **2021**, *42*, 103030. [[CrossRef](#)]
17. Fonseca, M.; Matos, A.M. 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities. *Materials* **2023**, *16*, 2458. [[CrossRef](#)]
18. Robayo-Salazar, R.; Vargas, A.; Martínez, F.; Mejía De Gutiérrez, R. Utilization of Powders and Fine Aggregates from the Recycling of Construction and Demolition Waste in the 3D Printing of Portland-Based Cementitious Materials. *Clean. Mater.* **2024**, *11*, 100234. [[CrossRef](#)]
19. Robayo-Salazar, R.; Mejía De Gutiérrez, R.; Villaquirán-Cacedo, M.A.; Delvasto Arjona, S. 3D Printing with Cementitious Materials: Challenges and Opportunities for the Construction Sector. *Autom. Constr.* **2023**, *146*, 104693. [[CrossRef](#)]
20. Pasupathy, K.; Ramakrishnan, S.; Sanjayan, J. 3D Concrete Printing of Eco-Friendly Geopolymer Containing Brick Waste. *Cem. Concr. Compos.* **2023**, *138*, 104943. [[CrossRef](#)]
21. Christen, H.; Cho, S.; Van Zijl, G.; De Villiers, W. Phase Change Material Infused Recycled Brick Aggregate in 3D Printed Concrete. *Heliyon* **2022**, *8*, e11598. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Rahul, A.V.; Santhanam, M. Evaluating the Printability of Concretes Containing Lightweight Coarse Aggregates. *Cem. Concr. Compos.* **2020**, *109*, 103570. [[CrossRef](#)]
23. Balbuena, J.; Sánchez, M.; Sánchez, L.; Cruz-Yusta, M. Lightweight Mortar Incorporating Expanded Perlite, Vermiculite, and Aerogel: A Study on the Thermal Behavior. *Materials* **2024**, *17*, 711. [[CrossRef](#)]
24. Niu, G.; Liu, C.; Jia, L.; Ma, L.; Shi, Y.; Jiang, Y.; Jia, Z.; Chen, Y.; Banthia, N.; Zhang, Y. Preparation and Performance Analysis of 3D Printed Lightweight EPS Concrete: Insights from the Excess Paste Theory. *Cem. Concr. Compos.* **2024**, *149*, 105509. [[CrossRef](#)]
25. Yu, Z.; Liu, C.; Li, J.; Wu, J.; Ma, X.; Cao, Y.; Cao, J.; Xiang, W.; Wang, H.; Ding, Q. Research on the Water Absorption and Release Characteristics of a Carbonized γ -C2S Lightweight Aggregate in Lightweight and High-Strength Concrete. *Coatings* **2024**, *14*, 1056. [[CrossRef](#)]
26. Kabay, N.; Aköz, F. Effect of Prewetting Methods on Some Fresh and Hardened Properties of Concrete with Pumice Aggregate. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, *34*, 503–507. [[CrossRef](#)]
27. *ISO 13320:2020*; Particle Size Analysis—Laser Diffraction Methods. ISO: Geneva, Switzerland, 2020.
28. *ISO 14887:2000*; Sample Preparation—Dispersing Procedures for Powders in Liquids. ISO: Geneva, Switzerland, 2000.
29. *EN 1015-3:1999*; Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table). CEN: Brussels, Belgium, 1999.
30. Kaszyńska, M.; Hoffmann, M.; Skibicki, S.; Zieliński, A.; Techman, M.; Olczyk, N.; Wróblewski, T. Evaluation of Suitability for 3D Printing of High Performance Concretes. *MATEC Web Conf.* **2018**, *163*, 01002. [[CrossRef](#)]
31. Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hutyra, A.; Dziura, P.; Hebda, M. Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 11866. [[CrossRef](#)]
32. Paritala, S.; Singaram, K.K.; Bathina, I.; Khan, M.A.; Jyosyula, S.K.R. Rheology and Pumpability of Mix Suitable for Extrusion-Based Concrete 3D Printing—A Review. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *402*, 132962. [[CrossRef](#)]
33. *EN 196-1:2016*; Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength. CEN: Brussels, Belgium, 2016.
34. *EN ISO 8301:1998*; Thermal Insulation—Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties—Heat Flow Meter Apparatus. CEN: Brussels, Belgium, 1998.

35. EN 12667:2001; Thermal Performance of Building Materials and Products—Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods—Products of High and Medium Thermal Resistance. CEN: Brussels, Belgium, 2001.
36. ASTM C518-91; Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1991.
37. Singh, A.; Miao, X.; Zhou, X.; Deng, Q.; Li, J.; Zou, S.; Duan, Z. Use of Recycled Fine Aggregates and Recycled Powders in Sustainable Recycled Concrete. *J. Build. Eng.* **2023**, *77*, 107370. [[CrossRef](#)]
38. Ma, J.; Zhang, H.; Wang, D.; Wang, H.; Chen, G. Rheological Properties of Cement Paste Containing Ground Fly Ash Based on Particle Morphology Analysis. *Crystals* **2022**, *12*, 524. [[CrossRef](#)]
39. Buswell, R.A.; Leal De Silva, W.R.; Jones, S.Z.; Dirrenberger, J. 3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *112*, 37–49. [[CrossRef](#)]
40. An, D.; Zhang, Y.X.; Yang, R. Incorporating Coarse Aggregates into 3D Concrete Printing from Mixture Design and Process Control to Structural Behaviours and Practical Applications: A Review. *Virtual Phys. Prototyp.* **2024**, *19*, e2351154. [[CrossRef](#)]
41. Luo, X.; Gao, J.; Guo, Z.; Li, S.; Liu, C.; Zhao, Y. Experimental Study on the Rheological Property of Cement Paste with Fly Ash and Brick Powder. *Powder Technol.* **2023**, *426*, 118635. [[CrossRef](#)]
42. Kubissa, J.; Koper, M.; Koper, W.; Kubissa, W.; Koper, A. Water Demand of Concrete Recycled Aggregates. *Procedia Eng.* **2015**, *108*, 63–71. [[CrossRef](#)]
43. Golewski, G.L. Assessing of Water Absorption on Concrete Composites Containing Fly Ash up to 30 % in Regards to Structures Completely Immersed in Water. *Case Stud. Constr. Mater.* **2023**, *19*, e02337. [[CrossRef](#)]
44. Miao, L.; Wen, M.; Jiao, C.; He, S.; Guan, X. Study on Desorption Characteristics of Water Vapor in Fly Ash Concrete Materials. *Case Stud. Constr. Mater.* **2024**, *20*, e03103. [[CrossRef](#)]
45. Perlite Institute. *Specifications Guide: Transit Mix Perlite Lightweight Concrete*; Perlite Institute: Harrisburg, PA, USA, 2019.
46. Pizoń, J.; Konečný, P.; Mynarz, M.; Bílek, V. Properties of Fine Graded Perlite-Based Lightweight Cement Mortars Subjected to Elevated Temperatures. *Buildings* **2023**, *13*, 2969. [[CrossRef](#)]
47. Jedidi, M.; Benjeddou, O.; Soussi, C. Effect of Expanded Perlite Aggregate Dosage on Properties of Lightweight Concrete. *Jordan J. Civ. Eng.* **2015**, *9*, 378–391. [[CrossRef](#)]
48. Yuan, J.; Li, W.; Wang, L.; Wang, J.; Yang, H.; Zhang, W.; Xiong, Z. Experimental Study on Surface Wrapping Strengthening of EPS Particles and Its Concrete Performance. *Sci. Eng. Compos. Mater.* **2022**, *29*, 23–36. [[CrossRef](#)]
49. Zhou, J.; Dong, Y.; Qiu, T.; Lv, J.; Guo, P.; Liu, X. The Microstructure and Modification of the Interfacial Transition Zone in Lightweight Aggregate Concrete: A Review. *Buildings* **2025**, *15*, 2784. [[CrossRef](#)]
50. Petrella, A.; Di Mundo, R.; Notarnicola, M. Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates. *Materials* **2020**, *13*, 988. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Lu, L.; Yang, Z.; Lin, Y.; Dong, S. Partial Replacement of Manufactured Sand with Homologous Granite Powder in Mortar: The Effect on Porosity and Capillary Water Absorption. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *376*, 131031. [[CrossRef](#)]
52. Ferreira, R.L.S.; Medeiros, M.; Pereira, J.E.S.; Henriques, G.F.; Tavares, J.C.; Marvila, M.T.; De Azevedo, A.R.G. Effects of Particle Size Distribution of Standard Sands on the Physical-Mechanical Properties of Mortars. *Materials* **2023**, *16*, 844. [[CrossRef](#)]
53. Marchment, T.; Sanjayan, J.; Xia, M. Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in Construction Scale 3D Printing with Mortar by Effective Bond Area Amplification. *Mater. Des.* **2019**, *169*, 107684. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Supplementary Materials

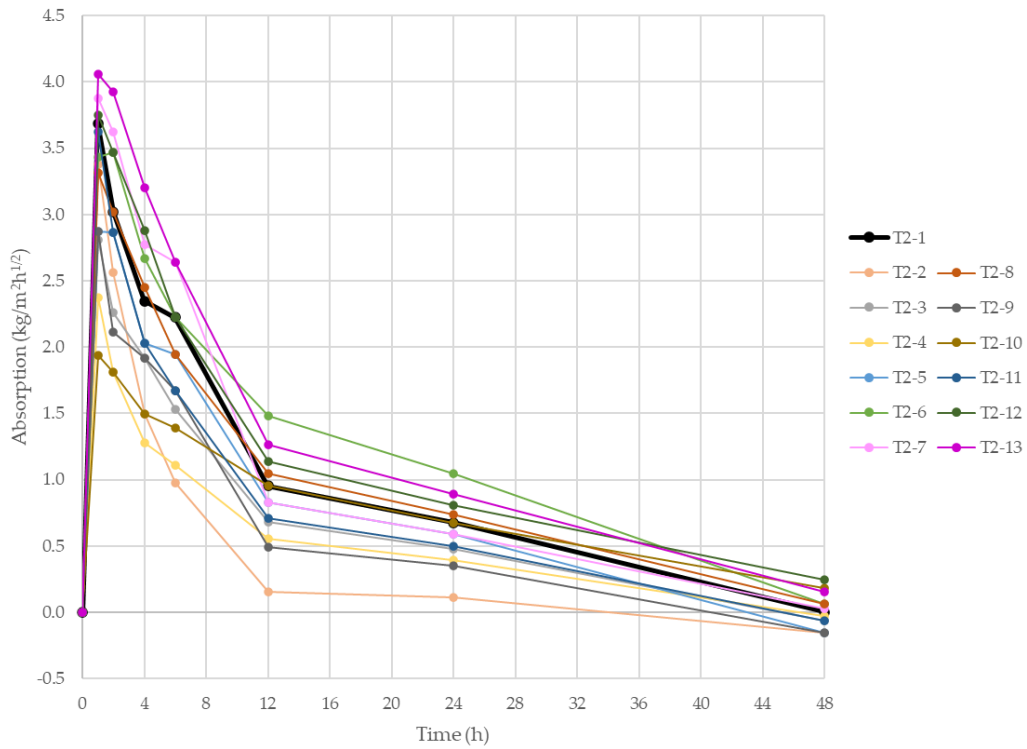


Figure S1. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in vertical positions – test 0-48 h.

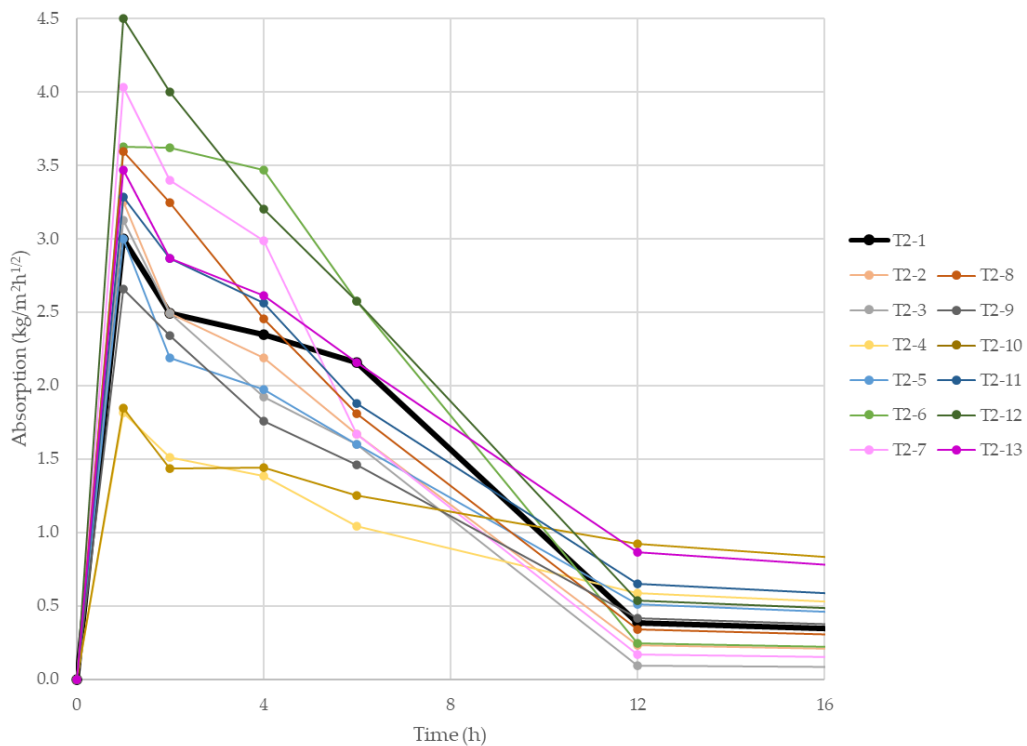


Figure S2. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in horizontal positions.

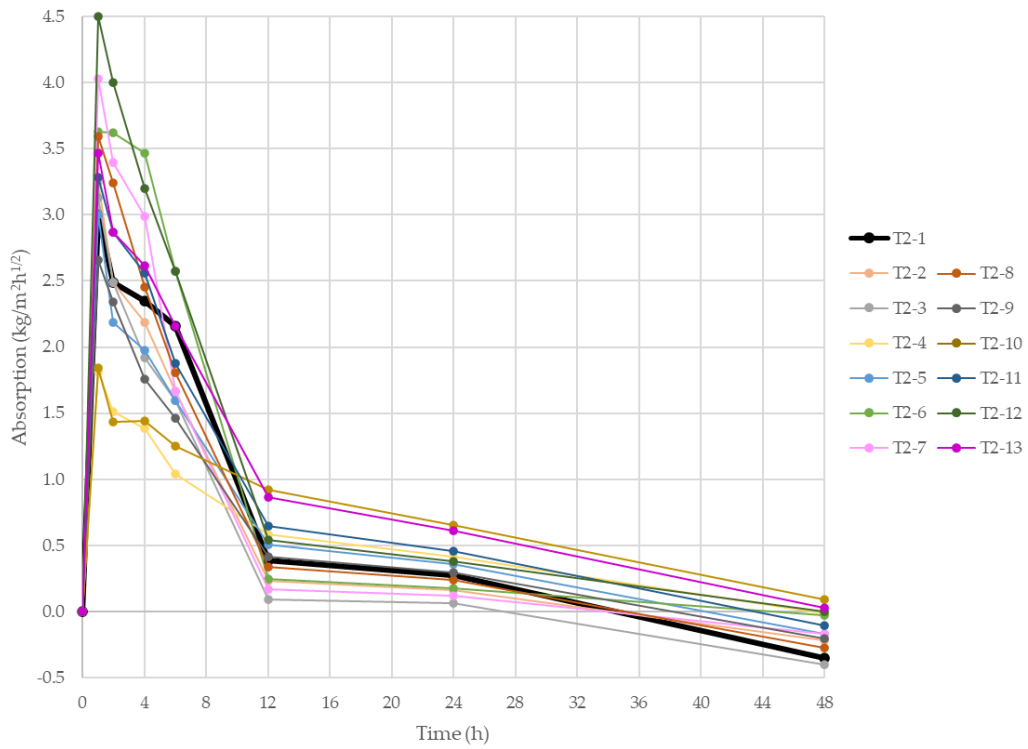


Figure S3. Absorption coefficient of 3D printed specimens with recycled components in horizontal positions – test 0-48 h.

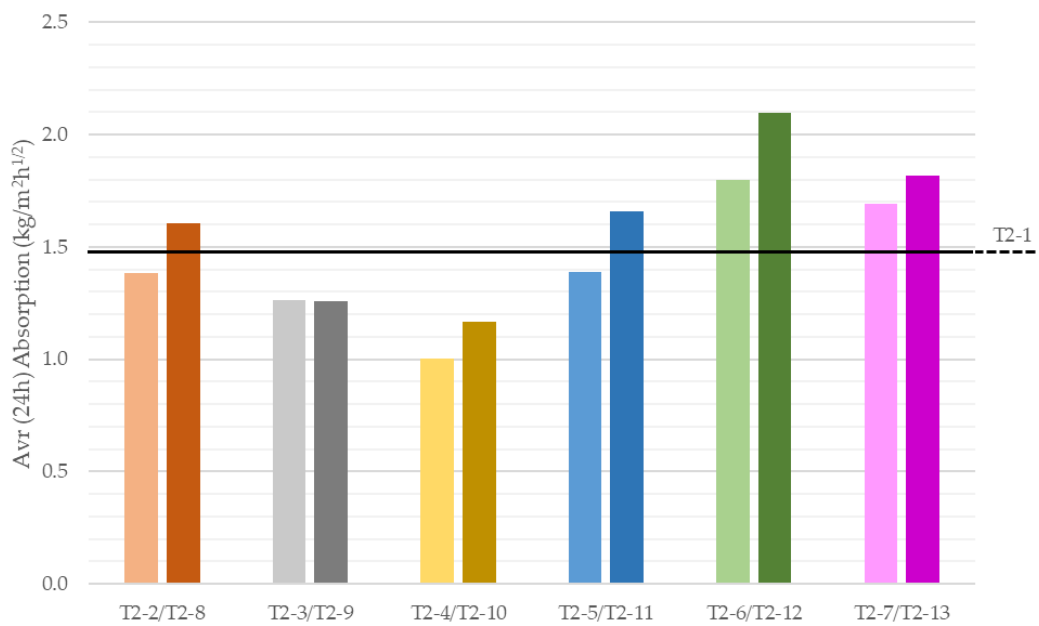


Figure S4. Average absorption coefficient from 24 hours of 3D printed specimens with recycled components in vertical positions.

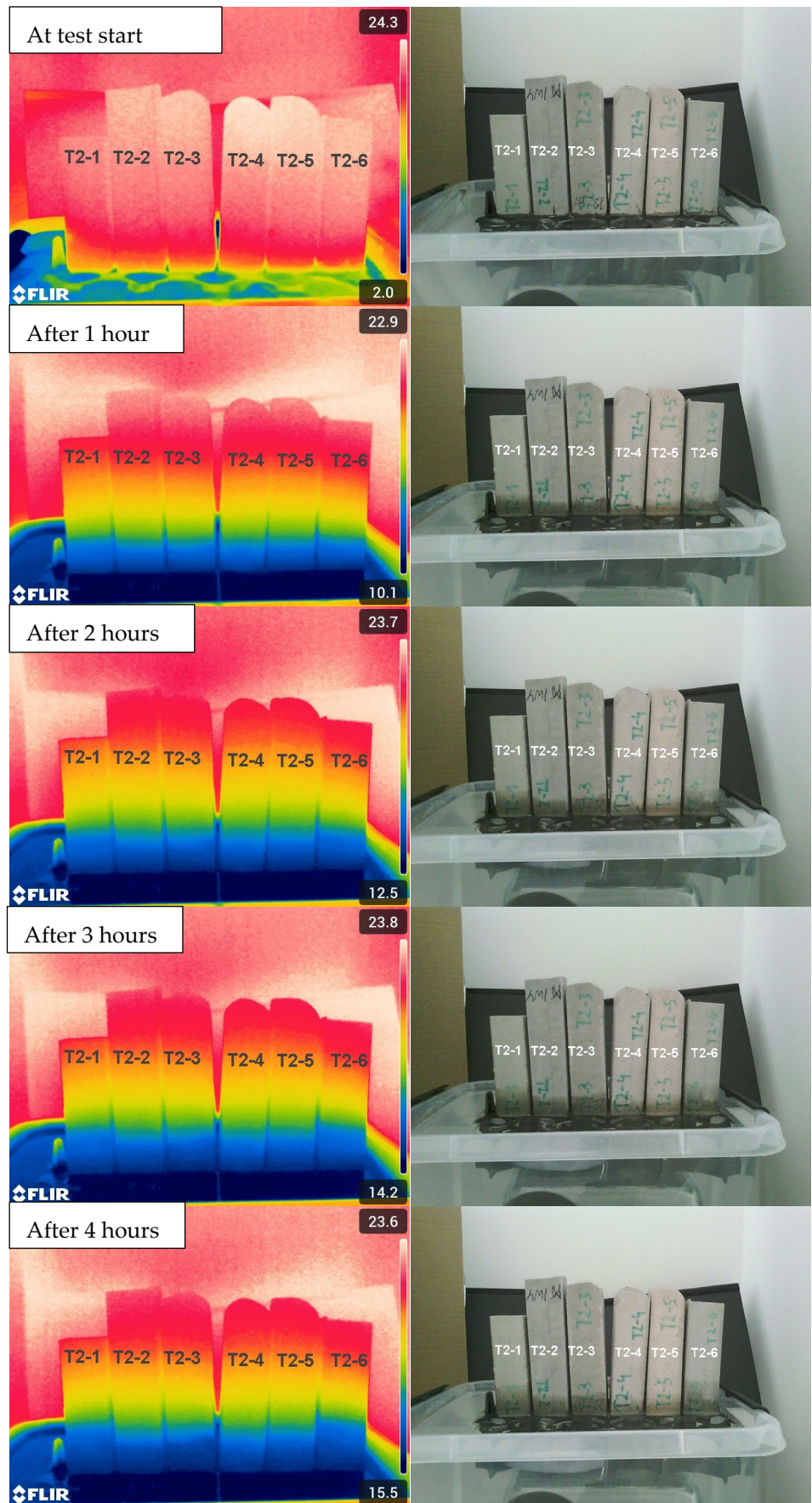


Figure S5. Images of the evolution of moisture dispersion in samples numbered 1 to 6, recorded in both visible and infrared light, as a function of time and depending on the composition of the tested sample.

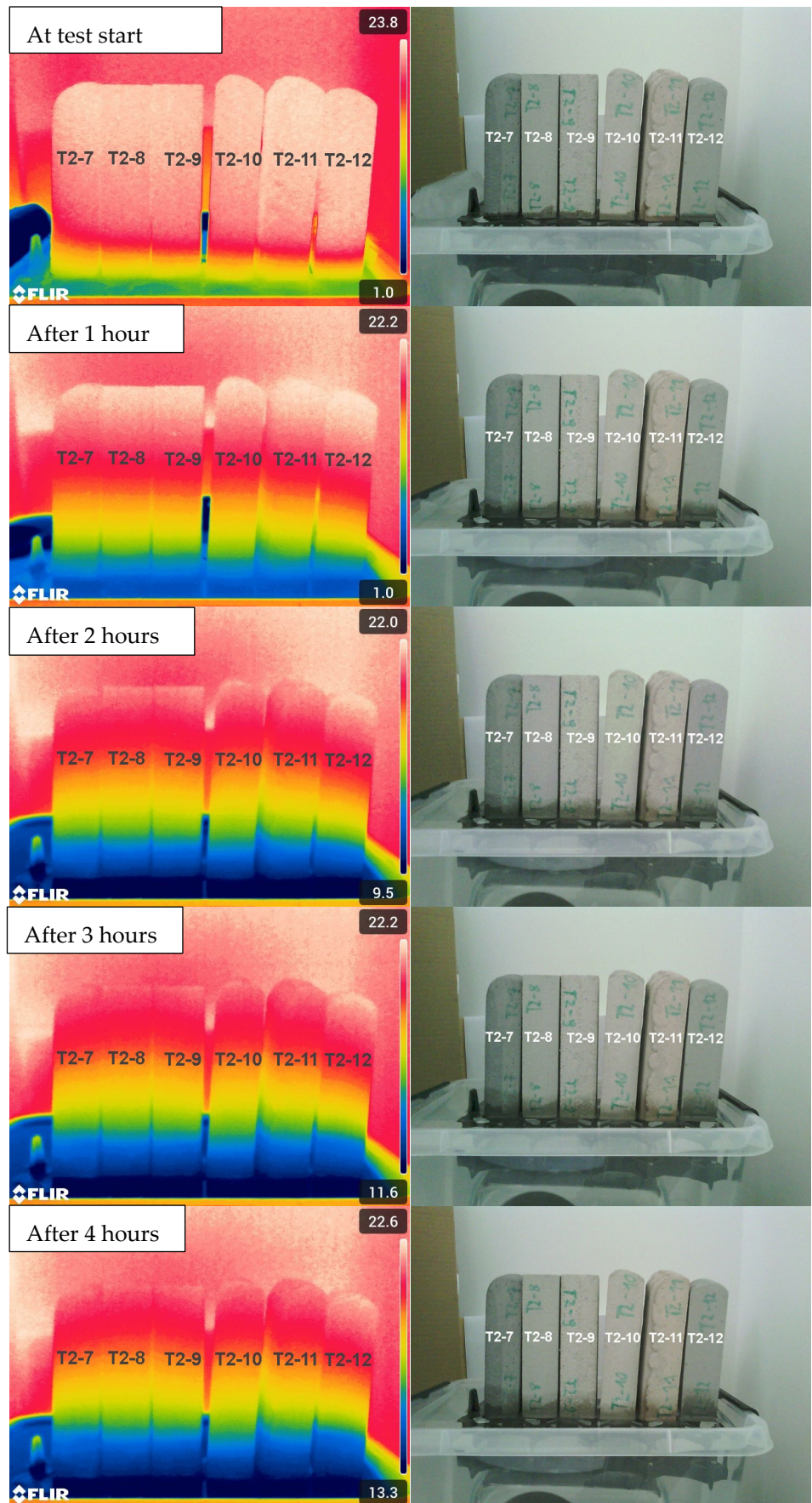


Figure S6. Images of the evolution of moisture dispersion in samples numbered 7 to 12, recorded in both visible and infrared light, as a function of time and depending on the composition of the tested sample.

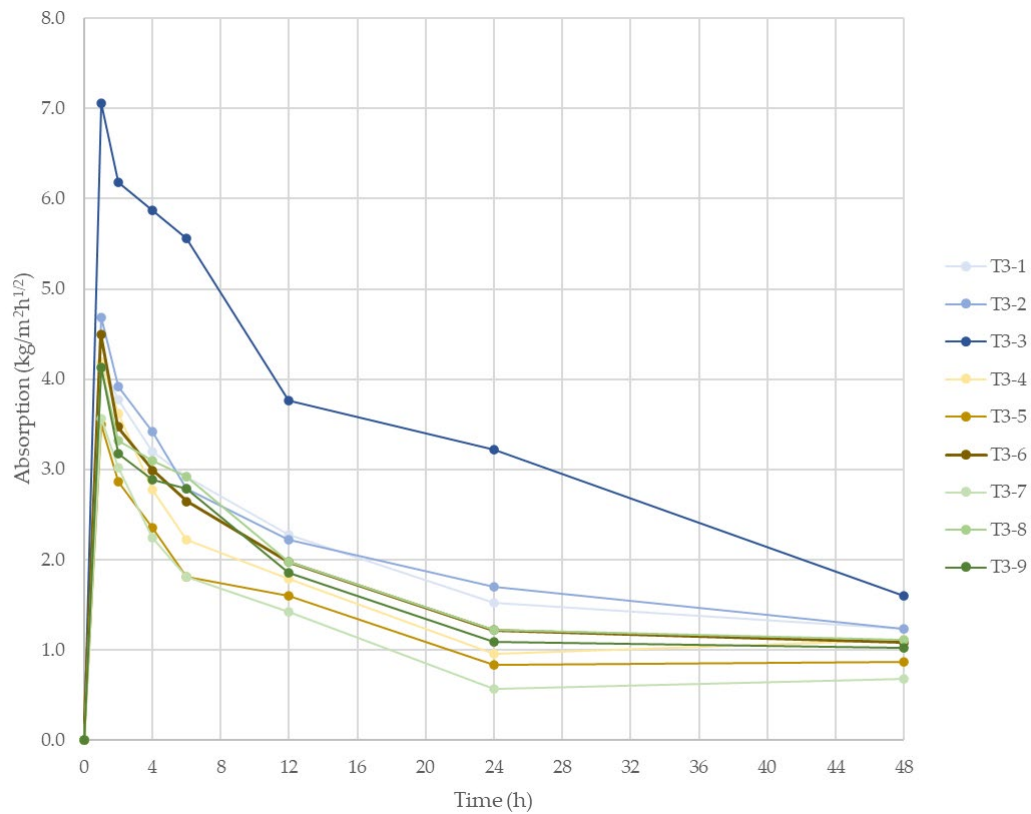


Figure S7. Absorption coefficient of 3D printed specimens with insulation components in horizontal positions – test 0-48 h.

Table S1. Summary one-way analysis of variance (ANOVA) of compressive strength results.

Specimens designation	<i>n</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
T2-1	4	15.3	0.3
T2-2	4	12.1	16.1
T2-3	4	11.5	19.4
T2-4	4	13.5	10.3
T2-5	4	15.1	32.7
T2-6	4	12.2	14.5
T2-7	4	14.0	45.7
T2-8	4	11.9	15.8
T2-9	4	15.5	15.1
T2-10	4	15.6	11.6
T2-11	4	15.8	36.5
T2-12	4	12.3	11.0
T2-13	4	11.9	2.5

A one-way analysis of variance (ANOVA) conducted for thirteen groups (T2-1 – T2-13) did not reveal statistically significant differences between the group means ($F = 0.63$, $p = 0.80$). The obtained results indicate that the observed differences between groups were small compared to the within-group variability.

Pairwise comparisons between group T2-1 and the remaining groups (T2-2 – T2-13) were performed using a two-sample t-test assuming equal variances.

Table S2. Two-sample t-tests (equal variances assumed) between T2-1 and other groups.

	T2-1	Significance
T2-2	0.0844	ns
T2-3	0.0692	ns
T2-4	0.1565	ns
T2-5	0.4734	ns
T2-6	0.0777	ns
T2-7	0.3549	ns
T2-8	0.0732	ns
T2-9	0.4514	ns
T2-10	0.4286	ns
T2-11	0.4373	ns
T2-12	0.0655	ns (trend)
T2-13	0.0037	***

ns – not significant; * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.005$

Significant differences were observed only for the comparison between T2-1 and T2-13 ($p = 0.0037$), indicating that the mean value of T2-13 was statistically lower than that of T2-1. All other comparisons yielded non-significant results ($p > 0.05$).

Kraków, 22.09.2025

OŚWIADCZENIE - PUBLIKACJA 4

Oświadczam, iż mój wkład w powstanie publikacji pt.: „*Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing*” opublikowanej w czasopiśmie *Materials* w 2025 roku, nr DOI 10.3390/ma18184387 jest zgodny z informacją zawartą w poniższej tabeli.

Jednocześnie oświadczam, iż wyrażam zgodę na wykorzystanie wyżej wymienionej publikacji jako części rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka.

Imię i nazwisko współautora	Wkład w powstanie publikacji
Marcin Maroszek	Sformułowanie problemu badawczego, opracowanie koncepcji i planu badań. Opracowanie metodyki postępowania i przygotowanie narzędzi programistycznych do archiwizacji oraz przetwarzania danych. Pozyskanie i obróbka surowców odpadowych poprzez kruszenie, mielenie oraz segregację rozmiarową. Przygotowanie mieszanek z udziałem surowców wtórnych i lekkich dodatków izolacyjnych. Kontrola właściwości materiału świeżego przez analizę konsystencji przy pomocy stolika rozpliwowego. Wykonanie próbek drukowanych w technologii 3DCP. Walidacji przyjętych rozwiązań, przeprowadzenie badań doświadczalnych i kontrola uzyskanych wyników. Udział w administracji projektu. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu oraz opracowanie wizualizacji wyników. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.
Magdalena Rudziewicz	Współautorstwo koncepcji pracy i doboru metodyki badań. Współudział w badaniach doświadczalnych oraz analiza wyników. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu oraz współautorstwo ostatecznej wersji tekstu.
Karina Rusin-Żurek	Dobór metodyki badań. Współudział w badaniach doświadczalnych oraz analiza wyników.
Izabela Hager	Współautorstwo koncepcji badań. Współudział w badaniach doświadczalnych.

Marek Hebda	Współautorstwo koncepcji badań, weryfikacja i walidacja przyjętych rozwiązań oraz uzyskanych wyników. Dobór metodyki badawczej. Nadzór merytoryczny oraz walidacja przyjętych rozwiązań i uzyskanych rezultatów. Pozyskanie finansowania na realizację badań oraz opłatę kosztów publikacyjnych. Współautorstwo w pisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.
-------------	--

Marcin Maroszek

.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Marcin Maroszek

Izabela Hager

.....
podpis oświadczającego
dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK

Magdalena Rudziewicz

.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Magdalena Rudziewicz

Marek Hebda

.....
podpis oświadczającego
dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK

Karina Rusin-Żurek

.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Karina Rusin-Żurek

Review

Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review

 Marcin Maroszek , Magdalena Rudziewicz  and Marek Hebda * 

Department of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland; marcin.maroszek@doktorant.pk.edu.pl (M.M.); magdalena.rudziewicz@doktorant.pk.edu.pl (M.R.)

* Correspondence: marek.hebda@pk.edu.pl

Abstract

Rapid population growth and accelerating urbanization are intensifying the demand for construction materials, particularly concrete, which is predominantly produced with Portland cement and natural aggregates. This reliance imposes substantial environmental burdens through resource depletion and greenhouse gas emissions. Within the framework of sustainable construction, recycled aggregates and industrial by-products such as fly ash, slags, crushed glass, and other secondary raw materials have emerged as viable substitutes in concrete production. At the same time, three-dimensional concrete printing (3DCP) offers opportunities to optimize material use and minimize waste, yet it requires tailored mix designs with controlled rheological and mechanical performance. This review synthesizes current knowledge on the use of recycled construction and demolition waste, industrial by-products, and geopolymers in concrete mixtures for 3D printing applications. Particular attention is given to pozzolanic activity, particle size effects, mechanical strength, rheology, thermal conductivity, and fire resistance of recycled-based composites. The environmental assessment is considered through life-cycle analysis (LCA), emphasizing carbon footprint reduction strategies enabled by recycled constituents and low-clinker formulations. The analysis demonstrates that recycled-based 3D printable concretes can maintain or enhance structural performance while mix-level (cradle-to-gate, A1–A3) LCAs of printable mixes report CO₂ reductions typically in the range of ~20–50% depending on clinker substitution and recycled constituents—with up to ~48% for fine recycled aggregates when accompanied by cement reduction and up to ~62% for mixes with recycled concrete powder, subject to preserved printability. This work highlights both opportunities and challenges, outlining pathways for advancing durable, energy-efficient, and environmentally responsible 3D-printed construction materials.

Keywords: 3D concrete printing (3DCP); recycled construction materials; supplementary cementitious materials (SCM); sustainable construction; circular economy; carbon footprint; life cycle assessment (LCA)



Academic Editors: Feng Rao and Hui Liu

Received: 9 September 2025

Revised: 25 September 2025

Accepted: 26 September 2025

Published: 28 September 2025

Citation: Maroszek, M.; Rudziewicz, M.; Hebda, M. Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review. *Materials* **2025**, *18*, 4517. <https://doi.org/10.3390/ma18194517>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Rapid population growth and accelerating urbanization impose unprecedented demands on the construction industry, particularly regarding the supply of aggregates and concrete. Global aggregate consumption is projected to reach 50–55 billion tonnes by 2030 [1], exerting significant pressure on natural resources and the environment. Concrete, the most widely produced construction material worldwide, accounts for approximately 70% of aggregate mixtures [2], with production largely dependent on Portland cement [3]. Substituting virgin constituents with recycled ones has emerged as a viable pathway to

lower embodied impacts while maintaining performance, chiefly by reducing extraction and transport burdens [4]. Concurrently, emerging technologies such as three-dimensional concrete printing (3DCP) provide additional opportunities for sustainable construction. 3DCP facilitates precise material deposition and significantly reduces waste generation; however, it requires the development of customized mix designs with optimized rheological and mechanical characteristics [5,6]. At the same time, new challenges have emerged, particularly those related to the thermal conductivity of printed layers and their implications for building thermal performance and occupant comfort. Recent advances demonstrate that 3DCP can facilitate the fabrication of wall systems with optimized internal geometries, allowing the integration of in-wall insulation and thereby enhancing the thermal performance of buildings [7–9].

This review synthesizes current evidence on the use of recycled materials in 3D concrete printing, highlighting how such approaches can reduce the environmental footprint of construction through printable binders and mortars aligned with circular-economy principles [10,11].

Environmental Issues

The built environment exerts large pressures on energy and material use, and EU policy (e.g., EPBD) continues to lower operational energy demand in buildings [12]. As operational loads decline, embodied impacts from materials become a major lever for mitigation at the product (cradle-to-gate) stage. In concrete, these impacts are driven primarily by cement production (clinker calcination), while aggregate extraction and processing contribute a smaller—but non-negligible—share [11,13–17]. Figure 1 summarizes global demand trends relevant to cement and aggregates, providing the macro context for material substitution.

At mix level, Portland cement typically dominates the embodied CO₂ of concrete (≈ 74 – 81%), with aggregates contributing ≈ 13 – 20% [18–20]. Reducing the clinker factor via supplementary cementitious materials and incorporating recycled constituents can therefore deliver meaningful, near-term reductions without sacrificing performance—especially when mixes are tailored for process windows specific to 3D concrete printing (3DCP). Figure 2 positions these material-level interventions within broader emission pathways, highlighting the importance of addressing product-stage impacts alongside operational efficiency. This review concentrates on that intersection: the role of recycled constituents in printable binders and mortars, their influence on fresh-state parameters and hardened/thermal performance, and consistent LCA reporting for cradle-to-gate assessments [13,20–23].

Despite rapid progress, evidence on recycled constituents for 3D concrete printing remains fragmented. Reporting of rheological properties relevant to printability is often inconsistent, with varying metrics and protocols for parameters such as yield-stress development, thixotropy, and open time. This lack of standardization complicates comparisons across studies. Similarly, links between mix design, interlayer bonding, and anisotropy—and their consequences for durability, transport performance, and fire or thermal resistance—are only partially established. Life-cycle assessments also show limited harmonization with respect to system boundaries, functional units, and the treatment of printing-stage energy and waste, which obscures a clear understanding of net environmental benefits. This review addresses these gaps by organizing rheology descriptors around printable windows, relating recycled constituents to directional and service performance of printed elements, and proposing a concise, 3DCP-specific LCA reporting checklist [10,24,25].

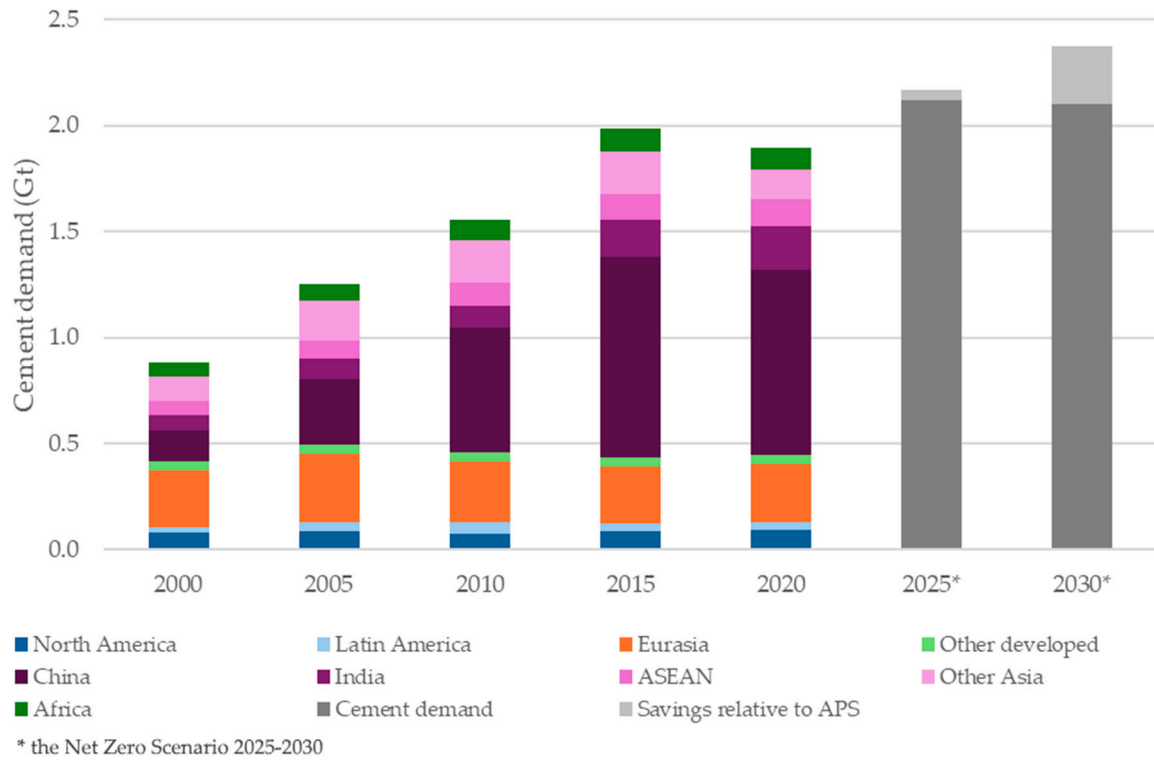


Figure 1. Global cement demand for building construction by region (2000–2020) and projections for 2025–2030 under the Net Zero Emissions (NZE) Scenario. The NZE Scenario (IEA) is a 1.5 °C-consistent pathway that reaches net-zero energy-sector CO₂ emissions by 2050; it assumes strong material-efficiency measures, clinker substitution, recycling, and deployment of low-carbon cements, which lower demand relative to the Announced Pledges Scenario (APS). Dark-grey bars show total demand in NZE; light-grey segments indicate savings relative to AP (ASEAN—Association of Southeast Asian Nations) [26].

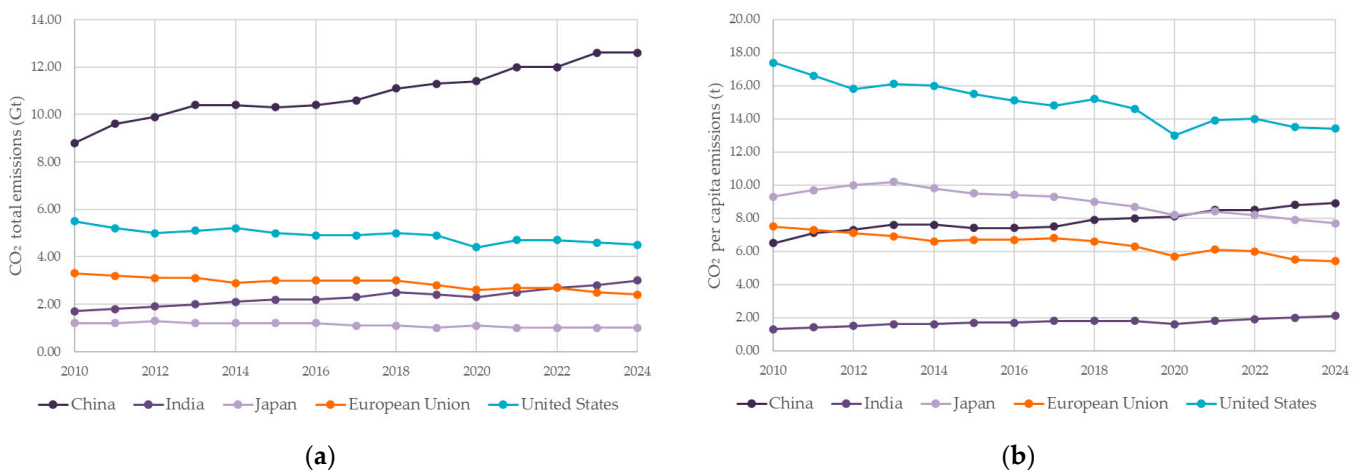


Figure 2. Carbon emissions trends varied widely across regions. CO₂ total emissions and CO₂ per capita emissions by region, 2000–2024: (a) CO₂ emissions, (b) emissions per capita [27–29].

2. Recycled Concrete Additives

This section focuses on supplementary cementitious materials (SCMs) and waste-derived fine fractions relevant to 3D concrete printing (3DCP). Materials with pozzolanic or latent-hydraulic activity—including fly ash, bottom ash (when finely ground), slags, silica fume and metakaolin—can partially replace Portland cement with documented effects

on rheology and strength development [30]. In 3DCP, mix design must satisfy process-critical rheological criteria—extrudability, filament shape retention and adequate open time—in addition to conventional mechanical targets [31]. Fine fractions of waste-derived materials, such as recycled fine aggregates (RFAs) or powders produced from the crushing of concrete, ceramics, or demolition bricks, play a particularly critical role in this regard. These constituents can function not only as substitutes for natural aggregates and mineral admixtures but also as modifiers of thixotropic behavior, thereby improving the printability of fresh mixtures.

Waste-derived fines are particularly impactful in this context. Recycled fine aggregates (RFAs) influence yield stress and open time, affecting pumpability and layer stability; excessive replacement generally compromises green strength and directional strength, even if buildability initially improves. By contrast, finely ground powders from crushed concrete/ceramics/bricks can enhance particle packing and structural build-up, which is advantageous for formwork-free printing where early stiffness governs print fidelity. The integration of such additives within 3DCP—complementary to geometry/material savings achievable by topology-optimized toolpaths—supports lower-clinker, resource-efficient mixes, provided rheology is tuned to the process window [32].

The following subsections characterize each recycled constituent and quantify its impact on fresh-state and hardened properties with respect to the specific performance requirements of 3DCP.

2.1. Addition of Fly Ash and Coal Bottom Ash

Fly ash (FA) is generated in coal-fired power plants during the combustion of coal, with substantial quantities historically stored in landfills, a practice associated with both environmental and economic drawbacks [33,34]. The incorporation of FA and silica fume (SF) as partial replacements for Portland cement reduces cement demand and thereby lowers the production cost of autoclaved aerated concrete (AAC) [35,36] while simultaneously improving selected performance properties [30,37]. FA particles are collected from flue gases by electrostatic precipitators, with particle size distribution depending on the collection point within the system. Material captured from downstream sections (e.g., rear hoppers) generally contains finer fractions. FA formation occurs when mineral impurities in coal, such as clay, feldspar, quartz, and shale, melt under combustion and subsequently solidify into spherical, glassy particles upon rapid cooling.

The properties of FA are influenced by several factors, including coal type, combustion conditions, and collection methods. Class F FA, derived from bituminous coal, is rich in silica, alumina, and iron but low in calcium, requiring activation with cement or lime. Class C FA, produced from lignite or sub-bituminous coal, contains higher calcium levels, facilitating accelerated strength development. Incorporating FA into concrete enhances workability, reduces drying shrinkage, and contributes to strength development (Table 1) while also providing a sustainable solution to the waste disposal problem. Due to its physical properties and availability, FA is also often used as a substitute for natural sand [38,39]. Chemically, FA typically contains silicon dioxide (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), iron oxide (Fe_2O_3), calcium oxide (CaO), and residual unburned carbon (approximately 90% of the remaining organic fraction). Its mineral composition includes crystalline phases (quartz, mullite, hematite) and amorphous glassy phases (silica glass) [40]. Owing to incomplete combustion and rapid cooling, FA particles adopt a predominantly spherical morphology [41,42]. A substantial fraction (65–90%) of FA particles are smaller than 0.01 mm, which, combined with their spherical shape, improves rheology, reduces interparticle friction, and facilitates a more homogeneous and easily pumpable mixture. For instance, Xu et al. [43] demonstrated that FA, due to its spherical morphology, initially reduces viscosity and

shear stress, thereby lowering yield stress and improving extrudability. When FA content exceeds approximately 20%, the increased water demand reverses earlier improvements and reduces flowability. This change in rheology directly affects printability: extrusion length rose from 40 mm to 91 mm with higher FA contents, but excessive levels (>30–40%) led to loss of layer stability and weaker interlayer bonding. Buildability was highest at 20% FA, with minimal deformation and preserved interlayer integrity, whereas higher replacement levels compromised structural stability. At moderate additions (~10–15%), FA improves rheology through a lubrication effect that lowers yield stress and viscosity; however, at higher dosages (>20–25%), this advantage is offset by greater water demand, resulting in reduced filament stability and print accuracy [44].

Recent studies highlight the potential of nano-fly ash (N-FA) in 3DCP. Taqa et al. [45] demonstrated that incorporating 5–15% N-FA significantly enhanced workability, increasing flow spread by up to 41.3%, reducing extrusion pressure, and improving print stability, which allowed a greater number of layers to be deposited without deformation. In mixtures containing polyoxymethylene (POM) fibers [46], FA addition improved rheological performance: at 20% FA, dynamic yield stress decreased by 21.69–32.89% depending on fiber content (1.5–2.5%), while plastic viscosity decreased by 16.95–21.58%. These results confirm the “ball-bearing lubrication” effect of FA, which facilitates paste flow, improves fiber dispersion, and enhances overall workability. The most favorable balance between printability and buildability was observed at 10–15% N-FA. At 5% N-FA, compressive strength increased by 19.4% (printed specimens) and 25.9% (cast specimens), while flexural strength improved by 46.1% and 33.4%, respectively. The maximum flexural strength gain of 52.5% was recorded for 10% N-FA in printed mixtures [45]. Tseng et al. [47] found that FA enhanced flowability due to the spherical morphology of its particles, reducing interparticle friction and improving extrusion uniformity.

Other studies [48,49] further corroborate these findings, indicating that an FA content of approximately 10% provides optimal improvements in rheological properties without significant loss of mechanical performance. For example, mixtures with 10% FA achieved flexural and compressive strengths of 18.5 MPa and 144.6 MPa, respectively, compared to reference values of 17.9 MPa and 136.4 MPa [48]. Moreover, compressive strength at 10% FA was 37.5% higher than that of mixtures with 20% FA [49]. Collectively, these results confirm that FA, particularly in nano-scale form, offers significant potential for improving both fresh-state properties and hardened performance in 3D printable concretes.

Table 1. Properties of fly ash used in conventional and 3D printed concrete.

FA Class	% Replacement in Cement	Particles Size	Density	Compressive Strength (MPa)	Specimens Type	Reference
F	10, 30, 50%	-	-	23.02 MPa, 19.73 MPa, and 19.25 MPa, respectively	cast specimens	[50]
F	50%	<10 μm	2.2 g/cm ³	46 MPa and 36 MPa, respectively	cast specimens	[51]
F	25, 50%	-	2.08	46 MPa and 36 MPa, respectively	3D-printed specimens	[47]
HFA (high-temperature fly ash)	35%	<400 μm	2.41 g/cm ³	40 MPa	3D-printed specimens	[52]
C	0%, 25%, 50%	<100 μm	-	29–40 MPa.	3D-printed specimens	[53]
F	5, 10, 15%	$\leq 1 \mu\text{m}$ (nano-FA)	$\sim 2.20 \text{ g/cm}^3$	Increase strength up to $\sim 35 \text{ MPa}$ after 28 days	3D-printed specimens	[45]
C	100%	-	-	32.63–34.86 (28 days)	3D-printed specimens	[48]

Coal bottom ash (CBA) is a by-product generated in conventional pulverized coal-fired boilers, where the heavier particles settle at the bottom of the combustion chamber. It is a porous, granular material with a dark coloration and a morphology resembling gravel or coarse sand. After drying and grinding (ground coal bottom ash, GCBA), it exhibits pronounced pozzolanic activity, which increases with particle fineness. In its dry state, CBA consists primarily of silica, alumina, iron oxides, and calcium oxide and may contain residual unburned carbon. The latter influences both the loss on ignition (LOI) and the water demand of mixtures containing CBA. Compared to coal slag, CBA demonstrates higher chemical reactivity, as it can react with calcium hydroxide generated during cement hydration to form additional calcium silicate hydrate (C–S–H) phases. This secondary hydration process enhances both the compressive strength and the impermeability of concrete. The literature suggests that fine coal bottom ash (CBA) improves pozzolanic reactivity and mechanical properties, but excessive fineness or high replacement levels can negatively impact rheology, increasing water demand and reducing mix stability [54].

According to [55], fly ash (FA) and bottom ash (CBA) originating from the same coal-fired power plant exhibit favorable compressive strength development and a chemical composition conducive to capillary pore refinement through the formation of reactive hydration products. This process leads to a modified pore size distribution, contributing to improved durability performance. The principal differences between FA and CBA are summarized in Table 2.

Table 2. Physical, chemical, and functional characteristics of fly ash vs. bottom ash [56].

Parameter	Fly Ash (FA)	Coal Bottom Ash (CBA)
Source	Particles from flue gas transport	Clinker-like lumps from boiler bottom
Density (g/cm ³)	2.18–2.32	2.20–2.40
Moisture content (%)	0.01–0.11	26.5–50.1
Median particle size (mm, d50)	0.01–0.03	0.42–2.19
Sand fraction (%)	3.5–7.5	39.8–56.9
Dust fraction (%)	77.6–90.2	5.3–18.0
SiO ₂ (%)	51.1–64.4	52.0–64.9
Al ₂ O ₃ (%)	19.4–27.9	17.9–24.7
Fe ₂ O ₃ (%)	3.5–8.0	4.9–9.6
CaO (%)	1.3–6.2	2.1–7.1
SO ₃ (%)	0–2.1	0–1.3
pH	8.1–12.8	8.3–9.7
Loss on ignition (%)	0.9–2.1	-
Practical properties	Improves workability, durability, increases compactness	Good permeability, water retention, mechanical stability

The utilization of coal bottom ash (CBA) in concrete technology has gained increasing attention owing to its economic benefits and environmental advantages. Ganesan et al. [57] evaluated CBA as a cost-effective fine aggregate replacement in combination with ultrafine slag material (Alcofine) as a partial cement substitute. The optimal mixture, comprising 40% CBA and 15% Alcofine, resulted in the highest compressive strength. Similarly, Chuang et al. [58] investigated the replacement of Portland cement with ground CBA (GCBA) in conjunction with fly ash (FA) derived from the same power plant. Their findings revealed that, at a water-to-binder ratio (W/B) of 0.5 and a 60% cement replacement by FA, compressive strength increased markedly from 11.00 MPa (7 days) to 40.75 MPa (180 days), demonstrating excellent long-term performance. For finely ground CBA (FGCBA), a 20% replacement level provided higher early (24.27 MPa) and final (44.10 MPa) strengths, while

a 60% substitution achieved only modest improvements (9.49 to 33.02 MPa), indicating reduced efficiency of FGCBFA at elevated dosages.

The pozzolanic potential of GCBA has been confirmed in multiple studies. The degree of grinding is critical: Oruji et al. [59] showed that GCBA with a median particle size of $D_{50} \approx 5 \mu\text{m}$ exhibits reactivity comparable to FA, while Guan et al. [60] demonstrated that finer particles improve mortar strength. Excessive grinding, however, can impair the rheological behavior of fresh mixes. Aydın [61] evaluated mortars with 25–70% CBA replacement and found that balanced substitution levels ensured satisfactory strength and durability. Similarly, Poudel et al. [62] reported optimal mechanical performance at moderate GCBA contents (10–20%). At higher replacement levels, additional measures such as nanomaterials or superplasticizers were required to maintain adequate properties. These distinctions are critical in determining the practical applications of FA and CBA. Fly ash, due to its high pozzolanic reactivity, is primarily employed as an active binder component in concrete mixtures. By contrast, the porous structure of CBA enhances water retention, but at high replacement levels it requires the addition of mix-modifying admixtures. The fundamental difference between the two materials lies in their chemical reactivity, very high for FA and moderate for GCBA, which dictates their suitability for specific applications. From an environmental standpoint, both materials present significant potential: FA reduces cement consumption and, consequently, CO₂ emissions, whereas GCBA can serve not only as a cement substitute but also as a fine aggregate or a raw material for eco-friendly brick production, offering a sustainable alternative to traditional fired clay products [63].

2.2. Addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag

Partial replacement of cement with ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) represents one of the principal strategies for producing sustainable concrete, as it effectively reduces the environmental footprint of construction materials. GGBFS, a by-product of the steel industry, is widely recognized for its capacity to enhance concrete durability, improve resistance to chemically aggressive environments, and lower CO₂ emissions. Substituting a portion of Portland cement with GGBFS not only reduces the demand for natural resources but also decreases the energy intensity of traditional cement production. As a result, slag-modified concrete offers a combination of environmental, mechanical, and durability benefits, making it a compelling alternative in sustainable construction practices.

GGBFS is produced during the manufacture of pig iron in blast furnaces (Figure 3). After tapping, the molten slag is routed either to an air-cooling yard or to a water-granulation trough. Slow air-cooling followed by aging, crushing and screening yields a largely crystalline air-cooled slag, typically used as road-base, coarse aggregate for concrete, or as cement raw meal. In contrast, rapid quenching with pressurised water produces a glassy granulated slag; when sieved it can serve as fine aggregate for concrete or asphalt, and when dried and ground it becomes ground granulated blast-furnace slag (GGBFS)—a latent-hydraulic and pozzolanic binder. Thus, the cooling route and point of collection control the properties and the end use of the slag. Due to these physico-chemical characteristics, GGBFS is extensively employed as a partial substitute for ordinary Portland cement (OPC), providing environmental, economic, and technological advantages. Notably, replacement of 50% OPC with GGBFS can reduce CO₂ emissions by up to 0.5 t per m³ of concrete [64].

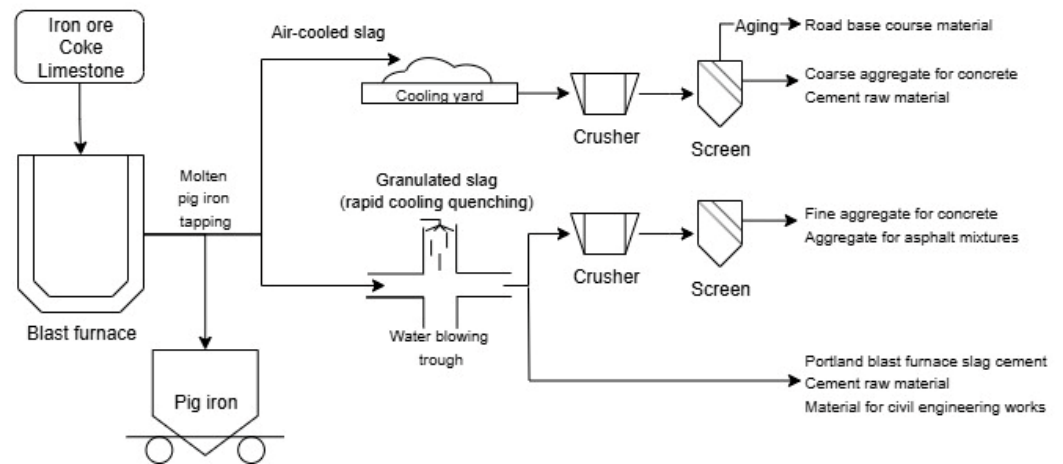


Figure 3. Production flow of the blast furnace slag [64].

The production process involves rapid cooling of molten slag through powerful water jets, resulting in a fine-grained, glassy material composed of approximately 95% amorphous phase. Following drying and grinding, GGBFS typically achieves a specific surface area in the range of 4250–4700 cm²/g, exceeding that of OPC, and exhibits a specific gravity of approximately 2.85–2.90 g/cm³, slightly lower than that of cement (~3.15 g/cm³) [65,66].

Chemically, ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) consists predominantly of CaO (30–50%), which governs its hydraulic activity; SiO₂ (28–38%), responsible for pozzolanic reactivity; Al₂O₃ (8–24%) and MgO (1–18%), which influence binding reactions; as well as trace quantities of Fe₂O₃, SO₃, Na₂O, and K₂O. The precise composition varies depending on the slag source, fluxes, and furnace feedstock.

Scanning electron microscopy (SEM) analyses reveal that GGBFS particles are angular, irregular in shape, and possess a rough texture with a relatively high surface area. This morphology increases the paste demand to ensure adequate particle coating, potentially affecting mix flowability. At the same time, the angular edges and rough surfaces improve interfacial bonding within the cementitious matrix, thereby enhancing density and reducing permeability. Hydraulic activity is strongly dependent on basicity, expressed as the CaO/SiO₂ ratio, with higher values correlating with greater reactivity. The hydration of GGBFS is slower than that of ordinary Portland cement (OPC) and typically requires activation (e.g., through cement, lime, or alkalis). The main hydration product is calcium silicate hydrate (C–S–H), which contributes to strength development and durability. Conflicting reports on the optimum substitution level (30% vs. 40%) stem from differences in fineness, CaO/SiO₂ ratio, and chemical activation. Finer, more reactive slags sustain higher dosages without early strength loss [67], whereas less reactive slags shift the optimum toward lower replacements. Akhlaq et al. [68] noted that balanced workability and strength typically occur in the 30–50% range, reinforcing the need for mechanistic evaluation of GGBFS in 3DCP rather than descriptive substitution ratios.

Partial replacement of OPC with GGBFS generally enhances workability up to substitution levels of approximately 40%, owing to the filler effect and improved particle packing. Beyond this threshold, workability tends to decline due to increased water demand and higher paste requirements; superplasticizers are therefore recommended. Studies consistently indicate that GGBFS replacement levels of 20–30% provide optimal improvements in compressive strength at both 28 days and later ages (56–90 days), driven by the combined effects of pozzolanic reactions and gradual hydration. From a 3D concrete printing perspective, the angular morphology and high surface area of GGBFS directly affect rheology at moderate replacements (~20–30%). They improve particle packing, filament cohesion, and extrudability, but at higher levels (>40%) they elevate yield stress and plastic viscosity

beyond the printable window, impairing flow and continuity [43,69]. The slower hydration rate extends the open time, favoring extrusion, yet delays green strength development, which can compromise buildability. At higher replacement levels (60–80%), compressive strength typically decreases due to the dilution effect, i.e., a reduced fraction of reactive cementitious components. GGBFS was found to primarily contribute to mix cohesion, enhancing interlaminar stability and deformation resistance at higher exchange rates [47]. Furthermore, the incorporation of GGBFS in 3D-printed concrete introduces a pronounced anisotropic behavior, where mechanical properties strongly depend on the loading direction relative to the printing orientation. Shoueb [70] demonstrated that compressive strengths of printed specimens were consistently lower than those of conventionally cast counter-parts, with reductions ranging between 26–35% due to interlayer voids and lower density of the printed filaments. Directional testing further revealed that compressive strength in the X-direction was approximately 16% lower than in Y and Z, highlighting the weaker bonding across filament interfaces. In flexural performance, specimens tested in the Z-direction (perpendicular to layer planes) exhibited superior behavior: the modulus of rupture was more than 42% higher and the fracture energy absorption capacity about 55% greater compared to specimens tested in the Y-direction. This enhancement is attributed to the increased interfacial area and compaction achieved by successive layering in the vertical direction. Conversely, the Y-direction reflected the weakest interlayer bonding, limiting tensile and flexural resistance.

Rahmat et al. [69] reported that ~30% GGBFS achieves the most favorable balance between workability and strength, whereas higher replacement levels result in reduced flowability and increased porosity. Shreyas [71] found that ~40% GGBFS provides the highest mechanical strength and workability in conventional concrete, but for 3D printing applications, 30% substitution ensures superior production efficiency. The delayed hydration kinetics of GGBFS introduce a dual effect in 3DCP, extended open time supports pumping and continuous extrusion, yet the slower development of green strength compromises buildability and dimensional stability of early layers. Xu [43] observed that GGBFS addition extends the initial setting time from ~7.5 to ~9 min. At ~20% GGBFS, extrudability is significantly enhanced, with continuous filament lengths reaching 98 mm, reflecting improved flowability and homogeneity. Conversely, at 40% replacement, paste viscosity increases, filament length decreases, and print quality deteriorates. Buildability, defined as the ability of successive printed layers to retain shape without deformation, is maximized at ~20% GGBFS, whereas higher contents reduce geometric stability and dimensional accuracy.

Beyond mechanical and rheological aspects, GGBFS markedly improves durability. Its incorporation enhances resistance to acids, sulfates, carbonation, and chloride ion penetration. The filler effect also reduces capillary porosity, leading to lower water absorption, improved freeze–thaw resistance, and increased concrete density. In 3D printing applications, it functions as a rheology-modifying agent at optimal dosages, improving extrudability, shape stability, and interlayer bonding. Mixtures incorporating combined GGBFS and fly ash (0–40%) have demonstrated an optimal balance between strength and workability. At higher replacement levels, however, the use of chemical admixtures becomes necessary to ensure adequate viscosity and formability.

2.3. Addition of Coal Slag

Coal slag (CS) is produced under high-temperature coal combustion conditions, typically in boilers with forced air systems or in fluidized bed furnaces. It forms in the lower section of the combustion chamber, where it vitrifies as a result of rapid quenching with pressurized water. The material occurs as hard, glassy granules—often brick-red when

fully combusted or dark gray when partially combusted—containing approximately 50% silica and significant amounts of alumina (Table 3) [72]. Depending on the cooling rate, coal slag may have a porous or dense structure. It exhibits a bulk density in the range of 700–1800 kg/m³, high water absorption of up to 20%, and porosity reaching 60%. The pronounced water absorption capacity of CS increases the static yield stress and accelerates structural build-up, thereby reducing the open time and adversely affecting pumpability. Furthermore, its inherent porosity intensifies internal friction, which results in elevated viscosity and diminished flowability through the nozzle [73]. Conversely, the rough and angular surface morphology enhances mechanical interlocking with the surrounding paste, thereby promoting stronger interlayer adhesion and improving the structural stability of the printed filaments [74]. Tao, Y. et al. demonstrated that, in 3D concrete printing, increased surface roughness and mechanical interlocking enhance interlayer bond strength and structural stability, with substrate roughness exerting a particularly significant effect on bond performance [75].

Its suitability for construction applications depends on limiting the presence of unburned carbon, sulfates, iron sulfides, and other contaminants that may adversely affect concrete performance [76]. Owing to its rough, irregular surface and favorable particle shape, CS is mainly used as a coarse aggregate in concrete, particularly in high-performance concrete (HPC), where it can improve paste–aggregate bond strength and reinforce the interfacial transition zone (ITZ). While its chemical properties are relatively stable, CS exhibits little pozzolanic reactivity; its role in concrete mixtures is primarily mechanical.

According to Smarzewski, the high porosity of CS promotes intensive absorption of mixing water, and both porosity and water absorption increase with higher CS content. In mixtures containing 30% CS, porosity and absorption increased by 11.3% compared to the reference mix, while density decreased by 7.8% [77]. A reduction in particle density decreases the self-weight of extruded mixtures, which can be advantageous for buildability. However, the concomitant increase in water uptake elevates the static yield stress and accelerates thixotropic structuration, thereby heightening the risk of pump or nozzle blockage at higher replacement levels. Consequently, the incorporation of superplasticizers or viscosity-modifying admixtures is commonly required to re-establish adequate flowability and to ensure sufficient open time for successful printing [78]. Regulatory standards define acceptable limits for loss on ignition, particle size distribution, foreign matter content, and natural radioactivity [79]. In addition to concrete applications, coal slag can also be used in geopolymers [80]. Moreover, in geopolymer systems, the reaction mechanisms and setting kinetics are strongly governed by the Si/Al ratio. Careful adjustment of CaO/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ proportions enables control over workability, early-age strength, and durability, which is particularly relevant for 3D printing applications [81]. Khargerdi et al. demonstrated that adding up to 10% CS by cement mass slightly increased compressive strength, reduced water absorption, and improved durability [82]. The authors' previous studies have incorporated CS into foamed mixtures intended for 3D concrete printing. Results indicated that mixes containing CS combined with rigid fibers—such as basalt and glass fibers—achieved the highest flexural strengths of 4.14 MPa and 2.39 MPa, respectively [83]. Furthermore, partial replacement of cement with CS contributes to CO₂ emission reductions. For concrete with CS, raw material production accounts for up to 90% of total emissions. At 30% CS content, the CO₂ emission per unit of compressive strength (per MPa) was reduced by 0.13 kg compared to OPC concrete, making CS a favorable material from a sustainable construction perspective [84].

Table 3. Comparative analysis of coal slag oxide composition.

Oxides	Liu et al. [85]	Rezayt Khargerdi et al. [82]	Trinh et al. [80]	Rudziewicz et al. [83]	Ren et al. [84]
Na ₂ O	0.58	1.21	0.43	-	1.78
MgO	2.06	1.65	1.40	1.20	1.47
Al ₂ O ₃	22.19	22.84	24.2	31.94	15.93
SiO ₂	58.55	44.22	54.4	48.38	43.11
SO ₃	0.33	2.72	-	3.41	0.62
SrO	0.23	-	-	0.20	-
K ₂ O	2.36	4.5	3.59	2.61	1.30
CaO	6.28	1.28	1.30	1.73	16.69
TiO ₂	1.13	1.72	0.78	1.71	-
P ₂ O ₅	0.22	0.40	0.08	0.60	-
Cr ₂ O ₃	0.04	-	-	0.03	-
MnO	0.06	-	0.03	0.02	-
Fe ₂ O ₃	5.66	19.5	-	7.66	18.60

Compressive strength increased substantially with the addition of CS—after 28 days, improvements ranged from 15.4% (10% CS) to 22.9% (30% CS) and after 730 days from 9.4% to 20.2%. Splitting tensile and flexural strengths also improved, with splitting tensile strength increasing by 8–9% at 28 days and 2–3% at 730 days. Flexural strength gains were particularly notable in early-age curing for mixtures with 10–20% CS [77].

2.4. Addition of Silica Fume

Silica fume (SF), a by-product generated primarily during metallurgical operations in electric arc furnaces, is extensively employed as a supplementary cementitious material in cement and concrete composites. Owing to its ultrafine particle size and high pozzolanic reactivity, SF significantly enhances both the mechanical performance and durability of cement-based materials. Its incorporation reduces matrix porosity, increases resistance to chemical degradation, and improves freeze–thaw durability [86].

From a sustainability perspective, the partial substitution of ordinary Portland cement with SF contributes to reducing CO₂ emissions, thereby supporting the objectives of sustainable construction practices. The combined action of its microfiller effect and pozzolanic activity promotes refinement of the concrete microstructure, densification of the interfacial transition zone (ITZ), and an overall extension of service life under aggressive environmental conditions [87,88].

2.5. Waste Glass Powder

Ground waste glass (WGP) contains a high fraction of amorphous silica and, when sufficiently fine, exhibits pozzolanic reactivity beneficial to printable binders. Particle size is critical—the pozzolanic response becomes pronounced below ~300 µm. Fine fractions also provide a filler/packing effect, refining the microstructure and supporting strength development [62,89–91].

At low replacement levels (~5–15%) and after extended curing (e.g., 56–90 days), multiple studies report compressive-strength gains over reference mixes, attributed to the combined pozzolanic and filler mechanisms [90–92]. With respect to durability and microstructure, very fine glass particles (<75 µm) tend to mitigate alkali–silica reaction (ASR) and densify the ITZ by supplying nucleation sites for secondary C–S–H; by contrast, coarser or inert fractions can behave as flaws, weakening the ITZ and amplifying anisotropy [93–96]. Consistent with these mechanisms, reducing particle size and optimizing gradation at a fixed replacement level systematically improves performance; for example, at ~20% cement replacement, downsizing from ~74 µm to ~38 µm increased 14–90-day

compressive strength, while tailored gradation improved interlayer adhesion and flexural strength, particularly under bending perpendicular to the print direction [97–99].

From a process standpoint in 3DCP, small–moderate WGP dosages improve matrix packing, can broaden the printability window, and stabilize buildability, whereas very high replacements may shorten open time unless viscosity is returned [100].

Cross-reference: The use of WGP (as an SCM) is discussed in the summary of process-related effects and in the LCA context. In Section 2.6, recycled glass is treated solely as aggregate.

2.6. Addition of Construction and Demolition Waste

Recycled materials obtained from construction and demolition waste (CDW)—notably recycled coarse aggregate (RCA), recycled fine aggregate (RFA), crushed bricks, and waste glass—are increasingly recognized as sustainable alternatives to natural aggregates in concrete production. RCA, produced from crushed demolition concrete, is widely applied as a substitute for natural coarse aggregates, yielding notable environmental benefits by reducing landfill disposal and limiting the extraction of virgin resources. RFA, derived from the finer fractions of crushed concrete, can partially replace natural sand; however, its use is often associated with increased water absorption and reduced workability of fresh mixes. Crushed bricks, predominantly sourced from demolition debris, are also incorporated into concrete, primarily for non-structural applications due to their relatively lower strength and higher porosity compared with natural aggregates. Waste glass, when properly processed and sized, may serve as a fine aggregate in 3DCP. For binder-level use of ground waste glass (WGP) and particle-size effects, see Section 2.5 (“Waste Glass Powder”).

Beyond RCA, RFA, bricks, and glass, CDW encompasses a wide spectrum of additional materials with potential applications in concrete production, including wood, gypsum, plastics, metals, and asphalt. CDW can be broadly classified according to its origin, distinguishing between anthropogenic sources (e.g., construction, renovation, demolition activities) and natural disasters (e.g., earthquakes, floods, hurricanes, tsunamis). Although not all CDW fractions are suitable for direct incorporation as primary concrete constituents, several—once adequately processed—exhibit potential as supplementary fillers or additives. For instance, finely ground reclaimed asphalt pavement has been successfully incorporated into road and composite concretes, contributing to improved durability in specific applications. Gypsum waste, while often considered a contaminant in recycled concrete streams, has been investigated to a limited extent as a mineral additive. Plastics such as shredded PVC and polyethylene waste have been explored as lightweight aggregates or fibers to tailor rheological and mechanical properties, although challenges remain regarding long-term durability and fire resistance. Metal waste is typically recycled outside the concrete industry; in certain cases it has been employed as dispersed reinforcement or as a component contributing to improved thermal conductivity.

Beyond the need to ensure appropriate grading of waste-derived feedstocks, a major limitation is the risk of their inherent variability and potential contamination, and the resulting impact on mechanical properties; these factors necessitate rigorous mix-design strategies and strict quality-control measures. Sulfate-bearing gypsum residues, frequently present in fine recycled aggregates, may trigger internal sulfate attack and expansion; accordingly, standards cap water-soluble sulfate in aggregates (e.g., $\leq 0.2\%$ by mass in EN 206 [101]), and best practice stresses selective demolition to avoid gypsum intrusion [102]. Adhered old mortar further elevates water absorption and porosity—often several-fold relative to natural aggregate—thereby shifting mix water demand and degrading the ITZ, which is consistently linked to strength penalties [103,104]. Impurities such as clay, gypsum/plaster, asphalt, wood, or paint have been reported to depress compressive strength

even at modest contents, underscoring the need for upstream separation and contamination screening [105]. Moreover, limits on specific contaminants (e.g., bituminous/asphaltic constituents $\leq 10\%$ by mass in EN 12620 guidance) should be combined with process controls such as moisture and absorption management (pre-saturation) and batch-wise rheology monitoring to maintain printable mixtures within the extrusion window [106,107].

Table 4 summarizes the mechanical properties of recycled aggregates used in three-dimensional concrete printing (3DCP). The incorporation of recycled sand, recycled coarse aggregate, waste glass, or plastics generally results in a reduction in compressive strength, particularly at higher substitution levels of natural aggregates [108,109]. This decrease in strength is primarily associated with the increased porosity of the matrix and the weaker bond at the aggregate–cement interface. For instance, the smooth surface texture of recycled glass particles may hinder effective bonding within the interfacial transition zone (ITZ) [110]. Furthermore, the presence of adhered residual mortar on recycled concrete aggregates can act as a structural weakness, negatively affecting both the mechanical integrity and long-term durability of the composite [111]. These microstructural features directly affect rheological parameters critical for extrusion. Increased porosity and adhered residual mortar elevate the static and dynamic yield stress as well as the plastic viscosity, which in turn shortens the open time and impairs pumpability and extrudability. For instance, Cavalcante et al. [112] reported that replacing 50% of cement with recycled concrete powder nearly tripled both static and dynamic yield stress compared with control mixes, moving the values outside the optimal extrusion range (280–600 Pa). These rheological shifts result in poor nozzle flow and reduced buildability unless compensated by superplasticizers or supplementary cementitious materials. Complementary studies [113] confirmed that partial replacement of Portland cement with recycled concrete powder (RCP) of up to 50% by mass produces similar trends in both rheological and mechanical behavior. Increases in static yield stress and thixotropic build-up were mainly attributed to physical effects associated with hydration kinetics and particle packing. Despite these rheological limitations, successful fabrication of a printed prototype with 50% cement replacement was achieved, demonstrating the technical feasibility of such high substitution levels. The deliberate adoption of this elevated ratio illustrates a more radical approach to reducing the environmental impact of printable mixtures driven by their high cement content while recognizing the inevitable trade-off in mechanical strength. Although the incorporation of these unconventional CDW-derived constituents remains largely experimental, their potential to support circular-economy strategies and reduce CO₂ emissions positions them as a promising pathway toward more sustainable construction materials.

Table 4. Overview of Recycled Aggregate Behavior in 3DCP [114].

Recycled Materials	Replaced Materials	Replacement Ratio [%]	Particle Size [mm]	Fresh Properties	Mechanical Properties	References
Recycled sand	Natural sand	12.5–50	0.9	Increased extrudability	Slight reduction in compressive strength, limited effect on anisotropy	[109]
Recycled sand	Natural sand	50–100	3	Decreased workability	Increased porosity, reduced strength with higher replacement rates	[115]
Recycled concrete coarse aggregate	Quarry stone	50–100	5–12	Decreased flowability; increased buildability; shorter open time	Yield stress grows exponentially with time; shear modulus grows linearly	[116]

Table 4. Cont.

Recycled Materials	Replaced Materials	Replacement Ratio [%]	Particle Size [mm]	Fresh Properties	Mechanical Properties	References
Recycled concrete coarse aggregate	Nature coarse aggregate	50–100	5–12	Increased buildability	Decrease in strength with increased replacement ratio and age	[111]
Fine recycled aggregates (concrete & brick)	Natural fine aggregate	25–100	-	Fresh consistency ≥ 150 mm	Compressive strength (>50 MPa at 28 days); acceptable for 3D printing	[117]
Recycled brick aggregate	Natural aggregate	64	4.75	-	Reduction in strength due to porous RBA	[118]
Recycled glass	Natural sand	50	0.796	-	Increased porosity, negative impact on flexural strength	[99]
Recycled glass	River sand	100	0.15–1.7	Better flow properties	Lower buildability and mechanical properties	[110]
Recycled plastic eco-aggregate (RESIN8)	Natural sand	5–15%	<1 mm/ <5 mm	Higher flowability, lower thixotropy; poorer buildability	Decrease in compression and flexural strength; improved interlayer bond strength	[119]
Polyethylene terephthalate (PET)	Natural sand	10–50	4	Decreased buildability	Decreased buildability and mechanical properties, improved freeze–thaw resistance	[120]
Recycled plastic waste	Natural sand	5–15	5	Increased flowability and porosity	Decreased strength	[119]
Recycled crumb rubber	River sand	15	2.36	-	Anisotropic compressive strength	[121]
Waste tire rubber	Natural sand	25–100%	1–3	Decreased workability	-	[122]
Waste tire rubber	Natural sand	50	1–3	-	Lower environmental impact and energy effectiveness in 3D printing	[123]
Rubber aggregates	Natural sand	5–15	0.1–3	Decreased extrudability, improved buildability	-	[124]
Copper slag as fine aggregate	River sand	up to 100%	-	Increased workability	Mechanical properties can be maintained at full sand replacement (requires mix optimization)	[125]
Steel slag as fine aggregate	River sand	up to 100%	-	Mixtures fall within the printability window; good buildability	Printable elements; strength depends on steel slag aggregate-to-cement ratio (SA/C)	[126]

Recycled Concrete Aggregate (RCA) is a secondary raw material obtained through the processing of construction and demolition waste, primarily originating from dismantled concrete structures. By definition, RCA consists of natural aggregate particles partially

coated with remnants of hardened cement paste (adhered mortar), which strongly influences its physical, mechanical, and durability-related properties. The production process typically involves selective demolition, mechanical crushing—most often performed in two stages—and subsequent separation of contaminants such as reinforcing steel, wood, or plastics [127]. The processed aggregate is subsequently classified into coarse fractions (5–32 mm) and fine fractions (<5 mm), the latter referred to as Recycled Fine Aggregate (RFA), which is particularly relevant for 3D concrete printing (3DCP) due to pumping and nozzle size constraints in printing systems [73,128]. The incorporation of fine recycled concrete aggregates (FRCAs, <4 mm) into 3D-printable mortars has been shown to increase static yield stress and plastic viscosity owing to their elevated surface area, porosity, and residual adhered mortar. At a 50% replacement level, Sbardelotto et al. [129] observed reduced flowability and shortened open time, accompanied by enhanced structural build-up and interlayer stability. Consequently, FRCA can improve buildability but adversely affect extrudability, necessitating higher dosages of superplasticizers to maintain adequate nozzle flow.

Impact of RCA/FRCA on Extrusion-Relevant Rheology: Quantitative Benchmarks

For extrusion systems in 3DCP, it is useful to consider three operating “windows” of a printable mixture: pumpability (low resistance to flow in the line), extrudability (governed mainly by dynamic yield stress), and buildability (governed mainly by static yield stress). Consolidated reviews and experimental studies report typical ranges: a pumpability zone on the order of tens of Pa in the line (higher values promote blockages); an extrudability window often ~0.1–0.5 kPa for dynamic yield stress (occasionally up to ~0.9 kPa); and buildability requiring static yield stress \approx 500–600 Pa (with plastic viscosity ~2–10 Pa·s, ~8 Pa·s in representative studies) for stable layer-by-layer deposition; higher viscosities and yield stress improve green load-bearing capacity but shorten open time and increase required pump pressures [130,131].

Data for mixtures containing RCA/FRCA show a systematic increase in static and dynamic yield stress and in plastic viscosity, as well as an accelerated structural build-up, which improves buildability at the expense of extrudability and open time. For 20% RCA, reports indicate dynamic yield stress \approx 944.5 Pa ($t = 0$ min) rising to \approx 1676.4 Pa ($t = 30$ min)—outside the typical nozzle range for extrusion; these values were reduced using a superplasticizer without increasing w/b (this also holds for FRCA) [123,124]. Introducing 25% and 50% FRCA increased static/dynamic yield stress and the rate of structural build-up; in studies on mortars with recycled sand, buildability increased by ~33% and ~83%, respectively, while flowability decreased and open time shortened. Review papers emphasize that keeping FRCA-bearing mixes within the ~0.1–0.5 kPa (dynamic) range, occasionally up to ~0.9 kPa depending on system: superplasticizers (often with tailored polymer architecture), which lower yield stress and plastic viscosity at constant w/b ; SCMs/particle packing, to counter the effects of porosity and specific surface area of adhered mortar; and optionally rheology regulators (e.g., sodium gluconate) to slow the growth of yield stress over time and extend open time. As operational targets for FRCA mixtures, we recommend: $\tau_{0,dyn}(t = 0) \leq 600$ Pa, the time-dependent increase in dynamic yield stress during printing kept within the capacity of the pump/system, and plastic viscosity maintained at the lower end compatible with the required cross-section stability of the filament [130–135].

RCA particles differ from natural aggregates (NAs) primarily in terms of bulk density, which typically ranges between 2.1–2.4 g/cm³, compared to 2.5–2.7 g/cm³ for NAs, a reduction of up to 17% [136]. Nevertheless, their rougher surface morphology may improve mechanical interlocking with fresh paste, potentially benefiting interlayer bond

strength in 3D-printed structures. Beyond the well-recognized weakening of the interfacial transition zone (ITZ) due to adhered mortar or smooth glassy surfaces, the pore structure of recycled aggregates also governs interlayer adhesion in 3DCP. Liu et al. [94] reported that larger and irregular pores concentrated near the aggregate surface disrupt paste continuity across layers, reducing local bonding and promoting microcracking at the interface. This highlights that porosity is not only detrimental to bulk strength but also a decisive factor in anisotropic behavior of 3D-printed elements, where weak interfaces become the primary failure planes.

In response to these challenges, research efforts have increasingly shifted towards RFA in 3DCP applications. Compressive strengths reported for RFA-based mixtures range from 25 to 60 MPa [137,138]. Reddy et al. [32] demonstrated that the compressive strength of 3D-printable concretes varies significantly with the level of RFA replacement. Similarly, Khatib [139] reported that partial replacement of natural fine aggregate with RFA in the range of 25–75% yields compressive strengths comparable to control mixes, whereas complete replacement results in notable strength reduction. Strength losses associated with increasing RFA contents have been observed consistently across all build directions (X, Y, Z), with reductions ranging from 9.4–29.2% in X, 12.5–33.1% in Y, and 14.9–40.0% in Z [140,141].

In addition to conventional RFA, other secondary materials with appropriate particle size distributions have been investigated for 3DCP, including crushed waste brick and recycled glass. Brick waste, predominantly derived from the demolition of masonry and ceramic elements, typically ends up in landfills, contributing to land-use pressure and environmental degradation [142]. Consequently, its reuse in 3D-printed concrete (3DPC) has attracted considerable interest [143]. When crushed to fine fractions (<4 mm), waste brick can function as RFA, while ceramic brick powder (CBP), obtained from finely ground waste brick, has potential as a partial cementitious binder replacement.

Due to its porous structure, brick aggregate exhibits higher water absorption and lower density relative to natural aggregates, which can adversely affect mechanical properties. Nonetheless, brick aggregate demonstrates strong adhesive characteristics and favorable thermal resistance. Experimental findings suggest that higher porosity may improve high-temperature performance by facilitating vapor release and reducing internal stresses; however, deterioration of interlayer bonding is reported at 600–800 °C [144]. At smaller particle sizes (<2 mm), brick waste has in some cases improved compressive strength compared to conventional concrete, by as much as 8.24% (28.90 MPa vs. 26.70 MPa), while splitting tensile and flexural strengths were maintained or slightly enhanced up to 20% replacement, with maximum flexural strength reaching 6.97 MPa. Aboalella et al. reported that replacing 50% of fine aggregate with crushed brick resulted in compressive strength increases of 23% at 7 days, 28% at 28 days, and 19% at 56 days. The optimal performance was observed when 50% of coarse aggregate was replaced with RCA and 50% of fine aggregate with crushed brick, yielding compressive, tensile, and flexural strength increases of 32%, 28%, and 26%, respectively [145]. Conversely, Zheng et al. demonstrated that complete replacement of natural aggregate with brick aggregate reduced compressive strength by 11–12% at $w/c = 0.55$ and 13–17% at $w/c = 0.35$ after 28 and 56 days [146]. Their earlier work confirmed that brick aggregate mixtures exhibited high printability and repeatability, attributed to optimized particle grading and porosity, which improve structural stability during extrusion and ensure uniform flow [147]. Other studies confirmed that printed elements incorporating brick aggregates displayed satisfactory surface finish and dimensional accuracy, including the successful printing of a 390 mm-high façade element. However, partial substitution levels remain critical: replacing 64% of natural aggregate with brick aggregate reduced cube compressive strength by 25%

(39.9 MPa vs. 53.1 MPa), interlayer tensile strength by 20% (1.37 MPa vs. 1.72 MPa), and compressive strength in build directions D1 and D3 by 14% and 20%, respectively [118].

Ground brick powder (CBP) has been shown to exert a non-linear influence on compressive strength: performance increases at replacement levels up to 10%, decreases at intermediate levels, and slightly increases again at higher dosages, with 10% identified as the optimum. In 3DPC, incorporation of 10% CBP, combined with appropriate mix adjustments, enhanced workability, compressive strength, and reduced structural anisotropy [148]. Both crushed brick and CBP therefore represent promising options for 3DCP, offering favorable rheology, good printability, and partial replacement of conventional raw materials. Their use modifies mechanical performance, but, with optimized mix proportions, durable and aesthetically appealing printed elements can be achieved while reducing environmental impact. In the study [95] it was observed that appropriate processing (e.g., particle gradation) of CBP combined with RFA results in a more homogeneous particle distribution and improved crack control after exposure to elevated temperatures. This behavior directly influences printing stability and mechanical performance. In this context, the interfacial transition zone (ITZ) has been described as a privileged site for crack initiation, owing to its higher local water-to-cement ratio and weaker microstructure compared to bulk paste [149]. When coarser, porous, or chemically inert fractions are used, such as insufficiently reactive CBP or oversized glass particles, they tend to behave as flaws within the ITZ, undermining cohesion and amplifying anisotropy under load. Conversely, finely ground and reactive fractions densify the ITZ through additional C–S–H formation, thereby improving interlayer bonding in 3D-printed concretes.

Similarly, recycled glass, when crushed to particle sizes comparable to natural sand (<4 mm, often <0.3 mm), can serve as RFA. Binder-level effects of WGP are covered in Section 2.5; here, recycled glass is discussed only as aggregate.

Ting et al. examined the rheological and mechanical performance of 3D-printed cementitious materials incorporating recycled glass [110]. In their study, river sand was fully replaced with a blend of glass particles, consisting of ~25% fine-to-medium fractions (500–1700 μm) and ~75% very fine fractions (150–710 μm). Their findings indicated that glass addition facilitated the pumping and delivery of fresh mortar through the printing nozzle. Flexural strength of glass-modified mixes followed trends similar to compressive strength. Kim et al. investigated the replacement of fine aggregate with recycled glass at levels ranging from 50% to 100% by volume. With a water-to-binder ratio of 0.45, flexural strength decreased by 9% and 14% compared to the reference mix [150]. Conversely, other studies reported flexural strength improvements of 25–33% when the bending direction was perpendicular to the printing orientation, although decreases of 8–20% were observed when tested parallel to the printing layers [99]. Likewise, Jiao et al. reported flexural strength increases of 2%, 1%, 5%, and 1% at recycled glass replacement levels of 25%, 50%, 75%, and 100%, respectively [151]. Previous studies have demonstrated that the flexural strength of printed layers varies with printing orientation, thereby confirming the critical role of interlayer adhesion and microstructural integrity [152].

In contrast, Ting et al. found that compressive strength of glass-containing concrete was approximately 50% lower than that of conventional sand-based concrete (16 MPa vs. 33 MPa), while flexural strength decreased by 30% (21 MPa vs. vs. 30 MPa) [110]. These differences can largely be attributed to the weaker bond between recycled glass particles and the cement matrix compared to that observed with river sand concrete [135,153].

Table 5 consolidates material-specific implications for 3D concrete printing (3DCP), focusing strictly on process-relevant advantages and disadvantages (pumping, extrusion, printability window, buildability, interlayer bonding).

Table 5. Summary of recycled constituents and industrial by-products for 3D concrete printing (3DCP): process-relevant advantages and disadvantages.

Material	Advantages (3DCP)	Disadvantages (3DCP)	References
Fly ash (FA)	Lowers plastic viscosity and often reduces τ_0 (dyn) → smoother pumping/extrusion; can stabilize buildability at moderate dosages; tends to widen the printability window.	High dosages may delay setting and reduce early green strength; buildability can drop without viscosity control/admixtures.	[154,155]
Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS)	In alkali-activated materials/geopolymers (AAM/GP) systems: strong structural build-up (thixotropy) → high buildability; in cement blends with FA: can keep extrusion stable at lower GWP. Strong increase of τ_0 (stat) and early stiffness → improved buildability and filament shape retention; can mitigate anisotropy via cleaner bead geometry.	Activator sensitivity (Na/K, Si/Al, temperature) → risk of too short printability window or nozzle clogging if poorly tuned.	[47,156]
Silica fume (SF)	At small–moderate dosages: better matrix packing, longer printability window, and stable buildability in printable mortars.	Excess dosage raises viscosity → pumpability issues and potential nozzle blocking; requires precise W/B and SP control.	[157,158]
Recycled glass powder (WGP/GWG)	At modest levels can maintain extrusion; with concurrent cement reduction may keep buildability and extend printability by matrix tuning.	Very high replacements may shorten open time (in GP/AAM) and degrade filament quality without viscosity tuning.	[100]
Recycled fine aggregate (RFA)	Rough angular surface may enhance interlayer mechanical interlock; feasible sand replacement with controlled grading/moisture.	Higher fractions increase water/admixture demand, may raise τ_0 (dyn) and shorten open time; green strength often drops.	[32,159]
Recycled brick aggregate (RBA)	Good extrudability at tuned SA/C and W/C; rough texture helps bead stability; synergy with SF improves buildability.	High absorption/roughness → higher water demand and ↑ τ_0 (dyn); can reduce filament stability without paste adjustments.	[118]
Steel slag aggregate (SSA/SA)	Lighter mixes with damping; can keep extrusion continuity after surface treatment and paste tuning.	Higher absorption → water/admixture corrections needed; buildability moderate without viscosity modifiers.	[126,160]
Rubber aggregates (crumb rubber, GWTR)	High buildability with fast structural build-up; early green strength enables layer stacking at low deformation; stable extrusion when τ_0 /viscosity sits in the process window.	Strength reduction and shorter open time if untreated; viscosity ↑ → pumpability must be re-balanced; anisotropy may intensify.	[124,161]
Geopolymers (AAM/GP based on FA/GGBFS)		High sensitivity to activator chemistry and curing temperature → risk of too short printability or pumpability loss; requires tight process control.	[156,162]

2.7. Long-Term Durability of 3D-Printed Concrete Mixes with Recycled Materials

In 3DCP, durability is governed not only by mix composition but also by anisotropy and the quality of interlayer interfaces, which may act as preferential pathways for moisture and ionic transport; the Y-direction is often the most vulnerable in terms of interlayer cohesion, directly affecting freeze–thaw (F–T) resistance and chloride ingress [114]. Recycled fine/coarse aggregates (RFAs/RCAs) tend to raise water absorption and matrix discontinuity, while polymer recyclates (e.g., PETs) alter stiffness and fracture behaviour—both effects amplifying the role of interfacial regions [109,115–117,120,121]. This aligns with a recent review highlighting interlayer quality and mechanical anisotropy as key to structural performance, alongside a synthesis of 3DPC environmental impacts [163].

Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) densifies the microstructure (filler action and additional C–S–H), lowers capillary porosity, and typically enhances both F–T performance and resistance to chloride transport; in 3DCP, a practical dosage window is ~20–30% to balance tightness with buildability and the printing time window [69,71,73]. Silica fume (SF) further seals the ITZ and improves F–T—particularly valuable for mixes with elevated absorption (e.g., with RFA) [86–88]. Fly ash (FA) contributes pozzolanically and, in hybrid systems with GGBFS, reduces chloride migration/diffusion while helping to retain printability [154–156]. PET can improve F–T at moderate contents, though often at the expense of strength/buildability (Table 6) [120].

Recommended practice is to minimise open porosity through GGBFS (~20–30%) plus SF (~5–10%)—optionally in hybrids with FA—together with particle packing and superplasticizers (SPs) instead of increasing w/b. Control of viscosity, the build-up of yield stress (τ_0), and the open time is essential to limit microgaps at interfaces and maintain interlayer continuity, particularly at higher RFA/RCA replacements. Verification should report durability with directional resolution: F–T after 56/100 cycles (mass loss and relative reductions in E and f_{ct}/f_c) and rapid chloride migration/diffusion tests—both distinguished by orientation with respect to layers (X/Y/Z). Complementary measurements include water absorption, sorptivity, open porosity and an anisotropy map [69,73,87,88,129,130,132,154,155].

Table 6. Effect of selected constituents on F–T and chloride transport.

Recycled Constituent	Typical Effect on F–T	Typical Effect on Chlorides	3DCP Process Levers	Reference
GGBFS (20–30%)	↑ F–T (densification, ↓ porosity)	↓ migration/diffusion (pore refinement)	Balance against open time; >40% often needs SP	[69,71,73]
Silica fume (5–10%)	↑ F–T; sealed ITZ	↓ porosity → reduced ingress	Tight viscosity/extrusion control; w/b and SP	[86–88]
Fly ash (FA)	neutral to ↑ F–T (indirect via densification)	↓ migration/diffusion (pozzolanic; in GGBFS hybrids)	GGBFS + FA hybrids; manage rheology and open time	[154–156]
PET/other plastics	sometimes ↑ F–T at moderate contents	no single trend (mix-dependent)	Limit dosage; pair with SCMs (GGBFS/SF/FA)	[120]
RFA/RCA (25–50%)	risk of ↓ F–T (↑ absorption, weaker interfaces)	↑ vulnerability to ingress (interlayer pathways)	SP, particle packing, curing; control τ_0 and print window	[94,109,115–117,133–135]

The literature-supported route to mitigating F–T damage and chloride ingress in recycled 3DCP mixes is a low-porosity matrix built around GGBFS + SF (with optional FA hybrids) and high-quality interlayer bonding. Key gaps remain: sparse F–T and chloride data at high RFA/RCA contents, systematic directional durability testing (Y vs. Z), and stronger links between τ_0 kinetics and transport at interlayer interfaces.

3. Calculation of the Benefits of Using Secondary Raw Materials

The environmental aspect of incorporating recycled raw materials into concrete mixtures, both for conventional construction and 3DCP technology, is of paramount importance. To properly balance the mix composition while accounting for ecological impact, appropriate standards and comparative parameters are required. The carbon footprint is a measure of the total greenhouse gas emissions associated with a product or process, expressed as carbon dioxide equivalents (kg CO₂-eq). In practice, it corresponds to the GWP100 indicator (Global Warming Potential over a 100-year horizon), which aggregates the impact of CO₂, CH₄, N₂O, and other gases into a single metric.

For construction products—including concrete—the carbon footprint is calculated within the framework of life cycle assessment (LCA), a structured methodology for assessing environmental impacts “from cradle to grave” or “from cradle to gate” [164–166].

LCA consists of four main steps: (1) goal and scope definition (system boundaries), (2) life cycle inventory (LCI—compilation of all inputs/outputs: raw materials, energy, emissions), (3) life cycle impact assessment (LCIA—conversion of flows into indicators such as GWP), and (4) interpretation of results. Critical elements here are the system boundaries and the functional or declared unit. In the case of concrete mixtures, the practical reference unit is typically 1 m³ of concrete with defined mechanical properties.

In the construction sector, life cycle modeling is conventionally divided into modules A–D [164,167,168]:

- A1–A3 (product stage): raw material acquisition, binder and admixture production, mixture manufacturing (the so-called cradle-to-gate).
- A4–A5 (construction): transportation to site and placement.
- B (use stage): service life of the element/structure (in concrete, carbonation is particularly relevant—gradual CO₂ uptake by the material).
- C (end-of-life): demolition, crushing, recovery, or landfilling.
- D (beyond system boundaries): credits/burdens from substitution of primary materials due to recycling or energy recovery.

Modern reporting frameworks for construction products distinguish between carbon footprint components, e.g., GWP-fossil (from fossil fuels), GWP-biogenic (from biogenic carbon), GWP-LULUC (from land-use change), and GWP-total (sum). For comparing mixtures, results are most often expressed as GWP-total (kg CO₂-eq/m³) for the A1–A3 stage, and—where possible—the full A1–A3, C, D profile, depending on the study’s scope [164,169].

In practice, the dominant emission sources in concrete mixtures are:

- Production of cementitious binders, particularly process emissions from clinker decarbonation (calcination) and kiln fuel/energy use;
- Transportation of raw materials and fresh concrete;
- Manufacturing (electricity and heat at batching plants);
- End-of-life stage (crushing, sorting, transport, disposal).

Therefore, low-carbon mix design typically relies on: (i) reducing clinker content through SCM substitution, (ii) replacing natural aggregates with recycled fractions, (iii) optimizing logistics and energy use, and (iv) accounting for recycling credits (D) and carbonation where methodologically justified. Complementing these standards, a 2024/2025 review integrates mechanical performance data of 3D-printed concretes with life-cycle assessment findings, linking mix-design choices to environmental outcomes [163].

The methodology for calculating the carbon footprint and related indicators is standardized mainly through:

- ISO 14040/14044—general principles and requirements for LCA (overall framework) [167,168];
- ISO 21930:2017—rules for Environmental Product Declarations (EPDs) of construction products (complementary to ISO 14025) [169];
- EN 15804:2012+A2:2019—European core PCR for all construction products: mandatory modules A1–A3, C1–C4, D; expanded set of indicators, including the breakdown of GWP into fossil, biogenic, LULUC, and total [164].

Based on these standards, various tools have been developed to support environmental performance calculations. Among the most widely used is SimaPro [170], a comprehensive LCA software with extensive databases (e.g., ecoinvent, Agrifootprint). An open-source alternative is openLCA [171], also compatible with ecoinvent. In the construction sector, tools such as eToolLCD [172] or Tally (Revit plugin) [173] are frequently applied, as they can be integrated with BIM. In addition, One Click LCA [174] offers both standard LCA functionalities and an EPD generator for concrete, while the GCCA Industry EPD Tool [175] provides a sector-specific calculator for aggregates, clinker, cement, concrete, and precast elements.

For recycled concrete mixtures (e.g., with recycled aggregate, RCA or clinker substitutes, SCM such as blast furnace slag or fly ash), four modeling decisions are particularly important [164,169,176,177]:

- Allocation and cut-off criteria: whether and how environmental burdens are assigned to secondary raw materials entering the system (commonly counted from the “end-of-waste” point).
- Carbonation: inclusion of CO₂ uptake during service life (B1) and after crushing at end-of-life (C3); critical for comparing scenarios.
- Module D: accounting for substitution benefits (e.g., recycled aggregate replacing natural aggregate in subsequent cycles).
- Data quality and representativeness: selecting appropriate datasets (e.g., regional electricity mixes, cement production parameters, transport processes) consistent with relevant PCR/EPD rules.

In the literature, the carbon footprint of concrete is usually reported as GWP100 per 1 m³, most commonly for the A1–A3 stage (“cradle-to-gate”), while more recent studies also include carbonation and module D in line with EN 15804+A2/EN 16757. Reported values for “reference” mixtures vary widely, e.g., ~348 kg CO₂-eq/m³ in production studies, ~323–332 kg CO₂-eq/m³ for “cement-only” mixes with natural aggregates, or reductions from ~450 to ~250 kg with aggressive clinker substitution by SCM—clearly demonstrating the critical role of clinker content and system boundaries [165,166]. Table 7 presents intervention-specific LCA results reported across different studies, Table 8 compiles representative GWP values for conventional and blended concrete mix designs, and Table 9 specifically addresses waste-derived constituents in 3D-printed concrete. Collectively, these tables provide a structured synthesis of current evidence, progressing from general assessments to 3DCP-specific contexts.

For recycled aggregate concrete (RAC), the picture is less consistent: replacing natural aggregate alone rarely achieves reductions comparable to SCM substitution, but it improves A1 emissions (lower aggregate production footprint) and—in end-of-life scenarios—increases CO₂ uptake through carbonation, which is increasingly accounted for in B1/C3 and D in recent EPDs. Additionally, CO₂ curing technologies can further reduce “cradle-to-gate” emissions by several to over ten percent, although literature emphasizes the sensitivity of results to SCM/aggregate transport and uncertainties in carbonation modeling [178–181].

Table 7. Summary of studies (mixtures, methods, and GWP results).

Intervention/Mixture	Scope & Method	Tool/Database	Result/Change	Reference
“Reference” concrete (production)	A1–A3, IPCC	–	~348 kg CO ₂ -eq/m ³	[165]
NAC “cement-only” vs. +25% FA (SCM)	A1–A3, IPCC 2013	openLCA; ecoinvent	NAC 323–332; –8–17% at 25% FA	[166]
“Low-clinker” mixes (high SCM)	A1–A3 (various LCAs)	various tools	~450 → ~250 kg with high SCM	[182]
Prefabricate, CO ₂ -curing; NA/RCA/MCA	A1–A3 (incl. bound CO ₂ balance)	(measurement + inventory)	221.26 (NA), 204.38 (RCA), 210.05 (MCA)	[179]
RAC, accounting for carbonation in life cycle	B1/C3 (uptake)	–	4.9–16.4 kg CO ₂ /m ³ absorbed (30–100% RCA; 50 years)	[178]
Workflow for carbonation (EN 16757)	B1 (k-values)	digital model	Rate ~1.59 mm·year ^{−0.5} (per EN 16,757 for external exposure)	[183]
Effect of FA/slag transport	A1–A3	–	Higher FA/slag content reduces GWP, but long transport distances may offset gains	[180]
CO ₂ -cured blocks (comparative)	A1–A3 (variants)	–	292–454 kg/m ³ (scenario-dependent)	[184]
Recycled aggregate production	A1 (aggregates)	–	–70.7% impact vs. natural aggregate	[185]

Table 8. Comparative carbon footprint of different concrete mix designs (GWP100, cradle-to-gate, per 1 m³).

Concrete Type/Mix Design	Main Features	Typical GWP100 [kg CO ₂ -eq/m ³]	Key Factors Affecting Results	References
Conventional concrete (OPC only)	100% clinker cement, natural aggregates	~320–450	High process emissions from clinker calcination; energy-intensive	[186–189]
Blended concrete with SCM	20–50% clinker replaced by FA, GGBFS, SF, MK	~250–330	Reduction depends on SCM level and transport distance	[188,190,191]
Recycled aggregate concrete (RAC)	RCA/RFA replacing natural aggregates	~300–420	Lower A1 emissions; carbonation in B1/C3; less impact vs. SCM	[192–194]
Low-carbon hybrid mixes	SCM + RCA combined	~220–300	Synergistic effect; possibility of CO ₂ curing for further reduction	[193,194]
Geopolymer concrete	Alkali-activated binders from industrial by-products	~150–250	Very low process emissions; strongly influenced by activator type and regional energy mix	[195–197]

Table 9. Carbon footprint reduction achieved by using waste-derived raw materials in mixes for 3D concrete printing (3DCP), as reported in the literature.

Recycled Material Used in 3DCP Mix	Modification/Role in the Mix	LCA Type (Scope)	GWP Effect (vs. the Reference Mix in the Study)	Key Notes	Reference
Fly ash (FA)	Partial replacement of binder in printable mixes (SCM/precursor in geopolymers)	Mix-level LCA for 3D-printed building; cradle-to-gate for materials	Higher GWP than GGBFS within the same study set: FA \approx +37% vs. GGBFS; equivalently \sim 393 kg CO ₂ e/m ³ if GGBFS = 287 kg CO ₂ e/m ³	Comparison is across 3DCP material variants; the lowest footprint in that set was GGBFS; FA and WGP were higher	[198]
Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS)	Partial replacement of cement in printable mixtures	Mix-level LCA (cradle-to-gate) per unit volume	Lowest GWP in the assessed set: \sim 287 kg CO ₂ e/m ³ ; in the same analysis FA \sim 37% higher, WGP \sim 50% higher	Authors recommend GGBFS as the most effective low-carbon option among compared by-products for 3DCP	[198]
Coal slag (CS) (boiler slag)	Potential SCM/fine fraction in 3DCP	data gap for mix-level 3DCP LCA	–	Material reports exist, but no standardized cradle-to-gate GWP for printable mixes	–
Silica fume (SF)	Low-dosage SCM in printable mortars	data gap for mix-level 3DCP LCA	–	Directionally reduces clinker content, but mix-level 3DCP LCA with explicit GWP is missing	[199]
Recycled concrete powder (RCP/RCBP)	Up to 50% binder replacement in printable paste/mortar	Mix-level LCA (cradle-to-gate); FU = 1 m ³ paste/mortar	Up to \sim –62% CO ₂ e vs. OPC reference (while maintaining printability after rheology tuning)	Strong sensitivity to yield stress and printability window; admixture adjustments required at high RCP contents	[112,113]
Fine recycled aggregate (fRA) (from 3DPC/CDW)	Replacement of sand with concomitant binder reduction	Mix-level LCA for 3DCP (cradle-to-gate)	Up to \sim –48% CO ₂ e at the highest fRA levels with cement reduction; \sim –20% feasible at \sim 20% v/v without major performance loss	Effect largely driven by clinker reduction; at >20% v/v monitor green strength and printability window	[159]
Ground waste tire rubber (GWTR)	Partial replacement of sand; printable mixes compared with casting	Mix-level LCA (cradle-to-gate)	Environmental credit for GWTR (negative GWP for the aggregate module under “avoided burden”); additionally \sim –9.5% GWP when printing vs. casting the same mix	Total reduction depends on allocation for GWTR and rubber content; cement remains the dominant GWP contributor	[123]
Waste glass powder (WGP)	10–30% OPC replacement (SCM) in printable mortars	data gap for mix-level 3DCP LCA	–	Directionally beneficial via clinker reduction; some studies rank GGBFS < FA < WGP in GWP (relative SCM ranking)	[100]

In summary, the assessment of the carbon footprint of concrete mixtures with recycled materials requires a consistent life cycle perspective, clear methodological assumptions,

and reliable datasets. The main levers for emission reduction remain clinker substitution with SCMs and, to a lesser extent, aggregate recycling, both complemented by optimized logistics and accounting for carbonation and end-of-life credits. Advanced LCA software and standardized frameworks such as ISO 14040/44 and EN 15804 provide robust tools for benchmarking environmental performance. As research shows, properly designed recycled concrete mixtures can significantly reduce GWP while maintaining structural integrity, confirming their role as a key pathway toward sustainable and decarbonized construction.

4. Material Reuse in 3D-Printed Concrete: A Comparison with Traditional Methods

In the context of construction and demolition waste (CDW), 3D-printed concrete (3DCP) offers a comparatively cleaner and more traceable waste stream than conventional multilayer wall systems. By design, many 3DCP envelopes minimize or eliminate auxiliary layers that complicate end-of-life processing—such as polymeric thermal insulation, gypsum plasters, adhesives, glass/aramid meshes, or complex façade laminates—thereby reducing contamination and facilitating selective demolition (Figure 4). The digital nature of production (known mix designs, documented print paths, and layer counts) further improves material provenance and homogeneity, which are decisive for high-quality secondary aggregates and for closed-loop strategies (e.g., re-introducing recycled concrete aggregate, RCA, into new 3DCP mixes).

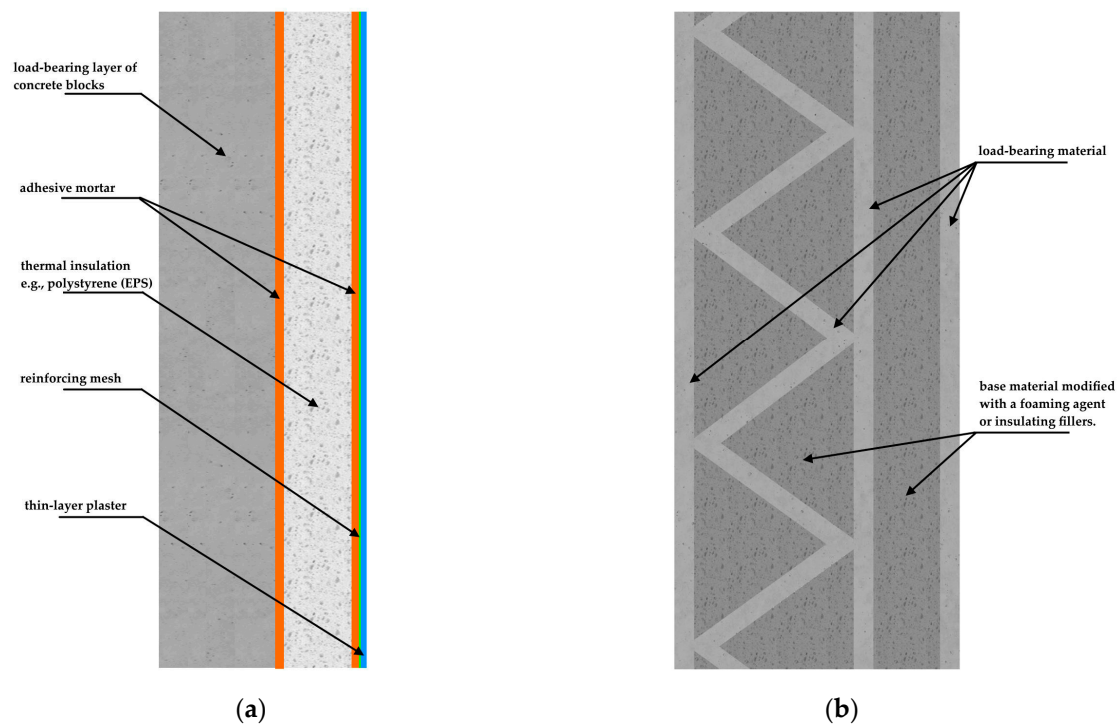


Figure 4. Schematic cross-sections of insulated walls: (a) traditional multi-layer masonry (concrete blocks with ETICS using EPS); (b) 3D concrete printing (3DCP) wall with load-bearing material and base material modified with a foaming agent or insulating fillers.

Practical advantages of 3DCP waste over conventional CDW include:

- Lower contaminant load—fewer gypsum, wood, plastics, and adhesive residues that otherwise depress concrete strength when recycled [200];
- Simplified disassembly and shorter processing chains—often fewer steps before crushing/screening, with reduced handling, storage, and time;

- Reduced metallic content—many 3DCP systems rely on geometry and localized reinforcement, limiting extensive steel meshes and hazardous resin-bonded mortars common in ETICS or render systems;
- Logistics benefits—less bulky polymeric insulation (e.g., EPS) to transport and compact; EPS's very low bulk density makes long-haul transport particularly inefficient in conventional retrofits and demolitions;
- Higher traceability—digital fabrication enables accurate mass balances and targeted reuse pathways;
- Compatibility with closed-loop reuse—on-site or local crushing/sieving can yield RCA tailored to new 3DCP mixes, limiting primary aggregate demand.

Figure 4 contrasts two representative insulated wall assemblies: (a) a traditional multi-layer masonry wall comprising a load-bearing course of concrete blocks with an external thermal insulation composite system (ETICS) based on expanded polystyrene (EPS), adhesive mortar, reinforcing mesh, and thin-layer plaster and (b) a 3D concrete printing (3DCP) wall composed of printed load-bearing ribs and a base cementitious material modified with a foaming agent or insulating fillers. This comparison highlights the stark end-of-life contrast between conventional systems and 3DCP. In conventional walls, effective recycling hinges on strict source separation: reinforcement meshes embedded in adhesive mortars are often treated as hazardous and require specialized processing; plastics are energy-intensive to produce and difficult to recover economically; laminated or coated architectural glass, although technically recyclable, remains energy-demanding and materially complex. Moreover, popular thermal insulants pose practical barriers: EPS produces large volumes of low-density waste (transport-intensive), while mineral wool—though recyclable in principle—depends on costly, infrastructure-limited routes and currently low demolition volumes (mainly 1970s–1980s stock), which undermines profitability. Meeting selective demolition and waste-purity requirements remains essential to avoid down-cycling in both cases, but it is intrinsically easier for the streamlined 3DCP assembly [200–202].

By contrast, 3DCP can reduce the number of processing stages from demolition to usable RCA—often bypassing the removal of adhesive layers, mesh detachment, or composite façade separation. This shortens the recycling chain (Figure 5), lowers equipment hours and temporary storage needs, and can improve RCA quality by limiting fines contamination. Figure 5 illustrates that the recycling chain of 3DCP waste is generally shorter and less complex compared to conventional demolition materials. Due to the absence of sorting processes for plastics, glass, or composite residues, 3DCP rubble can be directed straight to crushing and screening, thereby minimizing handling steps and reducing potential material losses. From an LCA perspective, this results in lower energy demand, reduced requirements for transport and storage, and decreased CO₂ emissions associated with processing. Consequently, 3DCP assemblies not only streamline logistical operations but also enable higher-quality RCA recovery and foster more resilient closed-loop recycling strategies. As highlighted by experimental evidence, even modest levels of contaminants (e.g., lime plaster—7% vol., soil—5%, wood—4%, gypsum—3%, asphalt—2%, vinyl-acetate paints—0.2%) may reduce compressive strength by up to ~15% [200]. Mitigating such inputs is inherently easier with the streamlined assemblies typical of 3DCP. In addition, 3DCP can offset upstream impacts through reduced material intensity and shorter execution times, decreasing vehicle movements and site energy demand. The primary structural material—concrete—remains almost fully recyclable into secondary aggregates, enabling loop-closing strategies whereby demolition waste from printed buildings is reprocessed and redeployed in subsequent 3DCP projects. Advances in sustainable construction are not limited to material substitution but also involve predictive optimization of engineering

processes. Studies on tunneling thrust prediction using multi-channel data fusion [203] illustrate how such computational techniques can reduce inefficiencies, a perspective that aligns with the optimization of mix design strategies in 3DCP.

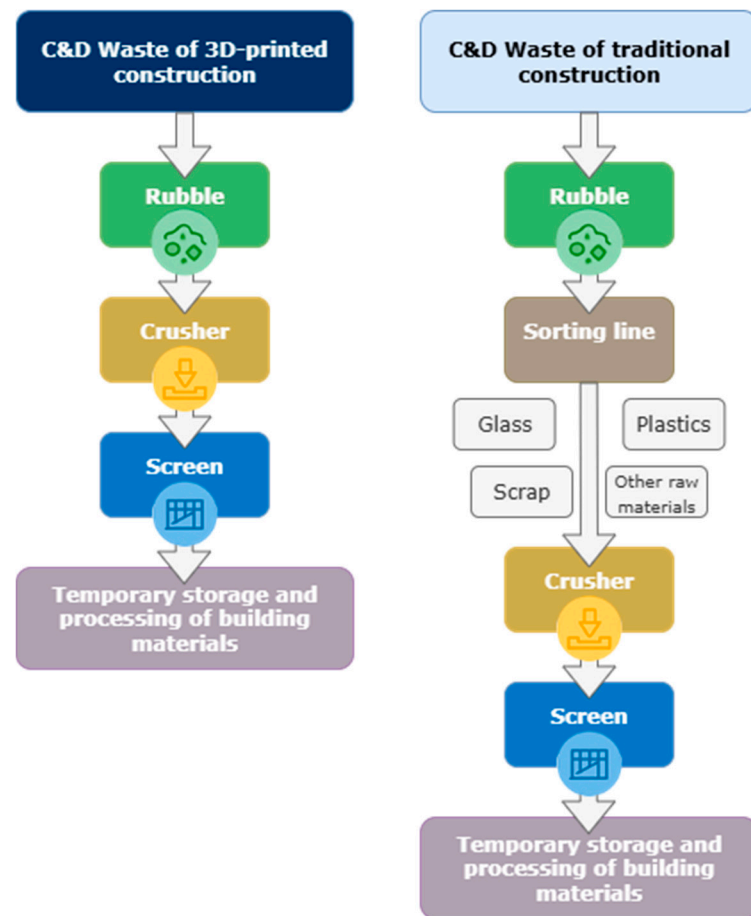


Figure 5. Recycling chain of CDW of 3D-printed and traditional construction.

5. Three-Dimensional Printing of Concrete with Recycled Materials as a Tool for Sustainable Development and Decarbonization of Construction

3D printing technology using concrete mixtures incorporating recycled materials represents one of the most promising directions for the development of sustainable construction. Through the capability of fabricating structures layer by layer directly on-site, while minimizing material losses and ensuring high execution precision, this technology enables a significant reduction in the consumption of primary resources and carbon dioxide emissions. Laboratory studies have shown that the incorporation of secondary raw materials—such as recycled aggregates, waste glass, fly ash, slags, or plastics—not only does not compromise the quality of concrete mixtures used in 3D printing but may in fact enhance their mechanical, rheological, and durability-related properties. It has also been confirmed that the application of geopolymers derived from industrial by-products as partial cement replacements reduces the material’s carbon footprint while simultaneously maintaining or improving its thermal and chemical resistance.

Examples of market-available concrete mixtures incorporating secondary resources, such as Rebetong or ercconcrete, demonstrate that high substitution levels—up to 75% by volume—can be achieved without compromising the required performance parameters (Table 10). At the same time, commercially available low-carbon cementitious solutions, such as ECOPlanet 4B or Vertua Plus, exhibit a carbon footprint reduction of up to 50–66%,

further reinforcing the potential of 3D printing as a technology supporting the decarbonization of the construction sector (Table 11). The application of fire-resistant cement-based mixes enables fire resistance levels of up to 1000 °C [204]. Printed structures allow for precise shaping of wall geometries with optimized thermal transmittance coefficients (U-values), which—according to experimental results—can reach values not exceeding 0.15 W/m²·K for external partitions [9,205,206]. This indicates that buildings produced by this method are capable of meeting standards typical of energy-efficient housing, while simultaneously reducing the consumption of construction materials by up to 20%. Importantly, the materials used for 3D printing can be sourced locally—from recycling centers, demolition sites, or industrial production facilities—thus decreasing transportation needs and further lowering CO₂ emissions. This sustainable approach to supply chains enhances the resilience of the construction sector to raw material availability disruptions while also supporting local economies and recycling industries. The use of locally available alternative resources in concrete research (e.g., seawater and sea-sand in GFRP–steel composite tube structures [207]) provides a valuable reference for 3D concrete printing (3DCP), which likewise demands tailored mixtures with a reduced environmental footprint.

The observed development of concrete mixing technologies incorporating recycled materials and their application in 3D printing aligns with European decarbonization strategies and the circular economy model. Research confirms that, thanks to this technology, it is possible to achieve CO₂ emission reductions of 40–66% compared with conventional solutions, without compromising the quality and durability of the resulting structures.

Table 10. Commercially available concrete products incorporating recycled materials [208,209].

Trade Name	Company	Materials	Material of Secondary Raw Materials in 1 m ³ of the Product (%)	Certificate
Rebetong C20/25	SKANSKA	Portland cement, recycled aggregate, sand, fillers, chemical additives, water	75.5%	Technical and Test Institute for Construction Prague
Rebetong C25/30	SKANSKA	Portland cement, recycled aggregate, sand, fillers, chemical additives, water	72.3%	Technical and Test Institute for Construction Prague
ercconcrete	ERC-TECH	mix of cement, finely ground recycled brick, ceramics, concrete, microsilica, lightweight artificial aggregate and/or char and/or slag and/or polystyrene and/or at least one organic filler	from 40% to 100%	Technical and Test Institute for Construction Prague

Table 11. Commercial cement-based products with reduced CO₂ emissions [210–212].

Trade Name	Company	Materials	CO ₂ Emission Reduction (%)	Certificate
ECOPlanet 4B (CEM IV/B (V) 42.5 N—LH/NA)	LAFARGE	pozzolanic cement, limestone LL ≤0.20% of stone weight, silica fly ash, gypsum/REA-gypsum, dusts from the production of Portland cement, chromium (VI) reducer	up to 40% and 20% recycled material	Building Research Institute (ITB)

Table 11. Cont.

Trade Name	Company	Materials	CO ₂ Emission Reduction (%)	Certificate
Vertua Plus	CEMEX	Portland clinker, limestone, silica fly ash, REA-gypsum, chromium(VI) reducer—iron(II) sulfate	up to 50%	Building Research Institute (ITB)
EcoCrete	Heidelberg Cement	no data	up to 66%	no data

6. Conclusions

The conducted literature review clearly indicates that integrating recycled materials into 3D concrete printing (3DCP) is a realistic and effective pathway to reduce environmental impacts without compromising required performance. At the mix level (A1–A3), reported embodied-carbon reductions typically range from ~20–50%, depending on the extent of clinker substitution and the types of secondary constituents; values up to ~48% have been noted when using fine recycled aggregates alongside cement reduction and up to ~62% for mixes incorporating recycled concrete powder after tuning rheology while maintaining printability. Low thermal transmittance of wall elements has also been demonstrated ($U \leq 0.15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), together with ~20% material savings enabled by geometry optimization in 3DCP. In addition, commercial low-carbon binder systems have been reported with embodied-carbon reductions on the order of 40–66%. The growing availability of market solutions confirms active development work and technological readiness for deployment.

Despite these advances, industrial-scale implementation requires targeted R&D. First, unified, quantitative rheological protocols specific to 3DCP are needed (e.g., time-dependent yield stress windows, thixotropy, and “open time”) to ensure result comparability and enable controllable printability in mixes with recycled fractions. Second, methods for testing interlayer bond strength and assessing anisotropy (i.e., load-bearing dependence on print direction) must be developed and standardized for recycled-based mixes, and the findings scaled to full-size elements. Third, long-term durability assessments under real service conditions are necessary (carbonation across B1/C3 stages, frost resistance, chloride ingress, fire resistance), accounting for variability of secondary raw materials and QA/QC procedures across the supply chain. Fourth, LCA reporting for 3DCP should be standardized (system boundaries, functional units, explicit accounting for the printing process energy and potential module-D credits) to robustly evidence environmental gains versus conventional technologies. Finally, scale-up studies for mix designs, aimed at achieving stable site-scale production under real field conditions (ambient variability, moisture uptake tolerances of recycles), are essential to mitigate process risk and ensure repeatable quality of printed components.

Nevertheless, deploying recycled-based 3DCP is a clear step toward sustainable development and, in the long term, aligns with the objectives of the European Green Deal and global climate-neutrality strategies by 2050. The integration of secondary raw materials into additive construction processes can become a cornerstone of the sector’s transition toward a circular economy and a low-carbon built environment.

Author Contributions: Conceptualization, M.M., M.R. and M.H.; methodology, M.M. and M.R.; validation, M.M., M.R. and M.H.; formal analysis, M.M., M.R. and M.H.; investigation, M.M., M.R. and M.H.; resources, M.M., M.R. and M.H.; data curation, M.M. and M.H.; writing—original draft preparation, M.M., M.R. and M.H.; writing—review and editing, M.M. and M.H.; visualization, M.M.

and M.R.; supervision, M.H.; project administration, M.M. and M.H.; funding acquisition M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research has been supported by the Ministry of Science and Higher Education within the program “Implementation Doctorate”, DWD/5/0237/2021.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: No new data were created or analyzed in this study. Data sharing is not applicable to this article.

Acknowledgments: We would like to acknowledge support from the Ministry of Science and Higher Education within the program “Implementation Doctorate”.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S. Recycled Aggregate from C&D Waste & Its Use in Concrete—A Breakthrough towards Sustainability in Construction Sector: A Review. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 501–516. [CrossRef]
2. International Energy Agency (IEA). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2019. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (accessed on 3 September 2025).
3. World Economic Forum. *Cement Production Is Responsible for 8% of Global Emissions. Here’s How to Make It More Sustainable*; World Economic Forum: Geneva, Switzerland, 2024.
4. Hasheminezhad, A.; King, D.; Ceylan, H.; Kim, S. Comparative Life Cycle Assessment of Natural and Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Sci. Total Environ.* **2024**, *950*, 175310. [CrossRef]
5. Bun, P.; Cyr, M.; Laniesse, P.; Bun, K.N.; Idir, R. Concrete Made of 100% Recycled Materials—Feasibility Study. *Resour. Conserv. Recycl.* **2022**, *180*, 106199. [CrossRef]
6. Obermeier, N.; Wiese, F.; Kustermann, A.; Stengel, T. 3D Printing Cement-Based Materials Using 100% of Recycled Aggregates. In *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*; Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2023; Volume 349, pp. 648–657. ISBN 978-3-031-32518-2.
7. Ramesh, A.; Navaratnam, S.; Rajeev, P.; Sanjayan, J. Thermal Performance and Life Cycle Analysis of 3D Printed Concrete Wall Building. *Energy Build.* **2024**, *320*, 114604. [CrossRef]
8. Neri, M.; Licciardello, L.; Reggia, A.; Pilotelli, M.; Lezzi, A.M. Improving the Energy Performance of a 3D-Printed Wall Using Recycled Material. *J. Phys. Conf. Ser.* **2024**, *2685*, 012034. [CrossRef]
9. Dziura, P.; Maroszek, M.; Góra, M.; Rudziewicz, M.; Pławecka, K.; Hebda, M. Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation. *Materials* **2023**, *16*, 5772. [CrossRef] [PubMed]
10. Purvis, B.; Celebi, D.; Pansera, M. A Framework for a Responsible Circular Economy. *J. Clean. Prod.* **2023**, *400*, 136679. [CrossRef]
11. CEMBUREAU. *Use of Secondary Raw Materials in the EU Cement Industry*; CEMBUREAU: Brussels, Belgium, 2023. Available online: <https://cembureau.eu/media/kj3no0w3/230123-cembureau-qa-secondary-materials.pdf> (accessed on 3 September 2025).
12. European Commission. *Energy Performance of Buildings Directive. 2025*. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed on 3 September 2025).
13. International Energy Agency. *Technology Roadmap—Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; IEA: Paris, France, 2018. Available online: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (accessed on 3 September 2025).
14. Van Oss, H.G.; Padovani, A.C. Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *J. Ind. Ecol.* **2003**, *7*, 93–126. [CrossRef]
15. Stowarzyszenie Producentów Cementu. *Informator 2023 SPC*; Stowarzyszenie Producentów Cementu: Kraków, Poland, 2023. Available online: <https://www.polskicement.pl/informatory/informator-2023-spc/> (accessed on 3 September 2025).
16. Jankovic, A.; Valery, W.; Davis, E. Cement Grinding Optimisation. *Miner. Eng.* **2004**, *17*, 1075–1081. [CrossRef]
17. Torgal, F.P.; Jalali, S. *Eco-Efficient Construction and Building Materials*; Springer: London, UK, 2011; ISBN 978-0-85729-891-1.
18. Rudnicki, T.; Stałowski, P. Performance Research of Cement Concrete Pavements with a Lower Carbon Footprint. *Materials* **2024**, *17*, 3162. [CrossRef]
19. European Commission. *A Renovation Wave for Europe—Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives*; European Commission: Brussels, Belgium, 2020. Available online: <https://eur-lex.europa.eu> (accessed on 3 September 2025).

20. Tait, M.W.; Cheung, W.M. A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Three Concrete Mix Designs. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2016**, *21*, 847–860. [CrossRef]
21. Ernst & Young (EY) Polska. *Economic Analysis of the Impact of Implementing CCS in the Cement Industry on the Construction Sector and the Economy*; Ernst & Young Polska (EY): Warsaw, Poland, 2024.
22. Global Cement and Concrete Association (GCCA). *Concrete Future—Roadmap to Net Zero*. 2021. Available online: <https://gccassociation.org/concretefuture/> (accessed on 25 September 2025).
23. SPC Technologie. *CCS Jedyną Szansą na Zachowanie Konkurencyjności Sektora Cementowego w Polsce*; Stowarzyszenie Producentów Cementu (SPC): Krakow, Poland, 2024. Available online: <https://www.polskicement.pl/technologie-ccs-jedyna-szansa-na-zachowanie-konkurencyjnosc-sektora-cementowego-w-polsce/> (accessed on 3 September 2025).
24. Hoenig, V.; Schall, A.; Sultanov, N.; Papkalla, S.; Ruppert, J. *Status and Prospects of Alternative Raw Materials in the European Cement Sector*; European Cement Research Academy (ECRA): Düsseldorf, Germany, 2022.
25. European Commission. *European Research Area Progress Report 2018*; Directorate General for Research and Innovation; European Commission: Warsaw, Poland, 2019.
26. International Energy Agency (IEA). *Global Cement Demand for Building Construction, 2000–2020, and in the Net Zero Scenario, 2025–2030*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2021. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-demand-for-building-construction-2000-2020-and-in-the-net-zero-scenario-2025-2030> (accessed on 3 September 2025).
27. International Energy Agency (IEA). *Global Energy Review 2025*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2025. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025> (accessed on 3 September 2025).
28. International Energy Agency (IEA). *CO₂ Total Emissions by Region, 2000–2024*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2025. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-total-emissions-by-region-2000-2024> (accessed on 10 September 2025).
29. International Energy Agency (IEA). *CO₂ per Capita Emissions by Region, 2000–2024*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2025. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-per-capita-emissions-by-region-2000-2024> (accessed on 10 September 2025).
30. Padavala, S.S.A.B.; Noolu, V.; Paluri, Y.; Bijivemula, S.K.R.; Akula, U.K. A Study on the Synthesis and Performance Evaluation of Fly Ash and Alccofine as Sustainable Cementitious Materials. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 19115. [CrossRef]
31. Rudziewicz, M.; Maroszek, M.; Góra, M.; Dziura, P.; Mróz, K.; Hager, I.; Hebda, M. Feasibility Review of Aerated Materials Application in 3D Concrete Printing. *Materials* **2023**, *16*, 6032. [CrossRef] [PubMed]
32. Venugopal Reddy, P.; Nakkeeran, G.; Roy, D.; Alaneme, G.U. Evaluating the Use of Recycled Fine Aggregates in 3D Printing: A Systematic Review. *Discov. Appl. Sci.* **2024**, *6*, 630. [CrossRef]
33. Krishnan, A.K.; Wong, Y.C.; Zhang, Z.; Arulrajah, A. A Transition towards Circular Economy with the Utilisation of Recycled Fly Ash and Waste Materials in Clay, Concrete and Fly Ash Bricks: A Review. *J. Build. Eng.* **2024**, *98*, 111210. [CrossRef]
34. Chen, Y.; Fan, Y.; Huang, Y.; Liao, X.; Xu, W.; Zhang, T. A Comprehensive Review of Toxicity of Coal Fly Ash and Its Leachate in the Ecosystem. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2024**, *269*, 115905. [CrossRef] [PubMed]
35. Szcześniak, A.; Siwiński, J.; Stolarski, A.; Piekarczyk, A.; Nasiłowska, B. The Influence of the Addition of Microsilica and Fly Ash on the Properties of Ultra-High-Performance Concretes. *Materials* **2024**, *18*, 28. [CrossRef]
36. Singh, G.B.; Prasad, V.D. Environmental Impact of Concrete Containing High Volume Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag. *J. Clean. Prod.* **2024**, *448*, 141729. [CrossRef]
37. Ahmed, A. Assessing the Effects of Supplementary Cementitious Materials on Concrete Properties: A Review. *Discov. Civ. Eng.* **2024**, *1*, 145. [CrossRef]
38. Priyadarshini, M.; Patnaik, M.; Giri, J.P. A Probabilistic Approach for Identification of Compressive Strength of Fly Ash Bricks. *Innov. Infrastruct. Solut.* **2018**, *3*, 56. [CrossRef]
39. Ram, A.K.; Reddy, M.V.R.K.; Mohanty, S. Identification of Preferable Method for the Precise Estimation of Coefficient of Consolidation (C_v) for Coal Ash. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2023**, *27*, 860–892. [CrossRef]
40. Panda, L.; Dash, S. Characterization and Utilization of Coal Fly Ash: A Review. *Emerg. Mater. Res.* **2020**, *9*, 921–934. [CrossRef]
41. Alterary, S.S.; Marei, N.H. Fly Ash Properties, Characterization, and Applications: A Review. *J. King Saud Univ. Sci.* **2021**, *33*, 101536. [CrossRef]
42. Sahoo, D.K.; Kishor, M.S.V.R.; Sahoo, D.P.; Sarkar, S.; Behera, A. Nanoscale Analysis on Spark Plasma Sintered Fly-Ash Bricks and Their Comparative Study with SiN-Zr Refractory Bricks. *Micro Nanosyst.* **2020**, *12*, 122–128. [CrossRef]
43. Xu, Z.; Zhang, D.; Li, H.; Sun, X.; Zhao, K.; Wang, Y. Effect of FA and GGBFS on Compressive Strength, Rheology, and Printing Properties of Cement-Based 3D Printing Material. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *339*, 127685. [CrossRef]
44. Paritala, S.; Singaram, K.K.; Bathina, I.; Khan, M.A.; Jyosyula, S.K.R. Rheology and Pumpability of Mix Suitable for Extrusion-Based Concrete 3D Printing—A Review. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *402*, 132962. [CrossRef]

45. Abu Taqa, A.; Mohsen, M.O.; Aburumman, M.O.; Naji, K.; Taha, R.; Senouci, A. Nano-Fly Ash and Clay for 3D-Printing Concrete Buildings: A Fundamental Study of Rheological, Mechanical and Microstructural Properties. *J. Build. Eng.* **2024**, *92*, 109718. [[CrossRef](#)]
46. Luo, S.; Jin, W.; Wu, W.; Zhang, K. Rheological and Mechanical Properties of Polyformaldehyde Fiber Reinforced 3D-Printed High-Strength Concrete with the Addition of Fly Ash. *J. Build. Eng.* **2024**, *98*, 111387. [[CrossRef](#)]
47. Tseng, K.-C.; Chi, M.; Yeih, W.; Huang, R. Influence of Slag/Fly Ash as Partial Cement Replacement on Printability and Mechanical Properties of 3D-Printed Concrete. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 3933. [[CrossRef](#)]
48. Abudawaba, F.; Gomaa, E.; Ghenni, A.; ElGawady, M. Developing Mix Proportions for Class C Fly Ash-Based Alkali-Activated 3D-Printed Concrete Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2022**, *2676*, 197–212. [[CrossRef](#)]
49. Samrani, P.; Cao, Y.; Fimbres-Weihs, G.; Sanjaya, E.; Abbas, A. Effect of Fly Ash and Ground Waste Glass as Cement Replacement in Concrete 3D-Printing for Sustainable Construction. *Front. Built Environ.* **2024**, *10*, 1430174. [[CrossRef](#)]
50. Wibowo, A.P.; Saidani, M. Mortar with Fly Ash as a Partial Cement Replacement: Analysing the Compressive Strength and Heat of Hydration. In Proceedings of the Third International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials (ICCIM 2023), Jakarta, Indonesia, 27–29 July 2023; Volume 429, p. 05033. [[CrossRef](#)]
51. Choi, Y.-C.; Park, B. Effects of Fly Ash Particle Size and Chemical Activators on the Hydration of High-Volume Fly Ash Mortars. *Materials* **2024**, *17*, 5485. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Melichar, J.; Žižková, N.; Brožovský, J.; Mészárosová, L.; Hermann, R. Study of the Interaction of Cement-Based Materials for 3D Printing with Fly Ash and Superabsorbent Polymers. *Buildings* **2022**, *12*, 2008. [[CrossRef](#)]
53. Abudawaba, F.; Gomaa, E.; Ghenni, A.A.; Feys, D.; ElGawady, M.A. Evaluation of Fresh Properties of High Calcium Content Fly Ash-Based Alkali-Activated 3D-Printed Mortar. *J. Build. Eng.* **2025**, *104*, 112244. [[CrossRef](#)]
54. Schackow, A.; Andrade Neto, J.D.S.; Hack, L.; Folgueras, M.V.; Kirchheim, A.P.; Rodríguez Martínez, E.D.; Matos, P.R.D. Coal Bottom Ash as Supplementary Cementitious Material: Optimizing Reactivity Through Particle Grinding. *Sustainability* **2025**, *17*, 5031. [[CrossRef](#)]
55. Argiz, C.; Sanjuán, M.Á.; Menéndez, E. Coal Bottom Ash for Portland Cement Production. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *2017*, 6068286. [[CrossRef](#)]
56. Hokkaido Electric Power Co., Inc. About Coal Ash. What Is Coal Ash? 2020. Available online: https://www.hepco.co.jp/english/environment/coal_ash_about.html (accessed on 3 September 2025).
57. Ganesan, H.; Sachdeva, A.; Petrounias, P.; Lampropoulou, P.; Sharma, P.K.; Kumar, A. Impact of Fine Slag Aggregates on the Final Durability of Coal Bottom Ash to Produce Sustainable Concrete. *Sustainability* **2023**, *15*, 6076. [[CrossRef](#)]
58. Chuang, C.-W.; Chen, T.-A.; Huang, R. Effect of Finely Ground Coal Bottom Ash as Replacement for Portland Cement on the Properties of Ordinary Concrete. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 13212. [[CrossRef](#)]
59. Oruji, S.; Brake, N.A.; Nalluri, L.; Guduru, R.K. Strength Activity and Microstructure of Blended Ultra-Fine Coal Bottom Ash-Cement Mortar. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *153*, 317–326. [[CrossRef](#)]
60. Guan, X.; Wang, L.; Mo, L. Effects of Ground Coal Bottom Ash on the Properties of Cement-Based Materials under Various Curing Temperatures. *J. Build. Eng.* **2023**, *69*, 106196. [[CrossRef](#)]
61. Aydin, E. Novel Coal Bottom Ash Waste Composites for Sustainable Construction. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *124*, 582–588. [[CrossRef](#)]
62. Poudel, S.; Menda, S.; Useldinger-Hoefs, J.; Guteta, L.E.; Dockter, B.; Gedafa, D.S. The Use of Ground Coal Bottom Ash/Slag as a Cement Replacement for Sustainable Concrete Infrastructure. *Materials* **2024**, *17*, 2316. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
63. Al Biajawi, M.I.; Embong, R.; Muthusamy, K.; Ismail, N.; Obianyo, I.I. Recycled Coal Bottom Ash as Sustainable Materials for Cement Replacement in Cementitious Composites: A Review. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *338*, 127624. [[CrossRef](#)]
64. Miyamoto, T.; Akahane, K.; Torii, K.; Hayashiguchi, S. Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate for Concrete. 2015. Available online: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/109-18.pdf> (accessed on 3 September 2025).
65. Ahmad, J.; Kontoleon, K.J.; Majdi, A.; Naqash, M.T.; Deifalla, A.F.; Ben Kahla, N.; Isleem, H.F.; Qaidi, S.M.A. A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability* **2022**, *14*, 8783. [[CrossRef](#)]
66. Omer, B.; Saeed, N.M.; Dheyaaldin, M.H.; Jamal, A.S.; Kurda, R. Evaluating the Long-Term Strength of GGBFS-Blended Cement across Various Water-to-Binder and Superplasticizer Ratios under Heating/Cooling Cycles. *PLoS ONE* **2025**, *20*, e0319923. [[CrossRef](#)]
67. Jozić, D.; Ljubičić, B.; Petrović, A.; Čović, A.; Juradin, S. The Influence of GGBFS as an Additive Replacement on the Kinetics of Cement Hydration and the Mechanical Properties of Cement Mortars. *Buildings* **2023**, *13*, 1960. [[CrossRef](#)]
68. Akhlaq, H.; Peng, T.; Ajmal, M.M.; Khan, M.S.; Riaz, M. Impact of GGBS on the Rheology and Mechanical Behavior of Pumpable Concrete. *Front. Mater.* **2025**, *12*, 1614951. [[CrossRef](#)]

69. Rahmat, N.F.; Ali, N.; Abdullah, S.R.; Abdul Hamid, N.A.; Salleh, N.; Shahidan, S. Fresh Properties and Flexural Strength of 3D Printing Sustainable Concrete Containing GGBS as Partial Cement Replacement. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth Environmental Science, Wuhan, China, 6–11 June 2023; IOP Publishing: Bristol, UK, 2023; Volume 1205, p. 012042. [CrossRef]
70. Shoueb, M.B. Characterization of Fresh and Hardened Properties of 3D Printable Cementitious Materials Produced with Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. Master's Thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 2021.
71. Shreyas, K. Characteristics of GGBS as an Alternate Material in Conventional Concrete. *Int. J. Creat. Res. Thoughts* **2017**, *5*, 3174–3184.
72. Roszak, W.; Kubiczek, F. *Concretes Made of Lightweight Aggregates*; Arkady: Warsaw, Poland, 1989.
73. Rehman, A.U.; Kim, J.-H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials* **2021**, *14*, 3800. [CrossRef]
74. Chan, L.-J.; Padil, K.H.; Chin, C.-L.; Ibrahim, I.S.; Ma, C.-K.; Chiew, S.-M.; Ler, K.-H.; Ab Ghafar, M.A.I. Strategies to Enhance Interlayer Bonding in 3D Printed Concrete: A Review. *J. Build. Eng.* **2025**, *113*, 114077. [CrossRef]
75. Tao, Y.; Lesage, K.; Van Tittelboom, K.; Yuan, Y.; De Schutter, G. Influence of Substrate Surface Roughness and Moisture Content on Tensile Adhesion Performance of 3D Printable Concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2022**, *126*, 104350. [CrossRef]
76. Strzałkowska, E. *Characteristics of Physicochemical and Mineralogical Properties of Selected Coal Combustion By-Products*; Silesian University of Technology Publishing House: Gliwice, Poland, 2011.
77. Smarzewski, P. Long-Term Behavior and Microstructure of High-Performance Concrete with Coal Slag. *Materials* **2025**, *18*, 2585. [CrossRef]
78. Guteta, L.E.; Menda, S.; Poudel, S.; Useldinger-Hoefs, J.; Gedafa, D.S.; Dockter, B. Effect of Coal Bottom Ash and Coal Bottom Slag on Fresh, Mechanical, and Durability Properties of Concrete. In Proceedings of the International Conference on Transportation and Development, Atlanta, GA, USA, 13 June 2024; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2024; pp. 197–208.
79. Regulation of the Council of Ministers of 2 January 2007 on the Requirements for the Content of Natural Radioactive Isotopes of Potassium K-40, Radium Ra-226, and Thorium Th-228 in Raw Materials and Materials Used in Buildings Intended for the Stay of People and Livestock, as Well as in Industrial Waste Used in Construction, and the Control of the Content of These Isotopes (Dz.U. 2007 nr 4, poz. 29). Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20070040029> (accessed on 25 September 2025).
80. Trinh, Q.V.; Mucsi, G.; Dang, T.V.; Le, L.P.; Bui, V.H.; Nagy, S. The influence of process conditions on ground coal slag and blast furnace slag based geopolymer properties. *Rud. Geološko Naft. Zb.* **2020**, *35*, 15–20. [CrossRef]
81. Luo, B.; Su, Y.; Ding, X.; Chen, Y.; Liu, C. Modulation of Initial CaO/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ Ratios on the Properties of Slag/Fly Ash-Based Geopolymer Stabilized Clay: Synergistic Effects and Stabilization Mechanism. *Mater. Today Commun.* **2025**, *47*, 113295. [CrossRef]
82. Khargerdi, H.R.; Movahedifar, S.M.; Motavalizadehkakhky, A.; Honarbakhsh, A.; Zhiani, R. Effects of FeNi₃ Nanoparticles and Coal Slag on Mechanical and Durability Properties of Concrete against Acidic Environments. *Adv. Civ. Eng.* **2023**, *2023*, 5596917. [CrossRef]
83. Rudziewicz, M.; Hutyra, A.; Maroszek, M.; Korniejenko, K.; Hebda, M. 3D-Printed Lightweight Foamed Concrete with Dispersed Reinforcement. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 4527. [CrossRef]
84. Ren, D.; Shi, D.; Guo, X. Mechanical Properties, Pore Structure, and Carbon Emission of Concrete by Using Coal-Fired Slag Powder to Partially Replace Cement. *Case Stud. Constr. Mater.* **2025**, *23*, e04972. [CrossRef]
85. Liu, K.; Qiu, R.; Gou, J.; Ning, B.; Cui, C.; Chen, Y.; Wang, T. Experimental and Numerical Exploration of a New Application of Coal Slag to Treat Loose Sand Foundation. *J. Clean. Prod.* **2024**, *441*, 140936. [CrossRef]
86. Khan, A.M.; Elahi, A.; Waqas, R.M.; Kirgiz, M.S.; Nagaprasad, N.; Ramaswamy, K. Influence of Bentonite, Silica Fume, and Polypropylene Fibers on Green Concrete for Pavement and Structural Durability. *Sci. Rep.* **2025**, *15*, 29567. [CrossRef]
87. Chen, Z.; Zhang, Z.; Yi, M.; Yuan, Q.; Wang, D.; Liu, J. Study on the Durability of Silica Fume Concrete in High Sulfate Environment of Plateau. In *Proceedings of Conference on Sustainable Traffic and Transportation Engineering in 2023*; Bieliatynskiy, A., Komyshev, D., Zhao, W., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Nature: Singapore, Singapore, 2024; Volume 603, pp. 15–29. ISBN 978-981-97-5813-5.
88. Alhajiri, A.M.; Akhtar, M.N. Enhancing Sustainability and Economics of Concrete Production through Silica Fume: A Systematic Review. *Civ. Eng. J.* **2023**, *9*, 2612–2629. [CrossRef]
89. Rashidian-Dezfouli, H.; Afshinnia, K.; Rangaraju, P.R. Efficiency of Ground Glass Fiber as a Cementitious Material, in Mitigation of Alkali-Silica Reaction of Glass Aggregates in Mortars and Concrete. *J. Build. Eng.* **2018**, *15*, 171–180. [CrossRef]
90. Ahmad, J.; Martinez-Garcia, R.; Algarni, S.; de-Prado-Gil, J.; Alqahtani, T.; Irshad, K. Characteristics of Sustainable Concrete with Partial Substitutions of Glass Waste as a Binder Material. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2022**, *16*, 21. [CrossRef]
91. Barkauskas, K. The effect of ground glass waste on properties of hardened cement paste and mortar. *Ceram. Silik.* **2020**, *64*, 478–487. [CrossRef]

92. Muhedin, D.A.; Ibrahim, R.K. Effect of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement & Sand in Concrete. *Case Stud. Constr. Mater.* **2023**, *19*, e02512. [[CrossRef](#)]
93. Óze, C.; Badacsonyi, N.; Makó, É. Mechanochemical Activation of Waste Clay Brick Powder with Addition of Waste Glass Powder and Its Influence on Pozzolan Reactivity. *Molecules* **2024**, *29*, 5740. [[CrossRef](#)]
94. Liu, H.; Liu, C.; Wu, Y.; Bai, G.; He, C.; Yao, Y.; Zhang, R.; Wang, Y. 3D Printing Concrete with Recycled Coarse Aggregates: The Influence of Pore Structure on Interlayer Adhesion. *Cem. Concr. Compos.* **2022**, *134*, 104742. [[CrossRef](#)]
95. Ma, J.; Zhang, H.; Wang, Y.; Xiong, L.; Wu, X. Effect of Clay Brick Powder and Recycled Fine Aggregates on Properties of 3D Printed Concrete after High Temperature Exposure. *Constr. Build. Mater.* **2025**, *491*, 142676. [[CrossRef](#)]
96. Ge, Z.; Sun, R.J.; Zheng, L. Mechanical Properties of Concrete with Recycled Clay-Brick-Powder. *Adv. Mater. Res.* **2011**, *250*, 360–364. [[CrossRef](#)]
97. Letelier, V.; Henríquez-Jara, B.I.; Manosalva, M.; Parodi, C.; Ortega, J.M. Use of Waste Glass as A Replacement for Raw Materials in Mortars with a Lower Environmental Impact. *Energies* **2019**, *12*, 1974. [[CrossRef](#)]
98. Poudel, S.; Bhetuwal, U.; Kharel, P.; Khatiwada, S.; Kc, D.; Dhital, S.; Lamichhane, B.; Yadav, S.K.; Suman, S. Waste Glass as Partial Cement Replacement in Sustainable Concrete: Mechanical and Fresh Properties Review. *Buildings* **2025**, *15*, 857. [[CrossRef](#)]
99. Liu, J.; Li, S.; Gunasekara, C.; Fox, K.; Tran, P. 3D-Printed Concrete with Recycled Glass: Effect of Glass Gradation on Flexural Strength and Microstructure. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *314*, 125561. [[CrossRef](#)]
100. Deng, Q.; Zou, S.; Xi, Y.; Singh, A. Development and Characteristic of 3D-Printable Mortar with Waste Glass Powder. *Buildings* **2023**, *13*, 1476. [[CrossRef](#)]
101. EN 206-1:2000; Concrete—Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity. NSAI Standard: Dublin, Ireland, 2000.
102. Colman, C.; Bulteel, D.; Elkirim, B.M.; Rémond, S.; Courard, L. Expansion of Concrete by Secondary Ettringite Formation Due to Fine Recycled Aggregates Contaminated with Gypsum. *Adv. Cem. Res.* **2023**, *35*, 480–488. [[CrossRef](#)]
103. Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 735–742. [[CrossRef](#)]
104. Wardeh, G.; Ghorbel, E.; Gomart, H. Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2015**, *9*, 1–20. [[CrossRef](#)]
105. Meddah, M.; Al-Harthy, A.A.; Ismail, M. Recycled Concrete Aggregates and Their Influences on Performances of Low and Normal Strength Concretes. *Buildings* **2020**, *10*, 167. [[CrossRef](#)]
106. Reis, G.S.D.; Quattrone, M.; Ambrós, W.M.; Grigore Cazacliu, B.; Hoffmann Sampaio, C. Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. *Materials* **2021**, *14*, 1700. [[CrossRef](#)]
107. García-González, J.; Rodríguez-Robles, D.; Juan-Valdés, A.; Morán-del Pozo, J.; Guerra-Romero, M. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. *Materials* **2014**, *7*, 6224–6236. [[CrossRef](#)]
108. Alami, A.H.; Olabi, A.G.; Ayoub, M.; Aljaghoub, H.; Alasad, S.; Abdelkareem, M.A. 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. *Buildings* **2023**, *13*, 924. [[CrossRef](#)]
109. Ding, T.; Xiao, J.; Zou, S.; Wang, Y. Hardened Properties of Layered 3D Printed Concrete with Recycled Sand. *Cem. Concr. Compos.* **2020**, *113*, 103724. [[CrossRef](#)]
110. Ting, G.H.A.; Tay, Y.W.D.; Qian, Y.; Tan, M.J. Utilization of Recycled Glass for 3D Concrete Printing: Rheological and Mechanical Properties. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2019**, *21*, 994–1003. [[CrossRef](#)]
111. Liu, H.; Liu, C.; Wu, Y.; Bai, G.; He, C.; Zhang, R.; Wang, Y. Hardened Properties of 3D Printed Concrete with Recycled Coarse Aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2022**, *159*, 106868. [[CrossRef](#)]
112. Cavalcante, T.C.; Filho, R.D.T.; Reales, O.A.M. Rheological and Environmental Implications of Recycled Concrete Powder as Filler in Concrete 3D Printing. *Buildings* **2025**, *15*, 1280. [[CrossRef](#)]
113. Cavalcante, T.C.; Toledo Filho, R.D.; Reales, O.A.M. Influence of Recycled Concrete Powder on Rheology of Printable Cement-Based Matrixes. *Mat. J.* **2024**, *121*, 69–80. [[CrossRef](#)]
114. Zhuang, Z.; Xu, F.; Ye, J.; Hu, N.; Jiang, L.; Weng, Y. A Comprehensive Review of Sustainable Materials and Toolpath Optimization in 3D Concrete Printing. *NPJ Mater. Sustain.* **2024**, *2*, 12. [[CrossRef](#)]
115. Wu, Y.; Liu, C.; Bai, G.; Liu, H.; Meng, Y.; Wang, Z. 3D Printed Concrete with Recycled Sand: Pore Structures and Triaxial Compression Properties. *Cem. Concr. Compos.* **2023**, *139*, 105048. [[CrossRef](#)]
116. Wu, Y.; Liu, C.; Liu, H.; Zhang, Z.; He, C.; Liu, S.; Zhang, R.; Wang, Y.; Bai, G. Study on the Rheology and Buildability of 3D Printed Concrete with Recycled Coarse Aggregates. *J. Build. Eng.* **2021**, *42*, 103030. [[CrossRef](#)]
117. Pepe, M.; Lombardi, R.; Lima, C.; Paolillo, B.; Martinelli, E. Experimental Evidence on the Possible Use of Fine Concrete and Brick Recycled Aggregates for 3D Printed Cement-Based Mixtures. *Materials* **2025**, *18*, 583. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
118. Christen, H.; Van Zijl, G.; De Villiers, W. The Incorporation of Recycled Brick Aggregate in 3D Printed Concrete. *Clean. Mater.* **2022**, *4*, 100090. [[CrossRef](#)]

119. Oosthuizen, J.D.; Babafemi, A.J.; Walls, R.S. 3D-Printed Recycled Plastic Eco-Aggregate (Resin8) Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *408*, 133712. [[CrossRef](#)]
120. Skibicki, S.; Pułtorak, M.; Kaszyńska, M.; Hoffmann, M.; Ekiert, E.; Sibera, D. The Effect of Using Recycled PET Aggregates on Mechanical and Durability Properties of 3D Printed Mortar. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *335*, 127443. [[CrossRef](#)]
121. Liu, J.; Setunge, S.; Tran, P. 3D Concrete Printing with Cement-Coated Recycled Crumb Rubber: Compressive and Microstructural Properties. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *347*, 128507. [[CrossRef](#)]
122. Valente, M.; Sambucci, M.; Chougan, M.; Ghaffar, S.H. Composite Alkali-Activated Materials with Waste Tire Rubber Designed for Additive Manufacturing: An Eco-Sustainable and Energy Saving Approach. *J. Mater. Res. Technol.* **2023**, *24*, 3098–3117. [[CrossRef](#)]
123. Sambucci, M.; Biblioteca, I.; Valente, M. Life Cycle Assessment (LCA) of 3D Concrete Printing and Casting Processes for Cementitious Materials Incorporating Ground Waste Tire Rubber. *Recycling* **2023**, *8*, 15. [[CrossRef](#)]
124. Zou, M.; Liu, C.; Zhang, K.; Li, W.; Cao, Q.; Zhang, L.; Gu, T.; Zhang, G.; Liu, L. Evaluation and Control of Printability and Rheological Properties of 3D-Printed Rubberized Concrete. *J. Build. Eng.* **2023**, *80*, 107988. [[CrossRef](#)]
125. Ambily, P.S.; Kaliyavaradhan, S.K.; Sebastian, S.; Shekar, D. Sustainable 3D Printable Concrete Mix Using Copper Slag. *J. Build. Eng.* **2025**, *101*, 111950. [[CrossRef](#)]
126. Tran, N.; Van Tran, M.; Tran, P.; Nguyen, A.K.; Nguyen, C.Q. Eco-Friendly 3D-Printed Concrete Using Steel Slag Aggregate: Buildability, Printability and Mechanical Properties. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2024**, *18*, 66. [[CrossRef](#)]
127. Pavlů, T.; Pešta, J.; Fořtová, K.; Řepka, J. Recycled Concrete in Foundations: Mechanical and Environmental Insights. *Buildings* **2025**, *15*, 1237. [[CrossRef](#)]
128. Ahmad, J.; Majdi, A.; Babeker Elhag, A.; Deifalla, A.F.; Soomro, M.; Isleem, H.F.; Qaidi, S. A Step towards Sustainable Concrete with Substitution of Plastic Waste in Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Crystals* **2022**, *12*, 944. [[CrossRef](#)]
129. Sbardelotto, E.K.; Vieira, M.G.; Ferreira Dos Santos, K.; Pereira Dos Santos, S.; Martins Toralles, B. Exploratory Study on the Rheological Behaviour of 3D Printable Mortars Incorporating Fine Recycled Concrete Aggregates (FRCA). *MATEC Web Conf.* **2025**, *409*, 06005. [[CrossRef](#)]
130. Gao, H.; Jin, L.; Chen, Y.; Chen, Q.; Liu, X.; Yu, Q. Rheological Behavior of 3D Printed Concrete: Influential Factors and Printability Prediction Scheme. *J. Build. Eng.* **2024**, *91*, 109626. [[CrossRef](#)]
131. Yang, L.; Gao, Y.; Chen, H.; Jiao, H.; Dong, M.; Bier, T.A.; Kim, M. Three-Dimensional Concrete Printing Technology from a Rheology Perspective: A Review. *Adv. Cem. Res.* **2024**, *36*, 567–586. [[CrossRef](#)]
132. Bao, T.M.P.; Yeakleang, M.; Abdelouhab, S.; Courard, L. Testing Mortars for 3D Printing: Correlation with Rheological Behavior. *Materials* **2024**, *17*, 5002. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
133. Al Martini, S.; Khartabil, A.; Saboumi, A.R. Sustainable Concrete Using Recycled Aggregate and Supplementary Cementitious Materials. In Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, Vancouver, BC, Canada, 10–13 December 2017.
134. Li, Q.; Fan, Y.; Shah, S.P. Rheological Properties and Structural Build-Up of Cement Based Materials with Addition of Nanoparticles: A Review. *Buildings* **2022**, *12*, 2219. [[CrossRef](#)]
135. Irshidat, M.; Cabibihan, J.-J.; Fadli, F.; Al-Ramahi, S.; Saadeh, M. Waste Materials Utilization in 3D Printable Concrete for Sustainable Construction Applications: A Review. *Emergent Mater.* **2025**, *8*, 1357–1379. [[CrossRef](#)]
136. Sagoe-Crentsil, K.K.; Brown, T.; Taylor, A.H. Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 707–712. [[CrossRef](#)]
137. Duan, Z.; Hou, S.; Xiao, J.; Li, B. Study on the Essential Properties of Recycled Powders from Construction and Demolition Waste. *J. Clean. Prod.* **2020**, *253*, 119865. [[CrossRef](#)]
138. Singh, A.; Miao, X.; Zhou, X.; Deng, Q.; Li, J.; Zou, S.; Duan, Z. Use of Recycled Fine Aggregates and Recycled Powders in Sustainable Recycled Concrete. *J. Build. Eng.* **2023**, *77*, 107370. [[CrossRef](#)]
139. Khatib, J.M. Properties of Concrete Incorporating Fine Recycled Aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2005**, *35*, 763–769. [[CrossRef](#)]
140. Ding, Y.; Zhang, Y.; Zhao, Y.; Zhang, M.; Tong, J.; Zhu, L.; Guo, S. Impact of Pre-Soaked Lime Water Carbonized Recycled Fine Aggregate on Mechanical Properties and Pore Structure of 3D Printed Mortar. *J. Build. Eng.* **2024**, *89*, 109190. [[CrossRef](#)]
141. Emad, W.; Mohammed, A.S.; Kurda, R.; Ghafor, K.; Cavaleri, L.; Qaidi, S.M.; Hassan, A.M.T.; Asteris, P.G. Prediction of Concrete Materials Compressive Strength Using Surrogate Models. *Structures* **2022**, *46*, 1243–1267. [[CrossRef](#)]
142. Nedeljković, M.; Visser, J.; Šavija, B.; Valcke, S.; Schlangen, E. Use of Fine Recycled Concrete Aggregates in Concrete: A Critical Review. *J. Build. Eng.* **2021**, *38*, 102196. [[CrossRef](#)]
143. Tay, Y.W.D.; Panda, B.; Paul, S.C.; Noor Mohamed, N.A.; Tan, M.J.; Leong, K.F. 3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review. *Virtual Phys. Prototyp.* **2017**, *12*, 261–276. [[CrossRef](#)]
144. Xiao, J.; Han, N.; Zhang, L.; Zou, S. Mechanical and Microstructural Evolution of 3D Printed Concrete with Polyethylene Fiber and Recycled Sand at Elevated Temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *293*, 123524. [[CrossRef](#)]

145. Aboalella, A.A.; Elmalky, A. Use of Crushed Bricks and Recycled Concrete as Replacement for Fine and Coarse Aggregates for Sustainable Concrete Production. *Chall. J. Concr. Res. Lett.* **2023**, *14*, 39. [CrossRef]
146. Zheng, C.; Lou, C.; Du, G.; Li, X.; Liu, Z.; Li, L. Mechanical Properties of Recycled Concrete with Demolished Waste Concrete Aggregate and Clay Brick Aggregate. *Results Phys.* **2018**, *9*, 1317–1322. [CrossRef]
147. Rudziewicz, M.; Maroszek, M.; Hutyra, A.; Góra, M.; Rusin-Żurek, K.; Hebda, M. Influence of Foaming Agents and Stabilizers on Porosity in 3D Printed Foamed Concrete. *Processes* **2025**, *13*, 403. [CrossRef]
148. Zhang, H.; Ma, J.; Wu, B.; Lü, Y. Effect of Recycled Fine Aggregate and Clay Brick Powder on Properties of 3D Printed Concrete. *Nat. Sci. Ed.* **2024**, *52*, 18–27. [CrossRef]
149. Peyrot, I.C. Development and Validation of a 3D Computational Tool to Describe Damage and Fracture Due to Alkali-Silica Reaction in Concrete Structures. Ph.D. Thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France, 2006.
150. Kim, I.S.; Choi, S.Y.; Yang, E.I. Evaluation of Durability of Concrete Substituted Heavyweight Waste Glass as Fine Aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *184*, 269–277. [CrossRef]
151. Jiao, Y.; Zhang, Y.; Guo, M.; Zhang, L.; Ning, H.; Liu, S. Mechanical and Fracture Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Containing Waste Glass Sand as Partial Replacement Material. *J. Clean. Prod.* **2020**, *277*, 123501. [CrossRef]
152. Maroszek, M.; Hager, I.; Mróz, K.; Sitarz, M.; Hebda, M. Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers. *Materials* **2025**, *18*, 3845. [CrossRef]
153. Mim, N.J.; Shaikh, F.U.A.; Sarker, P.K. Sustainable 3D Printed Concrete Incorporating Alternative Fine Aggregates: A Review. *Case Stud. Constr. Mater.* **2025**, *22*, e04570. [CrossRef]
154. Roussel, N. Rheological Requirements for Printable Concretes. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *112*, 76–85. [CrossRef]
155. Şahin, H.G.; Mardani, A.; Mardani, N. Performance Requirements and Optimum Mix Proportion of High-Volume Fly Ash 3D Printable Concrete. *Buildings* **2024**, *14*, 2069. [CrossRef]
156. Panda, B.; Tan, M.J. Experimental Study on Mix Proportion and Fresh Properties of Fly Ash Based Geopolymer for 3D Concrete Printing. *Ceram. Int.* **2018**, *44*, 10258–10265. [CrossRef]
157. Liu, B.; Huang, X.; Zhang, X.; Ren, S.; Lan, Q.; Luo, C. Numerical and Experimental Studies on the Improvement of Gas Chamber Structure during Gas-Assisted Extrusion. *Polymers* **2022**, *14*, 5272. [CrossRef] [PubMed]
158. Salah, H.A.; Mutalib, A.A.; Kaish, A.B.M.A.; Syamsir, A.; Algaifi, H.A. Development of Ultra-High-Performance Silica Fume-Based Mortar Incorporating Graphene Nanoplatelets for 3-Dimensional Concrete Printing Application. *Buildings* **2023**, *13*, 1949. [CrossRef]
159. Skibicki, S.; Federowicz, K.; Hoffmann, M.; Chougan, M.; Sibera, D.; Cendrowski, K.; Techman, M.; Pacheco, J.N.; Liard, M.; Sikora, P. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. *Materials* **2024**, *17*, 2580. [CrossRef]
160. Liu, Y.; Wang, L.; Yuan, Q.; Peng, J. Effect of Coarse Aggregate on Printability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *405*, 133338. [CrossRef]
161. Wang, X.; Du, L.; Liu, Z.; Li, M.; Weng, Y.; Liu, Z.; Tay, Y.W.D.; Fan, Z.; Wong, T.N.; Tan, M.J. 3D Cementitious Composites Printing with Pretreated Recycled Crumb Rubber: Mechanical and Acoustic Insulation Properties. *Virtual Phys. Prototyp.* **2024**, *19*, e2399787. [CrossRef]
162. Barve, P.; Bahrami, A.; Shah, S. Geopolymer 3D Printing: A Comprehensive Review on Rheological and Structural Performance Assessment, Printing Process Parameters, and Microstructure. *Front. Mater.* **2023**, *10*, 1241869. [CrossRef]
163. Hassan, A.; Alomayri, T.; Noaman, M.F.; Zhang, C. 3D Printed Concrete for Sustainable Construction: A Review of Mechanical Properties and Environmental Impact. *Arch. Comput. Methods Eng.* **2025**, *32*, 2713–2743. [CrossRef]
164. CEN EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021; Sustainability of Construction Works—Environmental Product Declarations—Core Rules for the Product Category of Construction Products. CEN: Brussels, Belgium, 2019.
165. Gheibi, M.; Karrabi, M.; Shakerian, M.; Mirahmadi, M. Life Cycle Assessment of Concrete Production with a Focus on Air Pollutants and the Desired Risk Parameters Using Genetic Algorithm. *J. Environ. Health Sci. Eng.* **2018**, *16*, 89–98. [CrossRef] [PubMed]
166. Sabău, M.; Bompa, D.V.; Silva, L.F.O. Comparative Carbon Emission Assessments of Recycled and Natural Aggregate Concrete: Environmental Influence of Cement Content. *Geosci. Front.* **2021**, *12*, 101235. [CrossRef]
167. ISO 14040:2006; Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
168. ISO 14044:2006; Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
169. ISO 21930:2017; Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works—Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2017.
170. PRé Sustainability. Simapro. 2025. Available online: <https://simapro.com> (accessed on 25 September 2025).
171. GreenDelta GmbH. openLCA. 2025. Available online: <https://www.openlca.org/> (accessed on 25 September 2025).

172. Cerclos Pty Ltd. eToolLCD. 2025. Available online: <https://cerclos.com/products/etool> (accessed on 25 September 2025).
173. Building Transparency. Tally. 2025. Available online: <https://apps.autodesk.com> (accessed on 25 September 2025).
174. One Click LCA Ltd. One Click LCA. 2025. Available online: <https://www.oneclicklca.com> (accessed on 25 September 2025).
175. Global Cement and Concrete Association (GCCA). GCCA Industry EPD Tool. 2025. Available online: <https://gccaepd.org> (accessed on 27 September 2025).
176. CEN EN 16757:2017; Sustainability of Construction Works—EPD—PCR for Concrete and Concrete Elements. CEN: Brussels, Belgium, 2022.
177. ISO ISO 14067:2018; Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2018.
178. Marinković, S.; Josa, I.; Braymand, S.; Tošić, N. Sustainability Assessment of Recycled Aggregate Concrete Structures: A Critical View on the Current State-of-knowledge and Practice. *Struct. Concr.* **2023**, *24*, 1956–1979. [[CrossRef](#)]
179. Suescum-Morales, D.; Fernández-Ledesma, E.; González-Caro, Á.; Merino-Lechuga, A.M.; Fernández-Rodríguez, J.M.; Jiménez, J.R. Carbon Emission Evaluation of CO₂ Curing in Vibro-Compacted Precast Concrete Made with Recycled Aggregates. *Materials* **2023**, *16*, 2436. [[CrossRef](#)]
180. Panesar, D.K.; Kanraj, D.; Abualrous, Y. Effect of Transportation of Fly Ash: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2019**, *99*, 214–224. [[CrossRef](#)]
181. Capon, R.; de Saulles, T. *UK Greenhouse Gas Inventory Improvement: Carbonation of Concrete Emissions Sink Modelling*; Mineral Products Association (MPA): London, UK, 2023. Available online: https://naei.energysecurity.gov.uk/sites/default/files/cat07/2307071003_UK_GHG_Inventory_Improvement_Recarbonation_Final_Report.pdf (accessed on 3 September 2025).
182. Witte, A.; Garg, N. Quantifying the Global Warming Potential of Low Carbon Concrete Mixes: Comparison of Existing Life Cycle Analysis Tools. *Case Stud. Constr. Mater.* **2024**, *20*, e02832. [[CrossRef](#)]
183. Dervishaj, A.; Malmqvist, T.; Silfwerbrand, J.; Gudmundsson, K. A Digital Workflow for Assessing Lifespan, Carbonation, and Embodied Carbon of Reusing Concrete in Buildings. *J. Build. Eng.* **2024**, *96*, 110536. [[CrossRef](#)]
184. Huang, H.; Wang, T.; Kolosz, B.; Andresen, J.; Garcia, S.; Fang, M.; Maroto-Valer, M.M. Life-Cycle Assessment of Emerging CO₂ Mineral Carbonation-Cured Concrete Blocks: Comparative Analysis of CO₂ Reduction Potential and Optimization of Environmental Impacts. *J. Clean. Prod.* **2019**, *241*, 118359. [[CrossRef](#)]
185. Linares, R.; López-Uceda, A.; Piccinalli, A.; Martínez-Ruedas, C.; Galvín, A.P. LCA Applied to Comparative Environmental Evaluation of Aggregate Production from Recycled Waste Materials and Virgin Sources. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2024**, *31*, 44023–44035. [[CrossRef](#)]
186. Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Jullien, A. Environmental Impact of Cement Production: Detail of the Different Processes and Cement Plant Variability Evaluation. *J. Clean. Prod.* **2010**, *18*, 478–485. [[CrossRef](#)]
187. National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). *Industry-Wide Environmental Product Declaration (EPD) for Ready Mixed Concrete*; NRMCA: Alexandria, VA, USA, 2017.
188. Heidelberg Materials UK. *UK Average Ready-Mixed Concrete—EPD According to EN 15804+A2*; EPD-Norge: Oslo, Norway, 2024.
189. Canadian Ready-Mixed Concrete Association (CRMCA). *Industry-Wide Environmental Product Declaration (EPD) for Ready-Mixed Concrete*; CRMCA: Ottawa, ON, Canada, 2022.
190. Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-Based Materials Industry. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *114*, 2–26. [[CrossRef](#)]
191. Juenger, M.C.G.; Snellings, R.; Bernal, S.A. Supplementary Cementitious Materials: New Sources, Characterization, and Performance Insights. *Cem. Concr. Res.* **2019**, *122*, 257–273. [[CrossRef](#)]
192. Silva, R.V.; De Brito, J.; Dhir, R.K. Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 201–217. [[CrossRef](#)]
193. Kurda, R.; Silvestre, J.D.; De Brito, J. Life Cycle Assessment of Concrete Made with High Volume of Recycled Concrete Aggregates and Fly Ash. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *139*, 407–417. [[CrossRef](#)]
194. Imtiaz, L.; Kashif-ur-Rehman, S.; Alaloul, W.S.; Nazir, K.; Javed, M.F.; Aslam, F.; Musarat, M.A. Life Cycle Impact Assessment of Recycled Aggregate Concrete, Geopolymer Concrete, and Recycled Aggregate-Based Geopolymer Concrete. *Sustainability* **2021**, *13*, 13515. [[CrossRef](#)]
195. Turner, L.K.; Collins, F.G. Carbon Dioxide Equivalent (CO₂-e) Emissions: A Comparison between Geopolymer and OPC Cement Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *43*, 125–130. [[CrossRef](#)]
196. Munir, Q.; Abdulkareem, M.; Horttanainen, M.; Kärki, T. A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Geopolymer Concrete Produced from Industrial Side Streams in Comparison with Traditional Concrete. *Sci. Total Environ.* **2023**, *865*, 161230. [[CrossRef](#)]
197. Tushar, Q.; Bhuiyan, M.A.; Abunada, Z.; Lemckert, C.; Giustozzi, F. Carbon Footprint and Uncertainties of Geopolymer Concrete Production: A Comprehensive Life Cycle Assessment (LCA). *C* **2025**, *11*, 55. [[CrossRef](#)]

198. Yao, Y.; Hu, M.; Di Maio, F.; Cucurachi, S. Life Cycle Assessment of 3D Printing Geo-polymer Concrete: An Ex-ante Study. *J Ind. Ecol.* **2020**, *24*, 116–127. [[CrossRef](#)]
199. Chen, Y.; Veer, F.A.; Copuroglu, O. A Critical Review of 3D Concrete Printing as a Low CO₂ Concrete Approach. *Heron* **2017**, *62*, 167–194.
200. Wolska-Kotańska, C. Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu. *Mag. Autostrady* **2005**, *3*, 18–22.
201. European Insulation Manufacturers Association (EURIMA). *Information Sheet on Mineral Wool Waste Handling*; EURIMA: Brussels, Belgium, 2016. Available online: https://www.eurima.org/uploads/files/modules/articles/1584367760_SC%20Eurima_waste_handling_Info_Sheet_06_06_2016_final.pdf (accessed on 3 September 2025).
202. European Commission. *LIFE ReWo—Recycling Mineral Wool Waste into High-Value Products*; European Commission: Brussels, Belgium, 2023. Available online: <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE22-ENV-IT-LIFE-ReWo-101113855/recycling-mineral-wool-waste-into-high-value-products> (accessed on 3 September 2025).
203. Fu, K.; Xue, Y.; Qiu, D.; Wang, P.; Lu, H. Multi-Channel Fusion Prediction of TBM Tunneling Thrust Based on Multimodal Decomposition and Reconstruction. *Tunn. Undergr. Space Technol.* **2026**, *167*, 107061. [[CrossRef](#)]
204. Dong, H.; Cao, W.; Bian, J.; Zhang, J. The Fire Resistance Performance of Recycled Aggregate Concrete Columns with Different Concrete Compressive Strengths. *Materials* **2014**, *7*, 7843–7860. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
205. Nemova, D.; Kotov, E.; Andreeva, D.; Khorobrov, S.; Olshevskiy, V.; Vasileva, I.; Zaborova, D.; Musorina, T. Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures. *Energies* **2022**, *15*, 4230. [[CrossRef](#)]
206. Suntharalingam, T.; Gatheeshgar, P.; Upasiri, I.; Poologanathan, K.; Nagaratnam, B.; Rajanayagam, H.; Navaratnam, S. Numerical Study of Fire and Energy Performance of Innovative Light-Weight 3D Printed Concrete Wall Configurations in Modular Building System. *Sustainability* **2021**, *13*, 2314. [[CrossRef](#)]
207. Fu, H.; Tian, J.; Chin, C.-L.; Liu, H.; Yuan, J.; Tang, S.; Mai, R.; Wu, X. Axial Compression Behavior of GFRP-Steel Composite Tube Confined Seawater Sea-Sand Concrete Intermediate Long Columns. *Eng. Struct.* **2025**, *333*, 120157. [[CrossRef](#)]
208. SKANSKA. Making Better Mixes: Low-Carbon and Circular Concrete. 2024. Available online: <https://group.skanska.com> (accessed on 3 September 2025).
209. Interreg Europe. Erc-Tech—Cutting Edge Use Case of Recycling Concrete. 2021. Available online: <https://www.interregeurope.eu> (accessed on 3 September 2025).
210. Holcim. CEM IV/B (V) 42,5 N-LH/NA. 2023. Available online: https://www.holcim.pl/sites/poland2/files/documents/karta_produkciowa_ecoplanet_cem_iv_bv_425_n-lh_na.pdf (accessed on 3 September 2025).
211. CEMEX. More Sustainable by Design. 2025. Available online: <https://www.cemex.com/products-solutions/vertua> (accessed on 3 September 2025).
212. Heidelberg Materials. Significant CO₂ Reduction: HeidelbergCement Expands Sustainable Concrete Portfolio in Germany Under EcoCrete Brand. 2022. Available online: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-20-01-2022> (accessed on 3 September 2025).

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.


Kraków, 28.09.2025


OŚWIADCZENIE - PUBLIKACJA 5

Oświadczam, iż mój wkład w powstanie publikacji pt.: „*Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review*” opublikowanej w czasopiśmie *Materials* w 2025 roku, nr DOI 10.3390/ma18194517 jest zgodny z informacją zawartą w poniższej tabeli.

Jednocześnie oświadczam, iż wyrażam zgodę na wykorzystanie wyżej wymienionej publikacji jako części rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka.

Imię i nazwisko współautora	Wkład w powstanie publikacji
Marcin Maroszek	Sformułowanie problemu badawczego i określenie zakresu przeglądu literatury. Opracowanie metodyki postępowania i podziału zagadnień. Identyfikacja i weryfikacja luk badawczych. Udział w analizie formalnej, procesie pozyskiwania, porządkowania i kuracji danych źródłowych. Współdziałanie w zarządzaniu projektem. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu wraz z opracowaniem rysunków, schematów i zestawień. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.
Magdalena Rudziewicz	Współautorstwo koncepcji pracy i doboru metodyki przeglądu. Udział w walidacji i analizie formalnej. Przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu oraz współautorstwo finalnej wersji tekstu.
Marek Hebda	Współautorstwo koncepcji przeglądu. Nadzór merytoryczny oraz współdziałanie w walidacji i analizie formalnej. Pozyskanie finansowania na realizację badań oraz opłatę kosztów publikacyjnych. Administracja projektem. Współautorstwo w pisaniu pierwszej wersji manuskryptu. Dyskusja i udział w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Korekta manuskryptu po recenzjach.


.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Marcin Maroszek


.....
podpis oświadczającego
mgr inż. Magdalena Rudziewicz


.....
podpis oświadczającego
dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK