

dr inż. Magdalena Piechówka-Mielnik^{1)*}

ORCID 0000-0003-1172-9238

dr hab. inż. Łukasz Bednarz, prof. uczelni¹⁾

ORCID 0000-0002-1245-6027

dr hab. inż. arch. Michał Krupa, prof. uczelni²⁾

ORCID 0000-0002-2199-0598

mgr inż. arch. Gabriela Wojciechowska³⁾

ORCID 0000-0001-7041-5373

mgr inż. Noëlla Dolińska³⁾

ORCID 0009-0007-7163-0375

Sustainable development in building engineering – hempcrete in 3D printing technology

*Zrównoważony rozwój w budownictwie
– beton konopny w technologii druku 3D*

DOI: 10.15199/33.2025.09.17

Abstract. The paper presents applications of 3D concrete printing technology and reinforcement of mixtures with hemp fibers. It discusses the requirements for 3D printable concretes, fiber properties, and their impact on the rheology and mechanical parameters of mixtures. The results of studies on cement mixtures with fiber addition are presented, considering the effect of the w/c ratio on consistency and print quality. Combining 3D printing with natural fibers supports sustainable construction.

Keywords: 3D printing; concrete; cement composites; hemp fibers; rheological properties; sustainable construction.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie technologii druku 3D betonu i zbrojenia mieszanek włóknami konopnymi. Omówiono wymagania dotyczące betonów do druku 3D, właściwości włókien oraz ich wpływ na reologię i parametry mechaniczne mieszanek, a także wyniki badań mieszanek cementowych z dodatkiem włókien, uwzględniając wpływ współczynnika w/c na konsystencję i jakość wydruku. Połączenie druku 3D z naturalnymi włóknami wspiera zrównoważone budownictwo.

Słowa kluczowe: druk 3D; beton; kompozyty cementowe; włókna konopne; właściwości reologiczne; zrównoważone budownictwo.

The prevailing societal expectations with regard to sustainable development, the pressure to reduce construction costs, and the demand for greater architectural freedom are driving factors in the search for innovative building solutions. In response to this challenge, the field of 3D concrete printing has seen significant advancements, with the incorporation of hemp fibers as a reinforcement material becoming a key development area. These technologies are increasingly being implemented in the construction of buildings with a variety of functions, ranging from residential units to public utility facilities.

3D concrete printing, a form of additive manufacturing, involves fabricating structures layer by layer using specialized large-scale printers. The most common method is concrete extrusion, which facilitates the fabrication of medium- and large-scale structural elements without the necessity for traditional formwork systems [1]. This process ensures significant material savings and facilitates the design of complex organic geometries that would otherwise be impossible to achieve using conventional construction techniques. For instance, the largest building of this type in Europe – and one of the largest in the world – was erected in 2024 for Heidelberg IT Management. The structure, with dimensions of approximately 54 m in length, 11 m in width and 9 m in height, was completed

oraz większe oczekiwania społeczne dotyczące zrównoważonego rozwoju, presja redukcji kosztów oraz potrzeba dużej swobody architektonicznej skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań. W odpowiedzi dynamicznie rozwija się druk betonu w technologii 3D oraz zastosowanie włókien konopnych jako zbrojenia. Na bazie tych technologii powstaje coraz więcej budynków o różnych funkcjach, od mieszkaniowych po obiekty użyteczności publicznej.

Drukowanie betonu 3D, będące formą produkcji addytywnej, polega na tworzeniu konstrukcji warstwa po warstwie przy użyciu specjalnych drukarek. Najpopularniejszą metodą jest ekstruzja betonu, umożliwiająca produkcję struktur o średniej i dużej skali bez potrzeby użycia tradycyjnych form szalunkowych [1]. Proces ten zapewnia nie tylko oszczędność materiałów, ale również umożliwia projektowanie złożonych, organicznych form, niemożliwych do osiągnięcia przy użyciu klasycznych metod budowlanych. Przykładem może być największy tego typu budynek w Europie i jeden z największych na świecie, który wzniesiono w 2024 r. na zlecenie firmy Heidelberg IT Management. Budynek o długości ok. 54 m, szerokości 11 m i wysokości 9 m zbudowano w ciągu kilku miesięcy, a jego forma jest dowodem na to, że technologia drukowania betonu 3D daje także nowe możliwości w zakresie kreacji architektonicznej [2÷3].

Technologia druku 3D w budownictwie wprowadza nowe możliwości w obszarze budownictwa zrównoważonego i ekologicznego, redukując ilość odpadów, skracając

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Architektury

³⁾ Szkoła Doktorska Politechniki Wrocławskiej

^{*)} Correspondence address: magdalena.piechowka-mielnik@pwr.edu.pl



within a period of several months. The geometry of the structure demonstrates that 3D concrete printing technology provides new opportunities in the fields of architectural design and structural engineering [2÷3].

This technology brings major advancements to sustainable construction, including reduced waste generation, shorter project delivery times and greater customization of structural elements. The ongoing digitalization of the construction sector, particularly the widespread use of Building Information Modelling (BIM), is driving its rapid development. BIM integrates design, analysis and execution within a single digital environment [4]. Despite its many advantages, 3D concrete printing poses unique challenges in terms of material design and performance. The fresh concrete mix must satisfy strength requirements while maintaining essential properties such as continuous flow through the nozzle, adequate workability, sufficient open time (printable time) and the ability to support successive layers without deformation (see Tables 1 and 2). Other critical properties in the fresh state include pumpability and extrusion efficiency (uniform, continuous flow without clogging or interruptions), as well as interlayer adhesion (bonding between successive layers) and the potential to incorporate reinforcement to enhance mechanical performance [5÷7]. The search for optimal solutions has become a major driver of research into new concrete composites, including those reinforced with natural fibers such as hemp.

Hemp fibers in construction

Industrial hemp is one of the oldest cultivated plants used by humans. Thanks to its versatility, rapid growth and exceptional material properties, it has a wide range of applications in many different industries, including construction. Hemp fibers are characterized by their high tensile strength, flexi-

čas realizacji projektów oraz umożliwiając wysoką personalizację konstrukcji. Jej dynamiczny rozwój wspiera cyfryzacja sektora budowlanego, w tym powszechne zastosowanie systemów BIM, które integrują projektowanie, analizę i realizację w jednym środowisku cyfrowym [4]. Pomimo licznych zalet, drukowanie betonu 3D stawia wyzwania związane z doborem odpowiednich materiałów. Beton używany w tym procesie musi spełniać wymagania wytrzymałościowe, a mieszanka betonowa zachowywać odpowiednie właściwości, takie jak zdolność do nieprzerwanego przepływu przez dyszę, urabialność (zdolność mieszanki

do zachowania struktury), czas pracy (czasu, w którym materiał zachowuje właściwości umożliwiające drukowanie), możliwości budowania kolejnych warstw bez deformacji (tabela 1 i 2). Nie można pominąć właściwości roboczych mieszanki betonowej, takich jak: pompowność; wydajność wytłaczania (równomierny, ciągły przepływ bez zapychania i przerw); przyleganie międzywarstwowe (nowe warstwy muszą dobrze wiązać się z poprzednimi) i możliwość wzmacniania (czasami w druk 3D wprowadza się zbrojenie, aby poprawić parametry mechaniczne) [5÷7]. Poszukiwanie optymalnych rozwiązań stało się impulsem do badań nad nowymi kompozytami betonowymi, w tym wykorzystującymi włókna pochodzenia naturalnego, jak włókna konopne.

Table 1. The most important requirements and technical parameters of mixture concrete/concrete for 3D printing

Tabela 1. Najważniejsze wymagania i parametry mieszanki betonowej/betonu do druku 3D

Parameter / Parametr	Description / Opis
Rheology / Reologia	high viscosity during flow and rapid hardening after extrusion (thixotropy) / duża lepkość podczas przepływu i szybkie twardnienie po wydruku (tiksotropowość).
Early strength / Wytrzymałość wczesna	must quickly gain strength to support subsequent layers (approx. 0.3–1 MPa within several minutes) / musi szybko uzyskać wytrzymałość, aby utrzymać kolejne warstwy (ok. 0,3–1 MPa w ciągu kilkunastu minut).
Stability / Stabilność	the mixture must not spread or deform under its own weight / mieszanka betonowa nie może się rozpylić ani deformować pod własnym ciężarem
Setting time / Czas wiązania	properly adjusted – not too fast (to avoid nozzle clogging), not too slow (to maintain geometry) / odpowiednio dopasowany – nie za szybki (aby nie zapchać dyszy), nie za wolny (żeby utrzymać geometrię)
Density / Gęstość	2000–2400 kg/m ³ (lightweight mixes are also possible) / 2000–2400 kg/m ³ (choć są też lekkie mieszanki)
Composition / Skład	cement, fine aggregates (<2 mm), mineral additives (e.g. fly ash, metakaolin), chemical admixtures (e.g. setting accelerators, plasticizers) / cement, kruszywo drobne (<2 mm), dodatki mineralne (np. popiół lotny, metakaolin), domieszki chemiczne (np. przyspieszacze wiązania, środki poprawiające plastyczność)

Table 2. Parameters for mixture concrete/concrete for 3D printing

Tabela 2. Kluczowe parametry mieszanki betonowej/betonu do druku 3D

Parameter / Parametr	Typical value / Typowa wartość
Consistency / Konsystencja	5–10 cm (slump cone) / 5–10 cm (stożek opadu)
Water/cement (W/C) / Woda/cement (W/C)	0.3 – 0.4
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie	20–60 MPa
Working time / Czas pracy	30–90 min
Initial setting time / Czas wiązania początkowego	up to 1 h / do 1 h
Layer thickness / Wysokość nakładanych warstw	10–30 mm
Printing speed / Szybkość druku	100–300 mm/s

Włókna konopne w budownictwie

Konopie przemysłowe są jedną z najstarszych roślin uprawnych wykorzystywanych przez człowieka. Dzięki swojej wszechstronności, szybkiemu wzrostowi oraz wyjątkowym właściwościom znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w tym w budownictwie. Włókna konopne charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie, elastycznością oraz odpornością na działanie czynni-



bility and resistance to atmospheric and environmental factors. Importantly, hemp is a renewable and biodegradable resource, making it highly valued in the context of sustainable development [8]. In construction, hemp fibers are used as a component of thermal insulation materials and to reinforce lightweight cementitious composites. Incorporating them into concrete mixes can enhance mechanical performance, improve crack resistance, reduce shrinkage and increase the overall durability of structural elements.

One particularly noteworthy application of hemp in construction is the production of hempcrete, a lightweight composite consisting of hemp shives (the woody core of the stalk) combined with a lime-based binder [8, 9]. This material is distinguished by its high vapor permeability, excellent thermal insulation performance and CO₂ sequestration capability, making it one of the most environmentally friendly construction materials currently on the market [10÷12].

Integration of 3D printing and hemp fibers

Combining 3D concrete printing technology with hemp fiber reinforcement creates new possibilities in modern construction. Hemp fibers can reinforce printed concrete naturally, improving its strength and resistance to cracking and fracture toughness [8]. However, incorporating hemp fibers into the 3D printing process requires the concrete mix design to be modified. Achieving the right rheological properties is essential to ensure smooth extrusion through the printer nozzle while maintaining strong interlayer bonding. Since natural fibers affect the viscosity and workability of fresh concrete, their dosage and method of incorporation must be carefully controlled.

Integrating hemp fibers into 3D-printed concrete also offers additional sustainable construction benefits. Industrial hemp absorbs significant amounts of CO₂ during growth, and using it as a component in cementitious composites can considerably reduce the carbon footprint of structures. Furthermore, the low density of hemp fibers reduces the weight of building elements, which can contribute to reduced energy consumption during transportation and assembly. Table 3 [1, 6, 7] presents a comparative study of three different concrete mixes for 3D printing, including those with natural fiber reinforcement.

Sustainable construction of the future

The concepts of sustainable construction are broad and encompass a wide range of methodologies, including the utilization of 3D printing technology and the incorporation of hemp fibers. Modern building structures that utilize these solutions can be characterized not only by their aesthetics and functionality, but also by their limited negative impact on the environment.

In the context of climate change and the growing need to reduce greenhouse gas emissions, industrial hemp is emerging as a pivotal building material for the future. The cultivation of

ków atmosferycznych. Co istotne, są materiałem odnawialnym i biodegradowalnym, co wpływa na ich ocenę w kontekście zrównoważonego rozwoju [8]. W budownictwie włókna konopne znalazły zastosowanie jako składnik materiałów izolacyjnych oraz jako zbrojenie w lekkich kompozytach cementowych. Ich włączenie do mieszanek betonowych umożliwia poprawę właściwości mechanicznych materiału, zwiększając jego odporność na pękanie, redukując skurcz oraz poprawiając ogólną trwałość konstrukcji.

Sz szczególnie interesujące jest wykorzystanie konopi do produkcji tzw. hempcrete – betonu konopnego, będącego lekkim kompozytem złożonym z łodyg konopi i spoiwa wapiennego [8, 9]. Materiał ten charakteryzuje się dużą przepuszczalnością powietrza, doskonałymi właściwościami izolacyjnymi oraz zdolnością do sekwestracji CO₂, co sprawia, że jest jednym z najbardziej ekologicznych materiałów budowlanych dostępnych na rynku [10÷12].

Integracja druku 3D i włókien konopnych

Połączenie technologii druku 3D z wykorzystaniem włókien konopnych otwiera nowe możliwości dla nowoczesnego budownictwa. Włókna konopne mogą pełnić rolę naturalnego zbrojenia w drukowanych elementach betonowych, m.in. poprawiając ich wytrzymałość, odporność na zarysowanie i pękanie [8]. Zastosowanie włókien konopnych w procesie druku 3D wymaga dostosowania składu mieszanki betonowej. Kluczowe jest uzyskanie odpowiedniej reologii materiału, umożliwiającej jego sprawne wytłaczanie przez dyszę drukarki oraz zapewniającej dobrą adhezję między kolejnymi warstwami. Naturalne włókna mogą wpływać na lepkość i płynność betonu, dlatego ich ilość i sposób wprowadzenia do mieszanki muszą być precyzyjnie kontrolowane.

Integracja włókien konopnych z betonem drukowanym 3D może również przynieść dodatkowe korzyści dotyczące zrównoważonego rozwoju. Konopie przemysłowe podczas wzrostu pochłaniają duże ilości CO₂, a ich wykorzystanie jako składnika kompozytu betonowego może znacznie zmniejszyć ślad węglowy konstrukcji. Dodatkowo, lekkość włókien konopnych wpływa na zmniejszenie masy elementów budowlanych, co może przyczynić się do ograniczenia zużycia energii w procesach transportu i montażu. Porównanie pomiędzy trzema różnymi betonami do druku 3D zamieszczono w tabeli 3 [1, 6, 7].

Zrównoważone budownictwo przyszłości

Technologia druku 3D oraz wykorzystanie włókien konopnych wpisują się w szeroko rozumiane idee zrównoważonego budownictwa. Nowoczesne konstrukcje budowlane, w których zastosowano te rozwiązania mogą charakteryzować się nie tylko estetyką i funkcjonalnością, ale także ograniczonym negatywnym wpływem na środowisko.

W kontekście zmian klimatycznych oraz coraz większej potrzeby redukcji emisji gazów cieplarnianych, konopie przemysłowe stają się jednym z kluczowych surowców budowlanych przyszłości. Ich uprawa wymaga niewielkich nakładów,

**Table 3. Comparison of concrete types for 3D printing***Tabela 3. Porównanie typów betonów do druku 3D*

Property / Cecha	Traditional concrete for 3D printing / Beton tradycyjny do druku 3D	Hempcrete / Beton konopny	Geopolymer concrete / Beton geopolimerowy
Binder / Spoiwo	portland cement / cement portlandzki	lime or cement + hemp fibers / wapno lub cement + włókna konopne	alkaline activators + fly ash/slag / aktywatory zasadowe + popioły/żużle
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie	20–60 MPa	0,5–2 MPa (low / niskie)	30–70 MPa
Setting time / Czas wiązania	medium / średni (30–90 min)	long / długi	rapid (within minutes) / szybki (nawet kilkanaście minut)
Thermal insulation / Izolacja cieplna	poor / słaba	good / dobra	average / średnia
Environmental impact / Wpływ na środowisko	moderate / umiarkowany	very low (carbon-negative footprint) / bardzo mały (ujemny ślad CO ₂)	low / mały
Fire resistance / Odporność na ogień	high / duża	high / duża	very high / bardzo duża
Applications / Zastosowanie	structural walls, infrastructure / ściany konstrukcyjne, elementy infrastruktury	infill walls, insulation / ściany wypełniające, izolacja	engineering structures, extreme conditions / konstrukcje inżynieryjne, budowle ekstremalne
Material cost / Cena materiału	medium / średnia	low/medium / niska/średnia	high . wysoka
Printing difficulty / Trudność druku	medium / średnia	high (challenging rheology) / wysoka (trudne reologie)	medium/high / średnia/wysoka

this crop necessitates minimal investment, enhances soil quality, and can be undertaken without the requirement for extensive plant protection measures. Hemp-based products, such as hempcrete, have been shown to improve building durability, reduce energy demand, and enhance thermal comfort [12]. The combination of these advantages with the possibilities offered by 3D concrete printing has resulted in a paradigm shift in the field of construction. The resulting structures are characterized by their rapid construction, energy efficiency, environmental sustainability, and ability to be tailored to the specific needs of users.

Research

Due to certain mechanical limitations, hemp concrete based on cement composite, in 3D printing technology, should be used in combination with other construction materials. Hemp fibers in 3D printing are mainly used as an additive to thermoplastic filaments (e.g. PLA, ABS, PETG), creating so-called fiber composites [13÷16]. Their advantages are:

- hemp fibers are natural, biodegradable and therefore ideal for the production of sustainable materials for 3D printing;
- the addition of hemp fibers increases the stiffness and mechanical strength of printed objects, while reducing their weight;
- they have a natural texture and color, which is popular in interior decoration and design;
- thanks to the properties of hemp fibers, it is possible to print elements with good thermal and acoustic parameters, useful in green building;
- hemp fibers allow you to create prototypes that can decompose naturally, which is useful for short-term projects or tests.

poprawia jakość gleby i może być prowadzona bez konieczności stosowania intensywnych środków ochrony roślin. Produkty na bazie konopi, takie jak hempcrete, mogą znacznie wydłużyć trwałość budynków, zmniejszyć ich zapotrzebowanie na energię oraz poprawić komfort cieplny mieszkańców [12]. Połączenie tych zalet z możliwościami, jakie daje druk betonu 3D, prowadzi do powstania zupełnie nowego paradygmatu w budownictwie – konstrukcji szybkich w realizacji, energooszczędnych, przyjaznych środowisku oraz dostosowanych do indywidualnych potrzeb użytkowników.

Badania

Beton konopny na bazie kompozytu cementowego, w technologii druku 3D, ze względu na pewne ograniczenia mechaniczne, powinien być stosowany razem z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Włókna konopne w druku 3D są używane głównie jako dodatek do filamentów (np. PLA, ABS, PETG), tworząc tzw. kompozyty włókniste [13÷16]. Ich zalety to:

- włókna konopne są naturalne, biodegradowalne i dlatego są idealne do produkcji zrównoważonych materiałów do druku 3D;
- dodanie włókien konopnych zwiększa sztywność i wytrzymałość mechaniczną wydrukowanych przedmiotów, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich masy;
- mają naturalną teksturę i kolor, co jest popularne w dekoracji wnętrz i designie;
- dzięki właściwościom włókien konopnych możliwe jest drukowanie elementów o dobrych parametrach cieplnych i akustycznych, przydatnych w budownictwie ekologicznym;
- włókna konopne pozwalają tworzyć prototypy, które mogą się naturalnie rozłożyć, co jest przydatne przy krótkoterminowych projektach lub testach.

The utilization of hemp fibers within cement composites constitutes a novel concept. Hemp fibers possess elevated tensile strength (600–700 MPa) and minimal density, characteristics that render them a compelling addition to cement composites. However, due to their porous structure, they are characterized by high water absorption, which can significantly affect the rheological and strength properties of concrete mixtures. These fibers have the potential to be utilized as a form of reinforcement within the context of incrementally printed concrete, thereby enhancing its mechanical properties and durability. The Building Structures Laboratory at Wrocław University of Science and Technology, in cooperation with Neodynamic Sp. z o.o., is developing compositions of composites with hemp fibers.

The tests took into account the quantity, quality, length and origin of the hemp fibers, with an indication of the manufacturer. Both dry fibers and fibers that had been pre-moistened with water for 24 hours prior to testing were used. The composition of all mixtures remained unchanged, with the proportions of the granular components (binder, mineral additives in the form of silica fly ash and silica dust), chemical admixtures, and hemp fibers kept constant. The only variables were the water-to-cement ratio (w/c) and the method of fiber preparation. The biggest problem was achieving satisfactory extrusion of the mixture.

Research results and conclusions

A '0' mixture was used as the reference mixture. A proprietary formula was developed for this mixture, which is characterized by a constant percentage of dry ingredients. Mixture '0' exhibited the typical rheological properties of materials intended for 3D printing technology. Hemp fibers were then added to this mixture in both a dry state and after preliminary soaking in water. Additionally, the w/c ratio was modified to analyse its effect on the properties of the mixtures.

Regardless of the fiber preparation method, the quantity of water incorporated into the mixture exerts a substantial influence on the composite's rheological characteristics. A series of modifications were introduced to the fiber preparation method; however, these alterations did not yield substantial variations in print quality when assessed under laboratory conditions. The photographic evidence presented herein offers a comparative analysis of individual mixture prints.

Table 4 presents sample results of mixture consistency test and correlates these results with the quality of prints obtained for individual cement mixtures.

Summary

The advent of contemporary construction technologies, including 3D concrete printing and the utilization of hemp fibers, represents a paradigm

Zastosowanie włókien konopnych w kompozytach cementowych jest zagadnieniem innowacyjnym. Włókna konopne mają dużą wytrzymałość na rozciąganie (600–700 MPa) oraz małą gęstość, co czyni je atrakcyjnym dodatkiem do kompozytów cementowych. Ze względu na porowatą strukturę, charakteryzują się jednak dużą absorpcją wody, co może istotnie wpływać na właściwości reologiczne i wytrzymałościowe mieszanek betonowych. Włókna te mogą być stosowane jako zbrojenie w betonie drukowanym metodą przyrostową, przyczyniając się do poprawy jego właściwości mechanicznych oraz trwałości. W Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Politechniki Wrocławskiej, we współpracy z Neodynamic Sp. z o.o. opracowywane są składy kompozytów z włóknami konopnymi.

W badaniach uwzględniono ilość, jakość, długość oraz pochodzenie włókien konopnych (ze wskazaniem producenta). Wykorzystano zarówno włókna suche, jak i poddane wstępnemu nawilżeniu wodą przed rozpoczęciem badań, przez 24 h. Skład wszystkich mieszanek pozostawał niezmienny – utrzymano stałe proporcje składników ziarnistych (spoiwa, dodatków mineralnych w postaci krzemionkowego popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego), domieszek chemicznych oraz włókien konopnych. Jedynymi zmiennymi były współczynnik wodno-cementowy (w/c) oraz sposób przygotowania włókien. Największym problemem okazało się uzyskanie zadowalającej wytłaczalności mieszanki.

Wyniki badań i wnioski

Jako mieszankę referencyjną zastosowano zarób „0”, w przypadku którego opracowano własną recepturę, charakteryzującą się stałym procentowym udziałem składników suchych. Zarób „0” wykazywał właściwości reologiczne typowe dla mieszanek przeznaczonych do technologii druku 3D. Na bazie tej mieszanki wprowadzano następnie włókna konopne, zarówno w stanie suchym, jak i po wstępnym nasączeniu wodą. Dodatkowo modyfikowano współczynnik w/c, analizując jego wpływ na właściwości mieszanek.

Bez względu na sposób przygotowania włókien, decydujący wpływ na właściwości reologiczne kompozytu wywiera ilość wody wprowadzona do mieszanki. Zmiany w metodzie przygotowania włókien nie spowodowały istotnych różnic w jakości wydruków uzyskanych w warunkach laboratoryjnych. Porównanie wydruków poszczególnych mieszanek przedstawiono na fotografii.

W tabeli 4 przedstawiono przykładowe wyniki badań konsystencji mieszanek oraz dokonano korelacji tych wyników z jakością wydruków uzyskanych w przypadku poszczególnych mieszanek cementowych.

Podsumowanie

Nowoczesne technologie budowlane, takie jak drukowanie betonu 3D oraz zastosowanie włókien konop-



Comparison of concrete mixtures with hemp fibers with different w/c ratios

Porównanie mieszanek betonowych z włóknami konopnymi o różnym współczynniku w/c



shift in sustainable construction. Three-dimensional printing has been demonstrated to facilitate rapid, precise, and cost-efficient project execution. Conversely, hemp fibers proffer ancillary advantages, encompassing augmented strength, minimal weight, and ecological sustainability.

The utilization of hempcrete in conjunction with 3D printing technology constitutes an alternative to conventional building materials, effecting a synthesis of ecological advantages with contemporary construction methodologies. However, due to certain mechanical limitations, its use requires appropriate design and often cooperation with other construction

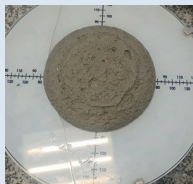
materials. Hemp fibers have been identified as a potentially valuable material in contemporary construction, with applications in both conventional concrete mixes and three-dimensional printing technologies. The utilization of these materials has the potential to contribute to the development of more sustainable and environmentally friendly building structures. Despite the many advantages of using hemp fibres in 3D printing, this approach also presents challenges. Determining the optimal parameters is essential for a concrete mix that incorporates natural fibers. It is imperative that the effect of hemp on the properties of fresh and hardened concrete is meticulously regulated in order to guarantee the stability of the printing process and the high quality of the printed components.

Another aspect is the durability of fibers in the alkaline environment of concrete. Natural fibers can degrade at high pH levels, so it is necessary to use appropriate protective measures or develop fiber modification technologies to increase their chemical resistance.

As part of further research, it is also important to develop methods for testing and certifying printed structures containing hemp fibers, to ensure their safety and durability in accordance with applicable building standards. The future of construction lies in innovations that combine digital technologies with renewable materials to create durable, functional

Table 4. Consistencies of cement mixtures with hemp fibers

Tabela. 4. Konsystencja mieszanek cementowych z włóknami konopnymi

w/c ratio / Współczynnik w/c	Consistency / Konsystencja	Print quality / Wydruk
w/c – reference "0" mix / w/c – mieszanka „0”		
w/c too high + dry fibers / w/c za wysokie + włókna suche		
w/c correct + dry fibers / w/c prawidłowe + włókna suche		
w/c too low + dry fibers / w/c za niskie + włókna suche		

nych, otwierają nowe horyzonty w dziedzinie zrównoważonego rozwoju. Druk 3D umożliwia szybką, precyzyjną i oszczędną realizację projektów, podczas gdy włókna konopne wnoszą dodatkowe korzyści w postaci zwiększonej wytrzymałości, lekkości i przyjazności dla środowiska.

Beton konopny w technologii druku 3D stanowi alternatywę dla tradycyjnych materiałów budowlanych, łącząc zalety ekologiczne z nowoczesnymi metodami konstrukcyjnymi. Ze względu na pewne ograniczenia mechaniczne, jego zastosowanie wymaga jednak odpowiedniego projektowania i często współpracy z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Włókna ko-

nopne stanowią obiecujący materiał w nowoczesnym budownictwie, zarówno w tradycyjnych mieszankach betonowych, jak i w technologii druku 3D. Ich zastosowanie może przyczynić się do tworzenia bardziej zrównoważonych i ekologicznych konstrukcji budowlanych.

Pomimo wielu zalet, zastosowanie włókien konopnych w technologii druku 3D wiąże się z pewnymi wyzwaniami. Wśród najważniejszych należy wymienić konieczność dokładnego określenia optymalnych parametrów mieszanki betonowej zawierającej włókna naturalne. Wpływ konopi na właściwości świeżego i stwardniałego betonu musi być precyzyjnie kontrolowany, aby zapewnić stabilność procesu drukowania oraz dużą jakość elementów końcowych.

Kolejnym aspektem jest trwałość włókien w środowisku alkalicznym betonu. Naturalne włókna mogą ulegać degradacji przy dużym pH, dlatego niezbędne jest stosowanie odpowiednich zabiegów ochronnych lub rozwój technologii modyfikacji włókien, zwiększających ich odporność chemiczną.

W ramach dalszych badań istotne jest również opracowanie metod testowania i certyfikacji drukowanych konstrukcji zawierających włókna konopne, aby zapewnić ich bezpieczeństwo i trwałość zgodnie z obowiązującymi normami budowlanymi. Przyszłość budownictwa należy do innowacji, które łączą technologie cyfrowe z materiałami odnawialnymi, tworząc konstrukcje trwałe, funkcjonalne i przyjazne śro-

and environmentally friendly structures. 3D concrete printing with hemp fibres illustrates how digital technologies and renewable materials can shape the cities and homes of the future.

Received: 18.03.2025

Revised: 13.05.2025

Published: 19.09.2025

dowisku. Drukowanie betonu 3D z wykorzystaniem włókien konopnych to przykład synergii nauki, technologii i natury, która może mieć duży wpływ na kształt naszych miast i domów w nadchodzących dekadach.

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 13.05.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Gibb AGF, Thorpe T. Mix design fresh properties for high-performance printing concrete. *Mater Struct.* 2021;45:1221–1232.
- [2] Placzek G, Schwerdtner P. A global snapshot of 3D-printed buildings: uncovering robotic-oriented fabrication strategies. *Buildings.* 2024;14:3410. <https://doi.org/10.3390/buildings14113410>.
- [3] Heidelberg Materials. Größtes 3D-gedrucktes Gebäude Europas. <https://www.heidelbergmaterials.de/de/media/baufachpresse/groesstes-3d-gedrucktes-gebäude-europas> [accessed: 28 Apr. 2025].
- [4] Lim S, Buswell RA, Le TT, Austin SA, Gibb AGF, Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automat Constr.* 2012;21:262–268.
- [5] Buswell RA, Leal de Silva WR, Jones SZ, Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. *Cem Concr Res.* 2018;112:37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- [6] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R, Gibb AGF, Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cem Concr Res.* 2012;42:558–566.
- [7] Ma GW, Wang L, Ju Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material – an emerging technique for construction. *Sci China Technol Sci.* 2018;61:475–495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>.
- [8] Sokołowski P, Kossakowski P. Kompozyt wapienno-konopny – materiał ekologiczny. *Zesz Nauk Pol Częst Bud.* 2019;1:230–234. <https://doi.org/10.17512/znb.2019.1.36>.
- [9] Yemesegen EB, Memari AM. A review of experimental studies on cob, hempcrete, and bamboo components and the call for transition towards sustainable home building with 3D printing. *Constr Build Mater.* 2023;339:132603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132603>.
- [10] Gołębieski M. Kompozyty konopno-wapienne (hempcrete). *Materiały Budowlane* 2016;7:91–94. <https://doi.org/10.15199/33.2016.07.29>.
- [11] Gołębieski M, Pietruszka B. Efektywność energetyczna budynków wykonanych w technologii kompozytów wapienno-konopnych. *Materiały Budowlane* 2023;1:38–41. <https://doi.org/10.15199/33.2023.01.09>.
- [12] Yadav M, Saini A. Opportunities and challenges of hempcrete as a building material for construction: an overview. *Mater Today Proc.* 2022;65:2021–2028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.576>.
- [13] Arnold J, Smith DA. 3D printed polylactic acid – hemp fiber composites: mechanical, thermal, and microcomputed tomography data. *Data Brief.* 2021;39:107534. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107534>.
- [14] Beg MDH, Pickering KL, Akindoyo JO, Gauss C. Recyclable hemp hurd fibre-reinforced PLA composites for 3D printing. *J Mater Res Technol.* 2024;33:4439–4447. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.082>.
- [15] Sultan R, Skrifvars M, Khalili P. 3D printing of polypropylene reinforced with hemp fibers: mechanical, water absorption and morphological properties. *Heliyon.* 2024;10:e26617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26617>.
- [16] Valin Fernandez M, Monsalves Rodriguez MA, Medina Muñoz CA, Palacio DA, Oñate Soto AG, Valin Rivera JL, Valenzuela Diaz FR. Cationized hemp fiber to improve the interfacial adhesion in PLA composite. *Polymers.* 2025;17:652. <https://doi.org/10.3390/polym17050652>.

