

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Rozprawa doktorska

Dyscyplina Naukowa - Inżynieria
Lądowa, Geodezja i Transport
Dziedzina Nauk - Nauki
Inżynieryjno-Technicznych

mgr inż.

Wojciech Piątkiewicz

Wpływ stopnia zagęszczenia i składu mieszanki na właściwości
fizyczne i mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego

Promotor

Dr hab. inż. **Michał Krzemiński**

Promotor Pomocniczy

Dr inż., arch. **Piotr Leon Narloch**

Pamięci mojej Babci Sabinki.

Dziękuję moim Rodzicom i Rodzinie za możliwość poświęcenia się nauce, nieustanną pomoc oraz obecność na każdym etapie mojej edukacji.

Dziękuję moim Przyjaciołom oraz bliskim mi osobom za obecność, motywację i wiarę we mnie, szczególnie w chwilach, gdy sam miałem wątpliwości. Szczególne podziękowania kieruję do Hasi, która nieustannie mnie dopingowała, służyła dobrym słowem i pomagała mi uwierzyć we własne możliwości.

Dziękuję moim Promotorom za zaufanie, cenne wskazówki, merytoryczne wsparcie oraz poświęcony czas.

Dziękuję wszystkim Pracownikom Wydziału Inżynierii Lądowej za pomoc, życzliwość i gotowość do dzielenia się wiedzą.

Dziękuję również Studentom, którzy z zaangażowaniem uczestniczyli w pracach laboratoryjnych i badawczych, współtworząc inspirujące środowisko do rozwoju naukowego.

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy kompozytu wapienno-konopnego, materiału budowlanego łączącego paździerz konopne ze spoiwem wapiennym, charakteryzującego się niskim śladem węglowym i korzystnymi właściwościami cieplno-wilgotnościowymi. W obliczu rosnących wymagań dotyczących dekarbonizacji sektora budowlanego i uwzględniania śladu węglowego wbudowanego w materiały, kompozyty organiczno-mineralne stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych materiałów budowlanych. Mimo rosnącej popularności tej technologii, brak systematycznych badań nad wpływem zmiennych materiałowych i technologicznych oraz brak ujednoliconych metod badawczych utrudniają przewidywalność właściwości kompozytu i jego szersze zastosowanie w praktyce budowlanej.

Rozprawa realizuje dwa główne cele. Pierwszy obejmuje systematyczną ocenę wpływu czterech zmiennych na właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytu: trzech zmiennych składu mieszanki, czyli stosunku spoiwa do paździerzy (B/S), stosunku wody do spoiwa (W/B) oraz uziarnienia paździerzy, a także stopnia zagęszczenia (CD) jako zmiennej technologicznej. Drugi cel stanowi propozycja nowego kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie, dostosowanego do specyfiki mechanicznego zachowania kompozytu.

Program badawczy obejmuje siedem publikacji naukowych, w ramach których wykonano łącznie ponad 300 próbek poddanych badaniom przewodności cieplnej, wytrzymałości na ściskanie, paroprzepuszczalności i ciepła właściwego. Wykazano, że stosunek B/S jest dominującą zmienną kształtującą przewodność cieplną i wytrzymałość na ściskanie, działającą przede wszystkim poprzez gęstość objętościową. Stopień zagęszczenia wywiera istotny, nieliniowy wpływ na właściwości kompozytu, przy czym największe przyrosty uzyskiwano przy przejściu z CD = 150% do CD = 170%. Stosunek W/B wykazał marginalny wpływ przy B/S = 1:1, natomiast uziarnienie paździerzy wpłynęło w ograniczonym stopniu na przewodność cieplną. Gęstość objętościowa stanowi wiarygodny parametr pośredni łączący zmienne technologiczne z właściwościami kompozytu ($R^2 = 0,94$ dla λ i $R^2 = 0,68$ dla

wytrzymałości). Zaproponowane kryterium oparte na 1% trwałym odkształceniu daje wiarygodne wyniki dla mieszanek o B/S $\geq$ 2:1.

Wyniki niniejszej rozprawy przyczyniają się do standaryzacji metod badawczych stosowanych w badaniach kompozytów wapienno-konopnych, w szczególności poprzez propozycję nowego kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie, opracowanie obiektywnej metody określania stopnia zagęszczenia oraz weryfikację metody analizy obrazowej do charakteryzacji uziarnienia paździerzy. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do opracowania wytycznych projektowych dla szerszego zastosowania tego materiału w zrównoważonym budownictwie.

Słowa kluczowe: kompozyt wapienno-konopny, paździerze konopne, wytrzymałość na ściskanie, materiały budowlane, materiały biogeniczne, zrównoważone budownictwo

Abstract

This doctoral thesis concerns hemp-lime composite, a building material combining hemp shives with a lime binder, characterised by a low carbon footprint and favourable hygrothermal properties. In the context of growing requirements for decarbonisation of the construction sector and the increasing importance of embodied carbon in building materials, organic-mineral composites represent a promising alternative to conventional construction materials. Despite the growing popularity of this technology, the lack of systematic research on the influence of material and technological variables, combined with the absence of unified testing methods, hinders the predictability of composite properties and limits its wider application in construction practice.

The thesis pursues two main objectives. The first involves a systematic assessment of the influence of four variables on the physical and mechanical properties of the composite: three mix composition variables, namely the binder-to-shiv ratio (B/S), the water-to-binder ratio (W/B), and hemp shiv particle size, as well as the compaction degree (CD) as a technological variable. The second objective is the proposal of a new criterion for determining compressive strength, tailored to the specific mechanical behaviour of the composite.

The research programme comprises seven scientific publications, within which over 300 specimens were tested in total, covering thermal conductivity, compressive strength, water vapour permeability and specific heat measurements. It was demonstrated that the B/S ratio is the dominant variable governing thermal conductivity and compressive strength, acting primarily through bulk density. Compaction degree exerts a significant, non-linear influence on composite properties, with the largest gains observed at the transition from CD = 150% to CD = 170%. The W/B ratio showed marginal influence at B/S = 1:1, while hemp shiv particle size had a limited effect on thermal conductivity. Bulk density serves as a reliable intermediate descriptor linking technological variables to composite properties ($R^2 = 0.94$ for λ and $R^2 = 0.68$ for compressive strength). The proposed criterion based on 1% permanent strain yields reliable results for mixes with B/S $\geq 2:1$.

The findings of this thesis contribute to the standardisation of testing methods for hemp-lime composites, in particular through the proposal of a new compressive strength criterion, the development of an objective method for determining compaction degree, and the verification of image analysis for hemp shiv characterisation. The results provide a basis for developing design guidelines for the wider application of this material in sustainable construction.

Keywords: hemp-lime composite, hempcrete, hemp shives, compressive strength, building materials, bio-based materials, sustainable construction

Spis treści

1. Forma rozprawy doktorskiej	13
2. Wstęp	16
3. Motywacja, cele i hipotezy badawcze	18
3.1. Motywacja badań	18
3.2. Cele główne pracy	19
3.3. Hipotezy badawcze	19
4. Podstawy teoretyczne i przegląd literatury	20
4.1. Składniki kompozytu wapienno-konopnego	22
4.1.1. Konopie i paździerze konopne	22
4.1.2. Spoiwo mineralne	28
4.2. Właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytów wapienno-konopnych	30
4.2.1. Wytrzymałość na ściskanie	30
4.2.2. Właściwości cieplne	35
4.2.3. Paroprzepuszczalność	39
4.2.4. Palność	40
4.2.5. Izolacyjność akustyczna	42
4.2.6. Nasiąkliwość	43
4.2.7. Trwałość	44
4.3. Technologie produkcji i zastosowania	46
5. Metodyka badań	49
5.1. Program badań kompozytu wapienno-konopnego	49
5.2. Materiały wykorzystywane w badaniach	52
5.2.1. Spoiwo	52
5.2.2. Paździerze konopne	55
5.2.3. Woda	58
5.3. Przygotowywanie próbek	59
5.4. Badania właściwości fizycznych	61
5.4.1. Badanie współczynnika przewodności cieplnej	61
5.4.2. Badanie ciepła właściwego	61
5.4.3. Badanie paroprzepuszczalności	62

5.5. Badania właściwości mechanicznych	62
5.5.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie	62
6. Synteza wyników badań	65
6.1 Wpływ składu mieszanki na właściwości kompozytu wapienno-konopnego..	65
6.1.1 Wpływ stosunku spoiwa do paździerzy (B/S).....	65
6.1.2. Wpływ stosunku wody do spoiwa (W/B)	68
6.1.3. Wpływ uziarnienia paździerzy	69
6.2 Wpływ stopnia zagęszczenia na właściwości kompozytu wapienno-konopnego	70
.....	
6.3 Kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie	73
7. Dyskusja wyników	77
7.1. Wpływ stosunku spoiwa do paździerzy (B/S)	77
7.2. Wpływ stosunku wody do spoiwa (W/B)	78
7.3. Wpływ uziarnienia paździerzy	79
7.4. Wpływ stopnia zagęszczenia na właściwości kompozytu wapienno-	
konopnego.....	80
7.5. Kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie	81
8. Wnioski i rekomendacje	83
8.1. Wnioski	83
8.2. Kierunki dalszych badań	84
8.3. Rekomendacje praktyczne	85
9. Bibliografia.....	87
9. Spis tabel i rysunków	95
10. Załączniki	98
10.1 Oświadczenia o udziale autorskim.....	98
10.2. Publikacja [1]	107
10.3. Publikacja [2]	126
10.4. Publikacja [3]	133
10.5. Publikacja [4]	138
10.6. Publikacja [5]	161
10.7. Publikacja [6]	181
10.8. Publikacja [7]	202

Wykaz ważniejszych skrótów

CD – ang. compaction degree – stopień zagęszczenia

B/S – ang. binder to shive ratio – stosunek spoiwa do paździerzy

W/B - ang. water to binder ratio – stosunek wody do spoiwa

λ – współczynnik przewodzenia ciepła

μ - współczynnik oporu dyfuzyjnego

1. Forma rozprawy doktorskiej

Przedkładana rozprawa doktorska ma formę cyklu siedmiu tematycznie powiązanych artykułów naukowych [1–7] opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych, uzupełnionego autoreferatem omawiającym zakres i wyniki programu badawczego. Wykaz publikacji wchodzących w skład cyklu:

[1] Piątkiewicz, W., Narloch, P., & Pietruszka, B. (2020). Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. Archives of Civil Engineering, 66(3), 485–503, doi:10.24425/ace.2020.134409.

100 pkt MEiN

[2] Gołębiewski, M., Narloch, P., Piątkiewicz, W., Wasilewski, I. (2023). Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. Materiały Budowlane, 613, 2–8, doi:10.15199/33.2023.09.

140 pkt MEiN

[3] Piątkiewicz, W. Kompozyt Wapienno-Konopny w Polsce. Wyzwania Praktyczne i Kierunki Badań. Przegląd Bud. 2026, 97, 60–64, doi:10.5604/01.3001.0055.6453.

40 pkt MEiN

[4] Piątkiewicz, W., Narloch, P., Wólczyńska, Z., Mańczak, J. (2025). Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp-Lime Composites. Materials (Basel), 18(3458), doi:10.3390/ma18153458.

140 pkt MEiN; IF: 3,2

[5] Gołębiewski, M.; Pietruszka, B.; Piątkiewicz, W.; Kubiś, M.; Oleksienko, O. Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. Materials (Basel). 2025, 18, 1–20, doi:10.3390/ma18214958.

140 pkt MEiN; IF: 3,2

[6] Piątkiewicz, W.; Piotrowski, A.; Narloch, P. Determination of Compressive Strength in Hemp-Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach. Appl. Sci. 2026, 16, 306. [doi:10.3390/app16010306](https://doi.org/10.3390/app16010306)

100 pkt MEiN; IF: 2,5

[7] Piątkiewicz, W. Effect of Technological Variables on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Hemp-Lime Composites. CivilEng 2026, 7, 33. doi:10.3390/civileng7020033

IF: 2,0

Mój udział w poszczególnych publikacjach był następujący:

[1] Przeprowadziłem przegląd literatury, opracowałem koncepcję i przebieg eksperymentu, przygotowałem materiały oraz wykonałem próbki kompozytu o zróżnicowanym składzie. Przeprowadziłem badania wytrzymałości na ściskanie, opracowałem wyniki, zestawilem je z danymi literaturowymi i sformułowałem wnioski. Przygotowałem manuskrypt do publikacji oraz uczestniczyłem w odpowiedzi na recenzje i nadaniu artykułowi ostatecznej formy. **Jednostkowy udział: 50%**

[2] Przeprowadziłem przegląd literatury naukowej dotyczącej trwałości kompozytów wapienno-konopnych, zajmowałem się pisanem tekstu artykułu i przygotowywaniem manuskryptu do publikacji. **Jednostkowy udział: 30%**

[3] Przeprowadziłem przegląd literatury naukowej, opracowałem koncepcję artykułu, napisałem i zredagowałem jego treść oraz samodzielnie nadałem publikacji ostateczną formę. **Jednostkowy udział: 100%**

[4] Przeprowadziłem przegląd literatury, opracowałem koncepcję i przebieg eksperymentu, przygotowałem materiały oraz wykonałem próbki kompozytu o zróżnicowanym uziarnieniu. Przeprowadziłem badania współczynnika przewodzenia ciepła, opracowałem i przeanalizowałem wyniki na tle danych literaturowych, a następnie sformułowałem wnioski. Przygotowałem manuskrypt do publikacji oraz uczestniczyłem w odpowiedzi na recenzje i nadaniu artykułowi ostatecznej formy. **Jednostkowy udział: 50%**

[5] Przeprowadziłem przegląd literatury i zajmowałem się pisanem tekstu artykułu, opracowałem metodykę badań wytrzymałości na ściskanie oraz przeprowadziłem te

badania. Opracowałem uzyskane wyniki i uczestniczyłem w procesie odpowiedzi na recenzje. **Jednostkowy udział: 30%**

[6] Opracowałem koncepcję badania oraz szczegółowy plan jego realizacji, przygotowałem materiały i wykonałem próbki, a następnie przeprowadziłem badania wytrzymałości na ściskanie. Uczestniczyłem w opracowaniu nowego podejścia metodycznego do badania kompozytów wapienno-konopnych, opracowałem wyniki i sformułowałem wnioski. Przygotowałem manuskrypt do publikacji oraz prowadziłem korespondencję z recenzentami i nadałem artykulowi ostateczną formę. **Jednostkowy udział: 70%**

[7] Przeprowadziłem przegląd literatury, opracowałem koncepcję badania oraz szczegółowy plan jego realizacji. Przygotowałem materiały i wykonałem próbki kompozytu wapienno-konopnego. Przeprowadziłem badania współczynnika przewodzenia ciepła oraz wytrzymałości na ściskanie, a także uzupełniłem dane z poprzednich publikacji programu badawczego o dodatkowe pomiary, umożliwiając analizę wpływu czterech zmiennych. Opracowałem wyniki, przeprowadziłem ich syntezę w odniesieniu do całego programu badawczego oraz sformułowałem wnioski. Przygotowałem manuskrypt do publikacji, prowadziłem korespondencję z recenzentami i nadałem artykulowi ostateczną formę. **Jednostkowy udział: 100%**

Oświadczenia współautorów publikacji określające indywidualny wkład każdego autora w powstanie poszczególnych publikacji zamieszczono w rozdziale 10 w poszczególnych załącznikach.

2. Wstęp

Sektor budowlany, odpowiadający za około 38% globalnych emisji gazów cieplarnianych, jest kluczowym obszarem działań na rzecz osiągnięcia neutralności klimatycznej Unii Europejskiej do 2050 roku, zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu (Parlament Europejski i Rada UE, 2021; United Nations Environment Programme, 2023). W odpowiedzi na te wyzwania w 2024 roku przyjęto Dyrektywę w sprawie Charakterystyki Energetycznej Budynków (EPBD IV), która wprowadza obowiązek obliczania potencjału tworzenia efektu cieplarnianego GWP (ang. Global Warming Potential) w całym cyklu życia budynku, wyrażonego w kg ekwiwalentu CO₂/m² dla referencyjnego okresu 50 lat, zgodnie z normą EN 15978:2011 (Parlament Europejski i Rada UE, 2024). Obejmuje to emisje związane z fazami wyrobu i wznoszenia (faza A), użytkowania (faza B) oraz końca życia (faza C), a także potencjalne korzyści z recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów (faza D). Regulacja ta zwiększa presję na stosowanie materiałów o niskim śladzie węglowym, zdolnych do sekwestracji CO₂ oraz wpisujących się w zasady gospodarki cyrkularnej (OSBN, 2024; PLGBC, 2024).

Kompozyt wapienno-konopny stanowi obiecującą odpowiedź na te wymagania. Składa się z odnawialnego surowca roślinnego, jakim są paździerze konopne, oraz spoiwa mineralnego. Charakteryzuje się niskim wpływem na środowisko, wskaźnik GWP kompozytu wapienno-konopnego waha się od -9,696 do +10,165 kg CO₂eq/m², w zależności od składu mieszanki, technologii wykonania oraz pochodzenia surowców (Bošković & Radivojević, 2023; Ruggieri et al., 2017). Poza czynnikiem ekologicznym, do rosnącej popularności tej technologii przyczyniają się również inne cechy materiału: dobre właściwości cieplne, wysoka paroprzepuszczalność, dobra izolacyjność akustyczna oraz niski stopień przetworzenia składników naturalnych. Efektem jest rosnąca liczba budynków mieszkalnych, usługowych i publicznych realizowanych w tej technologii w Polsce, Europie, a także innych częściach świata.

Pomimo rosnącego zainteresowania, szerokie zastosowanie kompozytu wapienno-konopnego napotyka istotne ograniczenia. Materiał może osiągać bardzo szeroki zakres właściwości: współczynnik przewodzenia ciepła λ wynosi od 0,06 do

0,14 W/(m·K) (Sinka et al., 2018; Walker & Pavía, 2014), a wytrzymałość na ściskanie od 0,07 do 4,74 MPa (Sinka et al., 2018; Tronet et al., 2016). Wynika to zarówno z różnorodności składu mieszanki, jak i zmiennych technologicznych. Brak ujednoliconych norm produkcyjnych sprawia, że projektanci operują na niepełnych lub nieporównywalnych danych, co utrudnia przewidywalność i powtarzalność materiału w praktyce budowlanej. Dodatkowym źródłem niepewności jest brak ujednoliconych metod badawczych, w szczególności w zakresie wyznaczania wytrzymałości na ściskanie ze względu na specyficzne zachowanie kompozytu pod obciążeniem.

Niniejsza rozprawa doktorska koncentruje się na systematycznym określeniu wpływu składu mieszanki i zmiennych technologicznych na właściwości kompozytu wapienno-konopnego. W zakresie składu mieszanki analizowano proporcje spoiwa do paździerzy, stosunek wody do spoiwa oraz uziarnienie paździerzy. Jako zmienną technologiczną badano stopień zagęszczenia. Obok badań właściwości materiału, praca obejmuje kilka zagadnień metodycznych. Przeprowadzono ocenę przydatności istniejących metod wyznaczania wytrzymałości na ściskanie i wskazano zakres ich stosowalności oraz zaproponowano nowe kryterium. Opracowano i zweryfikowano obiektywną metodę określania stopnia zagęszczenia kompozytu wapienno-konopnego. Zweryfikowano również metodę wyznaczania uziarnienia paździerzy konopnych pod kątem minimalnej wielkości próbki zapewniającej reprezentatywny opis kruszywa. Praca składa się z następujących rozdziałów: Rozdział 3 formułuje motywację, cele i hipotezy badawcze. Rozdział 4 przedstawia podstawy teoretyczne i przegląd literatury dotyczący właściwości kompozytów wapienno-konopnych i ich składników. Rozdział 5 omawia metodykę badań. Rozdział 6 syntetyzuje wyniki badań. Rozdział 7 zawiera dyskusję wyników. Rozdział 8 formułuje wnioski i rekomendacje praktyczne. Rozdział 9 zawiera bibliografię, Rozdział 10 zawiera załączniki z oświadczeniami współautorów oraz artykułami składającymi się na cykl publikacji niniejszej rozprawy.

3. Motywacja, cele i hipotezy badawcze

3.1. Motywacja badań

W obliczu narastających wyzwań środowiskowych, do których w istotnym stopniu przyczynia się sektor budowlany, poszukiwanie alternatywnych materiałów budowlanych staje się kwestią priorytetową. Dotychczasowe wysiłki na rzecz dekarbonizacji sektora budowlanego koncentrowały się głównie na ograniczeniu operacyjnego śladu węglowego, związanego z zużyciem energii w trakcie fazy użytkowania budynku. Stanowi on około 80% całkowitych emisji z sektora budowlanego. Jednak w miarę modernizacji budynków, lepszej izolacji cieplnej oraz stosowania odnawialnych źródeł energii, udział ten może spaść nawet do 50%, co zwiększa znaczenie śladu węglowego wbudowanego związanego z wykorzystywanymi materiałami budowlanymi (Bartosz & Kowalski, 2022). W tym kontekście organizacje międzynarodowe wskazują na materiały pochodzenia organicznego jako kluczowy element transformacji sektora w kierunku większej zrównoważoności oraz gospodarki o obiegu zamkniętym (Global Alliance for Buildings and Construction et al., 2019; United Nations Environment Programme, 2023).

W ostatnich kilkunastu latach w Polsce zyskuje na popularności technologia kompozytów wapienno-konopnych. Obecnie istnieje co najmniej 51 budynków wykorzystujących tę technologię, a ich liczba systematycznie wzrasta (Gołębiewski, 2020). Początkowo realizowane obiekty miały charakter eksperymentalny, jednak obecnie technologia ta znajduje zastosowanie zarówno w budownictwie jednorodinnym, jak i w obiektach usługowych. Mimo rosnącego zainteresowania, rozwój technologii napotyka na istotne bariery związane z brakiem odpowiednich norm technicznych, ograniczonym doświadczeniem projektantów czy małą liczbą wyszkolonych wykonawców.

Motywacją do podjęcia badań jest potrzeba systematycznej oceny wpływu składu mieszanki i zmiennych technologicznych na właściwości kompozytu wapienno-konopnego. Właściwości materiału zależą od wielu czynników: na etapie doboru składu mieszanki są to stosunek spoiwa do paździerzy, stosunek wody do spoiwa oraz uziarnienie paździerzy, natomiast na etapie wykonania kluczową

zmienną jest stopień zagęszczenia. Przyjmowanie w projektowaniu wartości właściwości bez uwzględnienia zmienności wynikającej z różnorodności składów i warunków wykonania może prowadzić do rozbieżności między przewidywaną a rzeczywistą efektywnością energetyczną budynków, a w skrajnych przypadkach również wpływać na trwałość przegród budowlanych i bezpieczeństwo użytkowania. Równolegle, brak ujednoliconych metod badawczych utrudnia porównywanie wyników między badaniami. Szczególnie dotyczy to wytrzymałości na ściskanie, gdzie ze względu na specyficzne zachowanie kompozytu na wykresie naprężenie-odkształcenie, przyjęcie różnych punktów identyfikacji wytrzymałości może prowadzić do istotnie odmiennych wyników dla tego samego materiału. Systematyczne badania ukierunkowane na określenie wpływu składu mieszanki i stopnia zagęszczenia na właściwości kompozytu oraz standaryzację metod badawczych są niezbędne dla właściwego wykorzystania potencjału tego materiału w zrównoważonym budownictwie.

3.2. Cele główne pracy

Na podstawie zidentyfikowanych luk badawczych i potrzeb praktycznych sformułowano dwa główne cele niniejszej rozprawy:

- 1) Określenie wpływu składu mieszanki i stopnia zagęszczenia na wytrzymałość na ściskanie, przewodność cieplną, paroprzepuszczalność i ciepło właściwe. Publikacje [1], [4], [5], [6], [7]
- 2) Propozycja nowego kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego. Publikacje [6], [7]

3.3. Hipotezy badawcze

Na etapie przeglądu literatury i badań wstępnych sformułowano trzy hipotezy badawcze dotyczące wpływu zidentyfikowanych zmiennych na właściwości kompozytu wapienno-konopnego:

- 1) Stosunek spoiwa do paździerzy ma istotny wpływ na przewodność cieplną, wytrzymałość na ściskanie, paroprzepuszczalność oraz ciepło właściwe kompozytu wapienno-konopnego.

- 2) Stopień zagęszczenia mieszanki na etapie formowania ma istotny wpływ na przewodność cieplną, wytrzymałość na ściskanie i paroprzepuszczalność kompozytu wapienno-konopnego.
- 3) Stosunek wody do spoiwa oraz uziarnienie paździerzy nie wykazują istotnego wpływu na przewodność cieplną i wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego.

4. Podstawy teoretyczne i przegląd literatury

Kompozyt wapienno-konopny funkcjonuje w literaturze oraz w języku powszechnym pod wieloma nazwami. Najbardziej znana na świecie jest nazwa angielska hempcrete, od angielskich słów hemp (konopie) i concrete (beton) (Bedlivá & Isaacs, 2014). Oprócz tego można spotkać określenia hemp concrete (Le et al., 2010), hemp-lime (Ip & Miller, 2012), a także zamiennie hemp-lime composite i lime-hemp composite/concrete (Hirst et al., 2010; Tronet et al., 2016; Williams et al., 2018). W Polsce najczęściej spotykanymi nazwami są hempcrete, beton konopny (Gołębiewski, 2020) oraz kompozyt wapienno-konopny (Brzyski, 2018). W ostatnich latach spotykana jest nazwa konoplit, która nawiązuje do historycznego materiału stosowanego na terenie Polski, który składał się z łodyg konopi wymieszanych ze spoiwem mineralnym (OSBN, 2024). Termin konoplit jest o tyle bardziej precyzyjny, że zrywa z nazwą „beton konopny”, która sugeruje właściwości i zastosowanie analogiczne do betonu konstrukcyjnego. Należy podkreślić, że kompozyt wapienno-konopny nie jest materiałem konstrukcyjnym. Nie przenosi obciążeń i wymaga nośnego szkieletu konstrukcyjnego, pełniąc funkcję wypełnienia oraz izolacji termicznej i akustycznej przegród budowlanych. Kompozyt wapienno-konopny jest mieszaniną paździerzy konopnych, spoiwa mineralnego oraz wody. Głównym składnikiem spoiwa jest wapno hydratyzowane, często wzbogacane dodatkami poprawiającymi wytrzymałość, takimi jak pucolany, cement czy wapno hydrauliczne. Materiał ten znajduje dziś zastosowanie zarówno w budownictwie mieszkaniowym, jak i budownictwie biurowym czy w renowacjach zabytków (Gołębiewski, 2020).

Choć konopie od wieków były wykorzystywane w budownictwie, współczesny kompozyt wapienno-konopny został wynaleziony we Francji pod koniec lat 80. XX

wieku. Początkowo stosowano go głównie w renowacji starych budynków drewnianych, a jednym z pierwszych obiektów, w którym użyto tego materiału, był XVI-wieczny Dom Turka (fr. Maison de la Turquie), odrestaurowany w 1986 roku. Na początku materiał wykorzystywano do uzupełniania ubytków w tkance historycznej lub jej całkowitej wymiany po usunięciu starego wypełnienia oraz osuszeniu i poddaniu zabiegom impregnująco-pielęgnacyjnym konstrukcji szachulcowej. W ten sposób poprawia się stan techniczny obiektów, a poprzez zwiększenie ochrony cieplnej i oszczędności związanej z eksploatacją, umożliwia się ich adaptację do nowych funkcji. (Gołębiewski, 2020)

Z czasem zaczęto wykorzystywać kompozyt wapienno-konopny jako wypełnienie ścian w budynkach szkieletowych, a dzisiaj używa się go także do izolacji podłóg i dachów. Najczęściej, w nowych budynkach wykorzystuje się go w budownictwie jednorodzinnych. Zyskał on jednak szybko rozpoznawalność i zaufanie wielu architektów i inwestorów. Dzięki temu powstają z niego budynki wielorodzinne jak i użyteczności publicznej (Rysunek 1). W ostatnich dekadach kompozyt ten zyskał na popularności także w innych krajach, szczególnie w Europie Zachodniej. Coraz więcej budynków powstaje w Wielkiej Brytanii, Niemczech, Holandii i Skandynawii (P. B. de Bruijn et al., 2009). Również w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie wzrasta zainteresowanie tym materiałem, zwłaszcza w kontekście nurtu budownictwa ekologicznego (Dhakał et al., 2017). Francja, jako kraj z długimi tradycjami uprawy i przetwórstwa konopi, jest liderem w wykorzystaniu tego surowca w budownictwie. Według danych Eurostat z 2022 roku, w Unii Europejskiej konopie uprawiano na łącznej powierzchni 32,45 tys. ha, z czego Francja zajmuje zdecydowanie pierwsze miejsce z 19,56 tys. ha. Polska plasuje się na czwartym miejscu z powierzchnią 1,55 tys. ha (Eurostat, 2026).



Rysunek 1. Ratusz miejski (Voorst, Holandia) którego fasada jest wykonana z kompozytu wapienno-konopnego (*Hempcrete Facade of a Town Hall*, n.d.)

4.1. Składniki kompozytu wapienno-konopnego

4.1.1 Konopie i paździerze konopne

Konopia siewna (*Cannabis sativa* L.), jednoroczna roślina pochodząca z Azji Środkowej, od tysiącleci odgrywała kluczową rolę w gospodarce przede wszystkim dzięki włóknom (Cortés et al., 2024; Niyigena, 2016). W przeszłości wykorzystywano je głównie do produkcji lin, żagli i odzieży ze względu na wysoką wytrzymałość i odporność na wodę (Niyigena, 2016). Rozwój włókien syntetycznych oraz restrykcje prawne w XX wieku związane z zawartością psychoaktywnego delta-9-tetrahydrokannabinolu (THC) ograniczyły jej uprawę. Od lat 80. regulacje UE, dopuszczające odmiany z THC poniżej 0,3%, umożliwiły ponowne upowszechnienie się konopi przemysłowych (Kaur & Kander, 2023). W zależności od warunków klimatycznych i szerokości geograficznej rośliny te mogą dawać różne plony. W Polsce konopie osiągają wysokość 2–3,5 m, dając plon suchej słomy 8–10 t/ha (Cierpucha, 2013). Uprawa wymaga gleb o $\text{pH} \geq 6,5$, odpowiedniego nawożenia na glebach niższej jakości i dostatecznego nawodnienia, choć głęboki system korzeniowy pozwala przetrwać krótkotrwałe susze (Cierpucha, 2013; Gołębiowski, 2020). Konopie tłumią inne rośliny dzięki szybkiemu wzrostowi i gęstym liściom o palmowym kształcie,

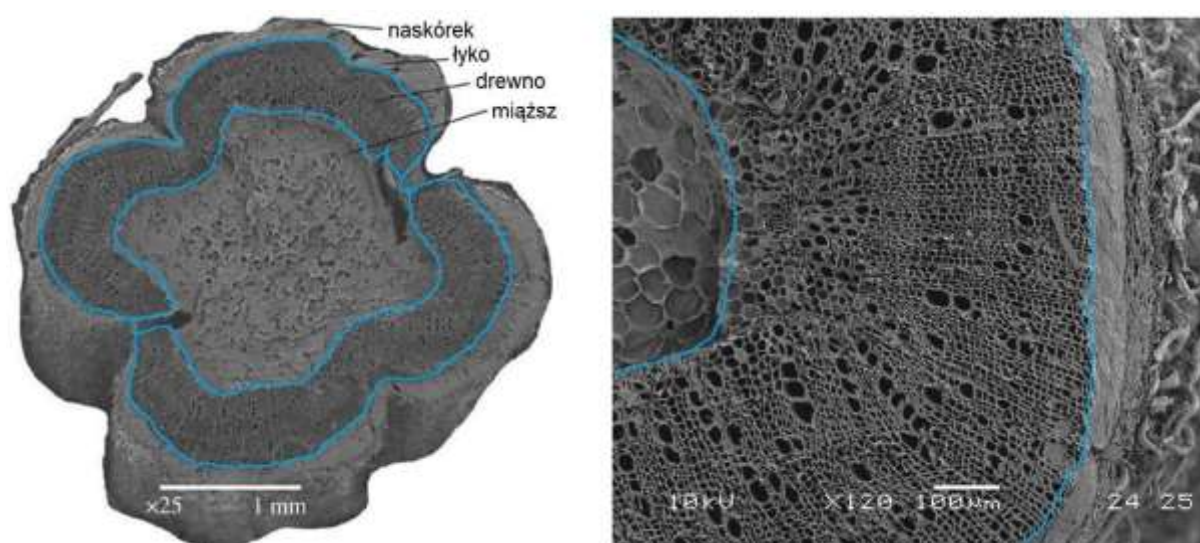
ograniczając potrzebę stosowania herbicydów. Konopie cechują się również naturalną odpornością na większość szkodników i chorób, co ogranicza potrzebę stosowania środków ochrony roślin (Allin, 2012). W warunkach intensywnej uprawy, szczególnie na dużych arealach, mogą jednak występować problemy ze szkodnikami wymagające okresowego stosowania pestycydów, np. przeciwko owadom lub grzybom, co wskazuje na konieczność zrównoważonego podejścia do wielkopowierzchniowych monokultur (Piotrowski & Carus, 2011). Roślina wspiera fitoremediację gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi i poprawia strukturę gleby poprzez głęboki, palowy system korzeniowy, co czyni ją cenną w rolnictwie regeneratywnym i rekultywacji terenów zdegradowanych (Cierpucha, 2013).

Proces zbioru konopi przemysłowych obejmuje roszenie chemiczne lub tradycyjnie na polu (Rysunek 2). W trakcie tego procesu następuje rozkład pektyn przez mikroorganizmy, co ułatwia w dalszej części obróbki oddzielenie włókien od zdrewniałej części łodygi, oraz dekortykację. W rezultacie z wysuszonych roślin powstaje ok. 65% paździerzy i 35% włókien (wagowo) (Cierpucha, 2013; Khan et al., 2015). Pełne oddzielenie włókien w procesie dekortykacji jest bardzo trudne technologicznie i kosztowne, wymagając zaawansowanych linii produkcyjnych, które są opłacalne tylko przy dużej skali upraw (P. B. de Bruijn et al., 2009). W krajach, które dopiero rozwijają technologię przetwórstwa konopi, paździerze często zawierają więcej włókien, co wpływa na ich gęstość nasypową (55 kg/m^3 z włóknami, 113 kg/m^3 bez), a także urabialność mieszanki kompozytu wapienno-konopnego i równomierność rozproszenia spoiwa w materiale (Brzyski, 2018; P. B. de Bruijn et al., 2009; T. Nguyen et al., 2011).



Rysunek 2. Proces uprawy, koszenia i zbioru konopi (źródło: Podlaskie Konopie, 2025)

Łodyga konopi składa się z dwóch głównych stref: zewnętrznej, zawierającej długie włókna łykowe o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, oraz wewnętrznej, zdrewniałej części zwanej rdzeniem. W procesie dekortykacji, podczas którego włókna są oddzielane od rdzenia, powstają paździerze stanowiące główny surowiec stosowany w kompozytach wapienno-konopnych. Paździerze konopne, pochodzą z części łodygi odpowiedzialnej za transport soków, przez co charakteryzują się wysoką hydrofilowością i porowatą, anizotropową strukturą z siecią pustych, podłużnych komórek (Amziane & Collet, 2017; Niyigena, 2016) (Rysunek 3). Badania z użyciem porozymetrii rtęciowej wykazały porowatość na poziomie $76\pm2\%$, z porami o średnicy $50\text{--}80\text{ }\mu\text{m}$ (gęstość $20,8\text{ porów/mm}^2$) oraz komórkami miękiszu o średnicy $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ i $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ (Jiang et al., 2018). Wysoka porowatość przekłada się na korzystne właściwości termiczne i akustyczne kompozytu, a jednocześnie determinuje jego zdolność do pochłaniania i oddawania wilgoci.



Rysunek 3. Przekrój poprzeczny przez łodygę konopi w powiększeniu (kolorem niebieskim zaznaczono strefę zdrewniałą wykorzystywaną do produkcji paździerzy konopnych) (Jiang et al., 2018).

Główne składniki chemiczne paździerzy konopnych to celuloza (40–50%), hemiceluloza (20–30%) oraz lignina (15–25%). Istotną rolę odgrywają również pektyny, stanowiące do 5% składu, które odpowiadają za adhezję międzykomórkową, a przede wszystkim wpływają na interakcję kruszywa z mineralnymi spoiwami (Amziane & Collet, 2017; Diquélou et al., 2015). Lipidy, węglowodory i białka, stanowiące łącznie

do 10% składu, pełnią funkcję ochronną przed wysychaniem i rozwojem mikroorganizmów, jednak ich obecność może utrudniać wiązanie spoiwa mineralnego z powierzchnią kruszywa (Amziane & Collet, 2017). Skład chemiczny różni się w zależności od odmiany, warunków klimatycznych, terminu zbioru i metod przetwarzania, co potwierdzają badania porównujące paździerz z Francji, Niemiec i Wielkiej Brytanii (Tabela 1). Zmienność ta stanowi istotne źródło niepewności w badaniach kompozytów wapienno-konopnych. Różnice w zawartości celulozy, ligniny czy lipidów mogą wpływać na wiązanie spoiwa, a w konsekwencji na właściwości mechaniczne i termiczne gotowego materiału, co należy uwzględnić przy porównywaniu danych z różnych źródeł literaturowych (Bourdout et al., 2019; Diquélou et al., 2015).

Tabela 1. Chemiczny skład paździerzy konopnych w zależności od terminu zbiorów i metody dekortykacji. Paździerze z Francji zostały ścięte w wieku dojrzałym, wysuszone i przerabiane bez roszenia, paździerze z Niemiec przed dekortykacją schły na polu, przed ścięciem, paździerze z Wielkiej Brytanii zostały ścięte przed okresem dojrzałości i były roszone na polu przed dalszą obróbką (Diquélou et al., 2015).

Składnik (% suchej masy)	Paździerze z Francji	Paździerze z Niemiec	Paździerze z Wielkiej Brytanii
Celuloza	47,3	45,6	49,2
Hemiceluloza	18,3	17,8	21
Lignina	21,8	23,3	21,9
Ekstrakty	6	5,1	6,2
Inne (w tym popioły)	10,3	10,7	5,1

Kształt cząstek paździerzy jest podłużny, z długością kilkukrotnie większą niż szerokość (Rysunek 4). Wynika ona z budowy łodygi i wpływ na nią ma także technologia obróbki, np. gęstość uzębienia wałów rozdrabniających przy procesie dekortykacji (Amziane & Collet, 2017). Uziarnienie paździerzy wpływa na właściwości kompozytu wapienno-konopnego. Drobniejsze cząstki zwiększają wytrzymałość na ściskanie i gęstość materiału dzięki lepszemu upakowaniu, choć dłuższe cząstki mogą poprawiać wytrzymałość na zginanie, działając jak zbrojenie (Arnaud & Gourlay, 2012; Brzyski et al., 2020; Stevulova et al., 2013; Williams et al., 2018). Natomiast przy grubszym uziarnieniu większa powierzchnia cząstek może osłabiać wiązanie kruszywo-spoivo, a ich warstwowe ułożenie zwiększać naprężenia w materiale (Niyigena et al., 2018). Uziarnienie wpływa również na przewodność cieplną oraz zdolność kompozytu do absorpcji i podciągania kapilarnego wody, natomiast jego wpływ na paroprzepuszczalność jest marginalny (Brzyski et al., 2020; Niyigena et al., 2018).



Rysunek 4. Nieregularność kształtu paździerzy konopnych zastosowanych w programie badawczym.

Mimo znaczenia uziarnienia dla właściwości kompozytu, w literaturze naukowej jest ono często charakteryzowane w sposób bardzo ograniczony. Dostawcy paździerzy zazwyczaj podają jedynie przedział granulometryczny, w którym mieści się 95% cząstek, co przy ich nieregularnym, wydłużonym kształcie nie daje precyzyjnego obrazu rzeczywistych wymiarów. Tradycyjna analiza sitowa klasyfikuje cząstki głównie według ich szerokości, a nie rzeczywistej długości, co może prowadzić do niedokładnego opisu ich rzeczywistych wymiarów (Abdellatef et al., 2020; P. de Bruijn & Johansson, 2013; Horszczaruk et al., 2023). Komitet Techniczny RILEM TC 236-BBM zaleca stosowanie metody obrazowania cyfrowego, które pozwala na dokładniejszy opis morfologii cząstek, choć wymaga starannego przygotowania próbki i doboru parametrów analizy (Amziane et al., 2017). Szczegółowa analiza wpływu uziarnienia na przewodność cieplną kompozytu, wraz z omówieniem i oceną metod charakteryzacji kształtu i rozmiaru cząstek paździerzy, przedstawiona została w publikacji [4].

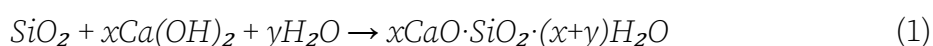
4.1.2. Spoiwo mineralne

Spoiwo mineralne stanowi kluczowy składnik kompozytu wapienno-konopnego, decydując o jego właściwościach fizycznych, mechanicznych oraz trwałości (Arnaud & Gourlay, 2012; Collet & Pretot, 2014). Najpowszechniej stosowane jest spoiwo wapienne, w postaci wapna hydratyzowanego lub hydraulicznego, cenione za kompatybilność z paździerzami konopnymi, wiązanie przez karbonatyzację wspierającą absorpcję CO₂ oraz zachowanie wysokiej paroprzepuszczalności kompozytu (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022; Kaur & Kander, 2023; Scrucca et al., 2020). Wybór spoiwa zależy od przeznaczenia materiału i wymagań produkcyjnych, a także od docelowego oddziaływania kompozytu na środowisko, gdyż rodzaj i ilość spoiwa istotnie kształtują jego ślad węglowy (Ip & Miller, 2012; Sofiane & Laurent, 2013). Właściwości spoiwa mogą być modyfikowane przez dodatki pucolanowe, których mechanizmy działania i wpływ na twardnienie kompozytu różnią się w zależności od rodzaju (Nozahic et al., 2012; Sinka et al., 2018).

Wapno hydratyzowane jest najczęściej stosowanym spoiwem w kompozytach wapienno-konopnych ze względu na powszechną dostępność i niski koszt. Otrzymywany wodorotlenek wapnia charakteryzuje się wysoką porowatością, sprzyjającą absorpcji wody i izolacyjności termicznej (Arnaud & Gourlay, 2012; Collet & Pretot, 2014). Wapno tworzy środowisko o wysokim pH (około 12), co zabezpiecza spoiwo roślinne przed korozją biologiczną i rozwojem pleśni, jednocześnie korzystnie wpływając na ognioodporność kompozytu (Evrard & Herde, 2006). Wapno hydrauliczne, choć mniej rozpowszechnione w Polsce ze względu na ograniczoną dostępność złóż marglistych, może być stosowane jako spoiwo samodzielne lub w mieszankach z wapnem hydratyzowanym, gdzie dodatek rzędu 15% wagowo zapewnia szybsze wiązanie dzięki reakcjom hydraulicznym (P. B. de Bruijn et al., 2009; Ip & Miller, 2012). Przedmiotem badań są również alternatywne spoiwa, takie jak cement portlandzki, gips czy cement MgO, analizowane zarówno jako modyfikatory spoiw wapiennych, jak i jako samodzielne spoiwa (Brzyski, 2018; P. B. de Bruijn et al., 2009; Hussain et al., 2019a; Sinka et al., 2018).

Pucolany są materiałami naturalnymi (np. popioły wulkaniczne, metakaolin)

lub sztucznymi, będącymi produktami ubocznymi przemysłu (np. popioły lotne). Samodzielnie nie wykazują właściwości wiążących, jednak zawierają krzemionkę i/lub tlenek glinu w postaci reaktywnej, dzięki czemu w obecności wody reagują chemicznie z wodorotlenkiem wapnia, tworząc związki o właściwościach wiążących (Sokołowska, 2025) (Równanie 1):



Do najważniejszych pucolan i modyfikatorów stosowanych w kompozytach wapienno-konopnych należą metakaolin, pył krzemionkowy, popiół lotny oraz metakrzemian sodu, a także dodatki takie jak mączka wapienna czy zmielony piasek kwarcowy (P. de Bruijn & Johansson, 2013; Dinh et al., 2015; Fic et al., 2017; Gołębiowski, 2020). Dodatki pucolanowe mogą znacząco zwiększać wytrzymałość na ściskanie zaprawy wapiennej. Przykładowo, dodatek 20% metakaolinu powoduje dziesięciokrotny wzrost wytrzymałości, pył krzemionkowy w tej samej ilości prawie czterokrotny, a szkło wodne trzykrotny (Łukowski, 2010).

Rodzaj spoiwa determinuje przebieg procesu twardnienia kompozytu - wapno hydratyzowane twardnieje wolno poprzez karbonatyzację, która w kompozycie wapienno-konopnym postępuje jedynie kilka centymetrów od powierzchni (Amziane & Collet, 2017), natomiast wapno hydrauliczne i cement portlandzki zapewniają szybsze wiązanie dzięki reakcjom hydraulicznym (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022). Dodatki pucolanowe, takie jak metakaolin, dodatkowo przyspieszają twardnienie przez formowanie wtórnych faz wiążących, tworząc gęstszą strukturę kompozytu (Nozahic et al., 2012).

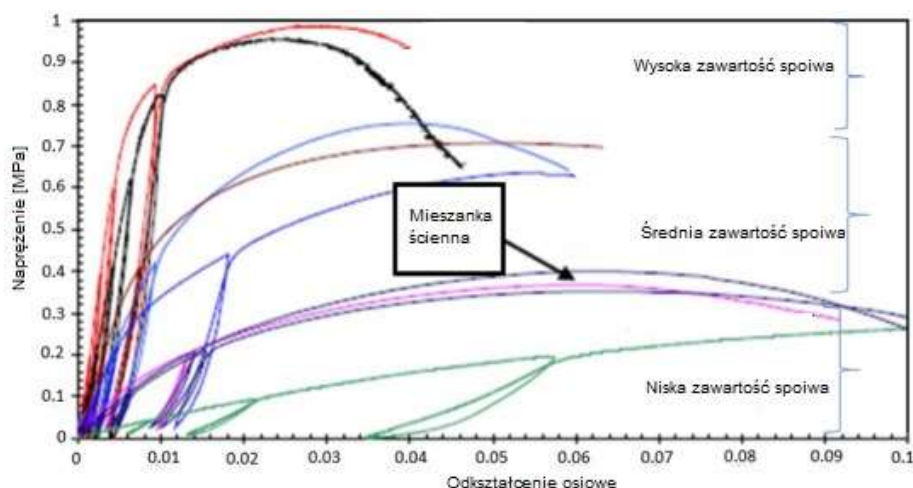
W zachodniej Europie dostępne są gotowe spoiwa dedykowane kompozytom wapienno-konopnym, takie jak Tradical PF 70 i Tradical HB czy Batichanvre, zawierające wapno, składniki hydrauliczne i dodatki pucolanowe w proporcjach stanowiących tajemnicę handlową. W Polsce mieszanki te nie są ogólnodostępne, a ich import z zagranicy zwiększa ślad węglowy kompozytu i obniża jego walory ekologiczne. Dodatkową wadą gotowych spoiw komercyjnych jest brak przejrzystości składu, co utrudnia odtworzenie wyników badań przez innych badaczy. Z tych

względów w niniejszym programie badawczym zastosowano spoiwo własne o znanym i powtarzalnym składzie, obejmującym wapno hydratyzowane, cement portlandzki oraz metakaolin. Jego dokładny skład i uzasadnienie doboru omówiono w rozdziale 5.2.1.

4.2. Właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytów wapienno-konopnych

4.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

Podstawowym parametrem wytrzymałościowym kompozytu wapienno-konopnego jest wytrzymałość na ściskanie, wyznaczana na podstawie analizy krzywej naprężenie-odkształcenie uzyskanej w próbie niszczącej. Zachowanie materiału pod obciążeniem osiowym można określić jako sprężysto-plastyczne, przy czym charakter krzywej naprężenie-odkształcenie zależy istotnie od proporcji spoiwa do paździerzy. Przy niskiej zawartości spoiwa matryca tworzy jedynie sztywne mostki między cząstkami kruszywa, które dominują w odpowiedzi mechanicznej, co skutkuje rozległym plateau plastycznym i wysoką plastycznością materiału. Przy średniej zawartości spoiwa paździerze otoczone są warstwami hydratów o różnej grubości. Przy wysokiej zawartości spoiwa tworzy ono ciągłą matrycę, w której osadzone są cząstki kruszywa, co prowadzi do wyraźniejszej strefy sprężystej i wyższej wytrzymałości mechanicznej, kosztem plastyczności (Rysunek 5) (Bardouh et al., 2024).

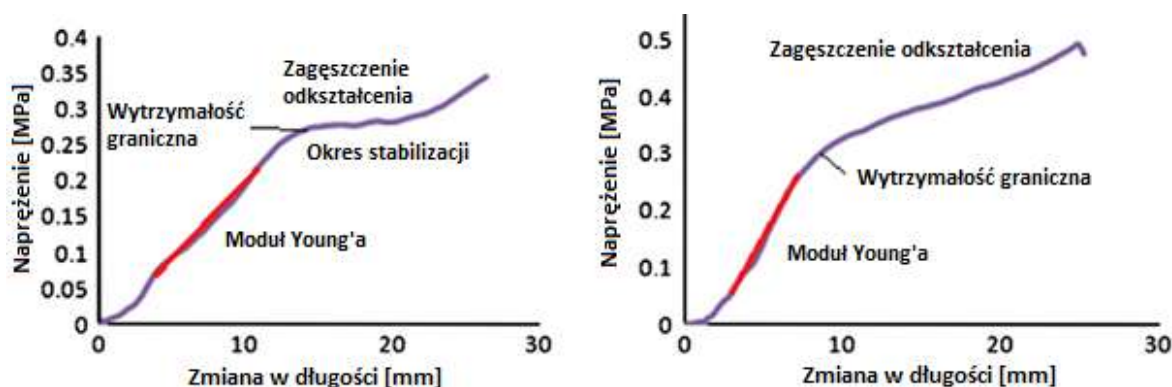


Rysunek 5. Wpływ zawartości spoiwa na zachowanie mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego (Véronique, 2005).

Niezależnie od proporcji składników, zachowanie kompozytu pod obciążeniem przebiega w kilku charakterystycznych fazach. W fazie sprężystej obciążenie przejmuje głównie matryca mineralna, krzywa naprężenie-odkształcenie ma postać zbliżoną do linii prostej, a odkształcenia pozostają stosunkowo niewielkie (Sofiane & Laurent, 2013; Williams et al., 2016). W kolejnej, rozległej fazie plastycznej przyrost naprężenia wyraźnie zwalnia. Następuje stopniowe zamykanie pustek: najpierw między cząstkami paździerzy, a następnie wewnątrz samych cząstek. Gdy pustki są niemal zamknięte, upakowanie cząstek staje się bardziej sztywne, a narastające naprężenia wokół kruszywa prowadzą do jego zgniatania i pęknięcia otaczającego spoiwa. Skutkuje to wypłaszczeniem krzywej naprężenie-odkształcenie i powstaniem charakterystycznego plateau (Bardouh et al., 2024; Walker et al., 2014), przy czym długość poszczególnych faz zależy od proporcji spoiwa względem pozostałych składników (Arnaud & Gourlay, 2012).

Nie zawsze jednak krzywa osiąga wyraźne maksimum. W przypadku gdy kompresja próbki przekroczy około 3–5% odkształcenia, sprasowane paździerze zaczynają stopniowo przejmować coraz większą część naprężenia. Na wykresie naprężenie-odkształcenie krzywa nadal wzrasta, a materiał zachowuje się podobnie do drewna ściskanego w poprzek włókien (Rysunek 6) (Brzyski et al., 2020). Niektórzy badacze tłumaczą to narastającym kontaktem między ściankami cząstek kruszywa w miarę ich zagęszczania (Elfordy et al., 2008). Kompozyt może być wówczas długo

kompresowany bez widocznego załamania krzywej, mimo że wizualnie jest już zniszczony. Część badaczy tłumaczy to niekompletnym związaniem spoiwa wynikającym z powolnej karbonatyzacji wapna, co przekłada się na niską sztywność matrycy kompozytu (Amziane & Collet, 2017).



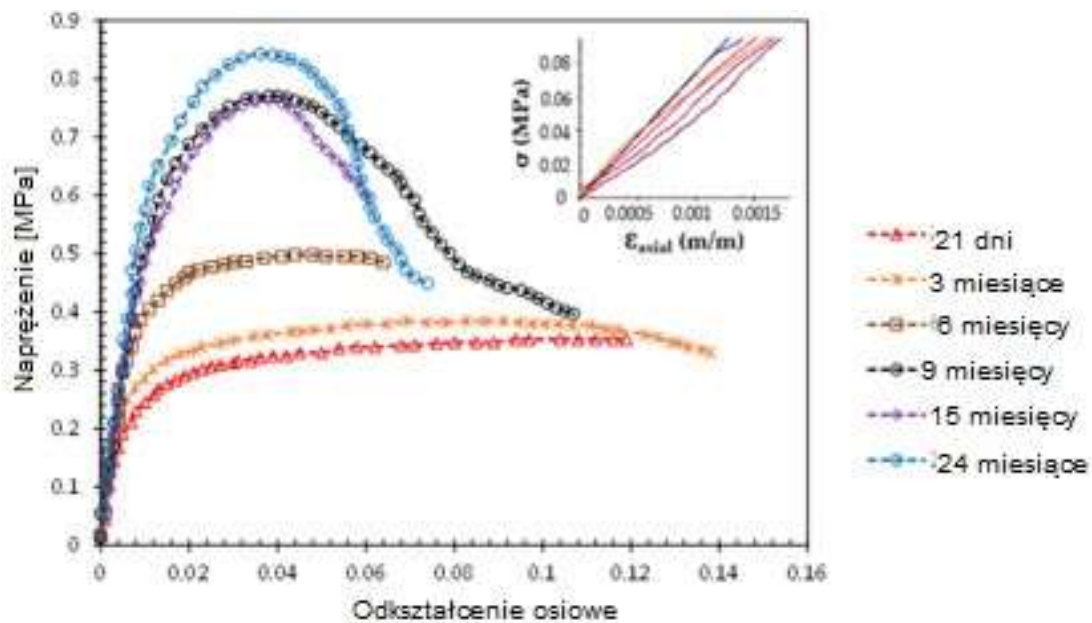
Rysunek 6. Dwa reprezentatywne wykresy dla typowego zachowania kompozytu wapienno-konopnego pod wpływem obciążenia ściskającego (Walker et al., 2014).

Opisana zmienność charakteru krzywej naprężenie-odkształcenie przekłada się bezpośrednio na szeroki zakres wartości wytrzymałości na ściskanie raportowanych w literaturze: od 0,06 MPa (Sinka et al., 2018) do 4,74 MPa (Tronet et al., 2016), choć najczęściej notuje się wartości rzędu 0,1–1,2 MPa (Delannoy et al., 2018; E. Haustein, 2018; Niyigena et al., 2018; Sheridan et al., 2020; Sinka et al., 2018; Walker et al., 2014). Tak duża rozpiętość wynika z kilku wzajemnie powiązanych czynników, spośród których największe znaczenie ma gęstość kompozytu, determinowana przede wszystkim stosunkiem spoiwa do paździerzy oraz stopniem kompresji (Arnaud & Gourlay, 2012). Zwiększenie proporcji spoiwa do paździerzy z 1 do 2 powoduje wzrost gęstości o około 50% i ponad dwukrotny wzrost wytrzymałości na ściskanie (Arnaud & Gourlay, 2012; Sinka et al., 2018). W szerszym zakresie proporcji, od 0,98 do 2,58, gęstość wzrasta dwukrotnie, a wytrzymałość trzykrotnie, osiągając wartości od 0,19 do 0,68 MPa (Arnaud & Gourlay, 2012). Podobne tendencje potwierdzają liczne inne prace (Brzyski, 2018; Dinh et al., 2015; Haustein, 2018; Sinka et al., 2018).

Równie istotny, choć rzadziej precyzyjnie raportowany w literaturze, jest stopień zagęszczenia materiału na etapie produkcji. Autorzy opisują go zazwyczaj w sposób niejednoznaczny. Może to być „delikatne ubijanie” (Williams et al., 2018) czy

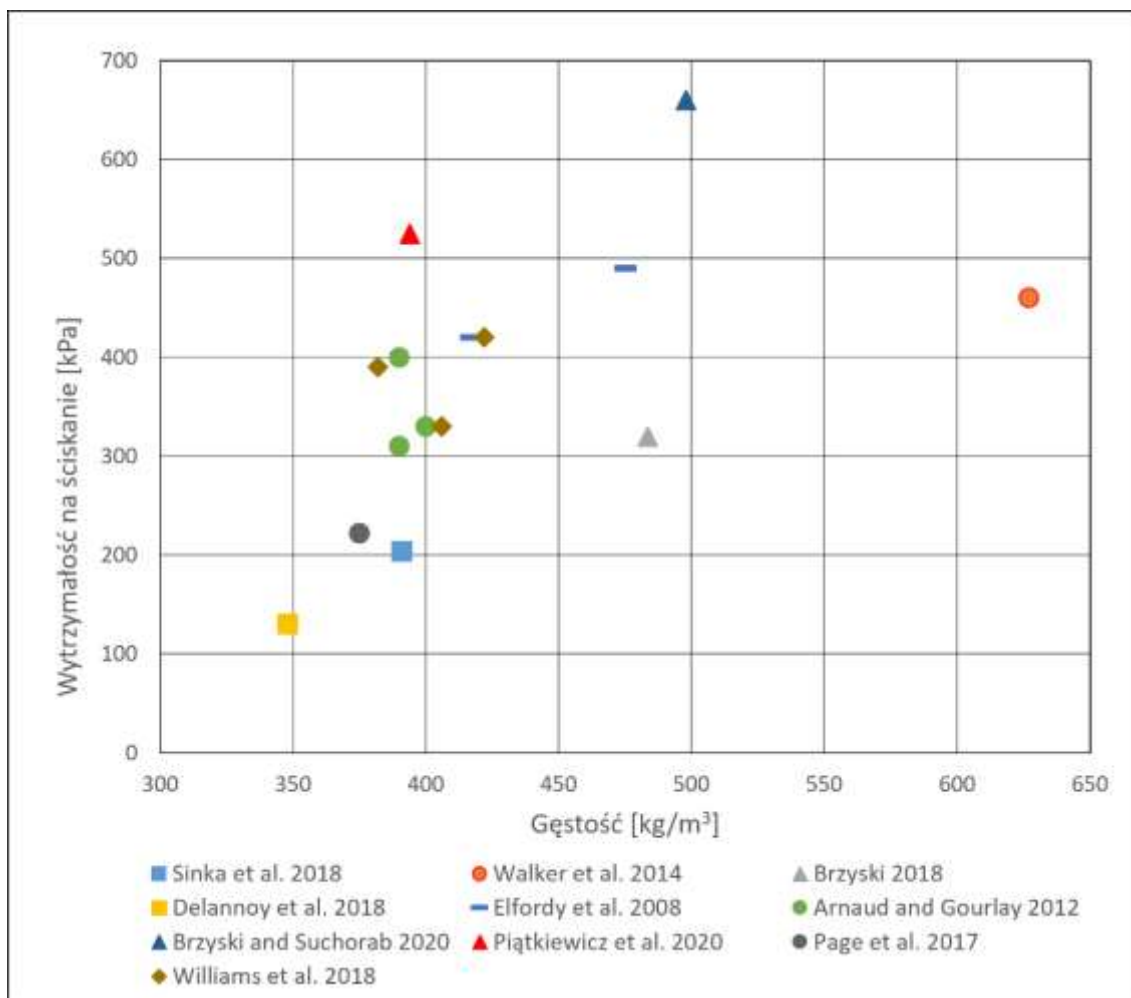
„zagęszczanie tak, aby wyeliminować większe pustki powietrzne” (Colinart et al., 2012). Taka charakteryzacja zagęszczenia, w przypadku materiału, który takowego wymaga, utrudnia porównywanie wyników między badaniami. Tymczasem wyższy stopień zagęszczenia prowadzi do wyraźnej poprawy parametrów mechanicznych: w badaniu (Williams et al., 2017) porównano trzy poziomy kompresji (30%, 45% i 60% redukcji objętości) i wykazano, że wytrzymałość na ściskanie rośnie proporcjonalnie do gęstości. Stosowanie wyższego ciśnienia podczas formowania pozwala ponadto ograniczyć ilość spoiwa w mieszance (T. Nguyen et al., 2011), co ma dodatkowe znaczenie środowiskowe. Wpływ stopnia zagęszczenia na właściwości mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego był przedmiotem szczegółowych badań własnych autora, których wyniki opublikowano w publikacjach [5], [6] i [7].

Ze względu na to, że w kompozycie wapienno-konopnym to głównie matryca mineralna przejmuje obciążenia, wybór spoiwa ma szczególne znaczenie dla osiąganej wytrzymałości na ściskanie. Badania Brzyskiego wykazały, że przy spoiwach bazujących na wapień hydratyzowanym wytrzymałość na ściskanie rośnie wraz z udziałem dodatków hydraulicznych lub pucolanowych takich jak cement, gips czy glina (Brzyski, 2018), co potwierdzają również inne prace (Sáez-Pérez et al., 2020). Interesujące wnioski przynoszą badania Walker i współpracowników: choć wyższa hydrauliczność spoiwa przekłada się na lepszą wytrzymałość we wczesnym etapie dojrzewania, po roku różnice między spoiwami w dużej mierze zanikają (Walker et al., 2014; Walker & Pavía, 2014). Wynika to z powolnej karbonatyzacji wapna, która może trwać nawet kilka lat i stopniowo poprawia właściwości mechaniczne materiału. Badania próbek o identycznym składzie wykazały, że największy przyrost wytrzymałości zachodzi między 3. a 15. miesiącem sezonowania (Rysunek 7). Co istotne, wraz z wiekiem próbek zmienia się również charakter ich zachowania pod obciążeniem. Krzywa naprężenie-odkształcenie stopniowo nabiera wyraźniejszego punktu maksymalnego naprężenia, analogicznie do efektu obserwowanego przy zwiększaniu udziału spoiwa w mieszance. Świadczy to o tym, że postępująca karbonatyzacja wzmacnia matrycę mineralną, zmieniając mechaniczny charakter kompozytu z bardziej plastycznego na bardziej kruchy.



Rysunek 7. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego w zależności od wieku (Véronique, 2005).

Przedstawiona rozpiętość wartości wytrzymałości na ściskanie wynika nie tylko z różnorodności składów i technologii wykonania, ale również z braku ujednoliconych metod jej wyznaczania. W literaturze funkcjonuje co najmniej sześć różnych metod, których zastosowanie może prowadzić do nawet dwukrotnych różnic w wyznaczanej wytrzymałości dla tego samego materiału (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**). Utrudnia to nie tylko porównywanie wyników między badaniami, ale również praktyczne projektowanie przegród budowlanych z kompozytu wapienno-konopnego. Szczegółowe omówienie poszczególnych metod oraz ich wpływu na uzyskiwane wyniki, a także propozycja nowego podejścia do wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego zostały przedstawione w Rozdziale 6.3 i 7.5, a także w publikacji [6].



Rysunek 8. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego w funkcji gęstości objętościowej, zestawiona na podstawie publikacji stosujących porównywalne spoiwa i proporcje B/S.

4.2.2. Właściwości cieplne

Podstawowym parametrem kompozytu wapienno-konopnego, ze względu na jego funkcję izolacyjną, jest współczynnik przewodzenia ciepła (λ). W zależności od składu i parametrów technologicznych parametr ten może przyjmować wartości w szerokim przedziale od 0,06 do 0,14 W/(m·K) (Sinka et al., 2018; Walker & Pavía, 2014). Wynika on przede wszystkim z gęstości materiału i jego porowatości, które kształtowane są głównie przez kilka czynników: proporcję spoiwa do paździerzy, uziarnienie kruszywa, stopień zagęszczenia (Hirst et al., 2010; Sassoni et al., 2014; Stevulova et al., 2018).

Kompozyt wapienno-konopny składa się w głównej mierze z

wysokoporowatych paździerz konopnych o niskiej przewodności cieplnej oraz spoiwa mineralnego, którego przewodność cieplna jest ponad 10 razy wyższa (Laborel-Préneron et al., 2018; Sofiane & Laurent, 2013). Stosunek masowy tych dwóch składników (B/S) spotykany w literaturze mieści się w przedziale od 0,69 do 4,82 (Arnaud & Gourlay, 2012; Page et al., 2017). Sinka i in. wykazali, że niezależnie od rodzaju spoiwa wzrost proporcji spoiwo/paździerz z 1:1 do 2:1 podniósł λ o 17–23% (Sinka et al., 2018). Z kolei Abdellatef i in. uzyskali wzrost o ok. 30% dla tej samej zmiany proporcji (Abdellatef et al., 2020); jeszcze silniejszy efekt odnotowali Sassoni i in. – 34% przy zmianie B/S z 1,5 do 2,5 (Sassoni et al., 2014), a Brzyski w swojej rozprawie doktorskiej poświęconej kompozytom wapienno-konopnym zaobserwował wzrost o 38% przy zmianie proporcji z 1,5 do 2,0 (Brzyski, 2018). Wpływ proporcji spoiwa do paździerzy na przewodność cieplną był przedmiotem badań w całym niniejszym programie badawczym, a w szczególności w publikacjach [1,4,5,7].

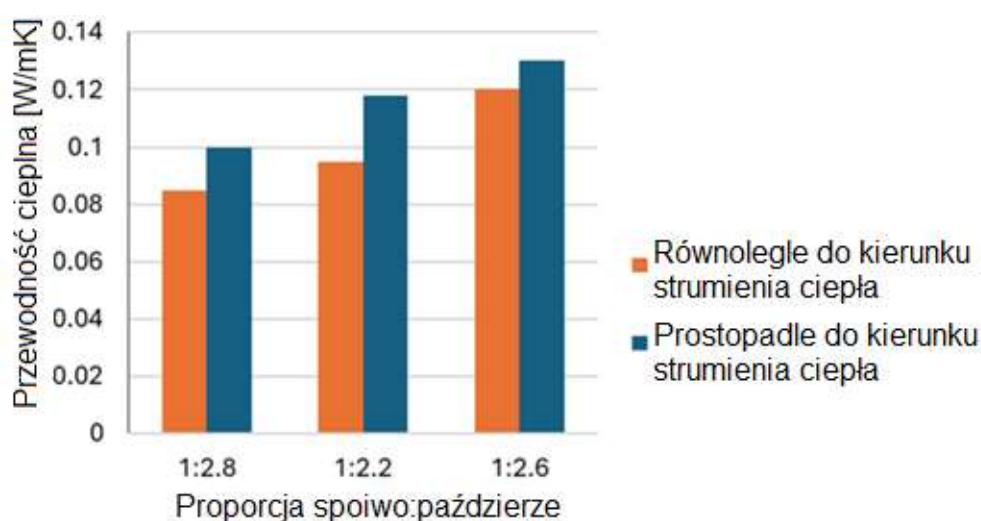
Stopień zagęszczenia mieszanki podczas formowania stanowi drugi istotny czynnik kształtujący porowatość, a tym samym przewodność cieplną materiału. Nguyen i in. wykazali, że mechaniczne zagęszczanie z naprężeniami w zakresie 0,6–1,0 MPa, przy trzykrotnej redukcji objętości świeżej mieszanki, może prowadzić do wzrostu λ o nawet 35% (T. T. Nguyen et al., 2011). Williams i in., badając trzy poziomy kompresji (30%, 45% i 60% redukcji objętości), stwierdzili bezpośrednią korelację między stopniem zagęszczenia a wzrostem λ : wzrost gęstości o ok. 18% skutkował zwiększeniem przewodności cieplnej o ok. 8% (Williams et al., 2017). Wpływ zagęszczenia na λ jest zatem wyraźnie mniejszy niż wpływ proporcji B/S, jednak nie można go pominąć przy formowaniu metodą szalunkową (która zostanie omówiona w Rozdziale 4.4). Nierównomierne ubijanie kolejnych warstw może prowadzić do lokalnego zróżnicowania gęstości w obrębie tej samej przegrody, a tym samym do niejednorodności jej właściwości cieplnych. Wpływ stopnia zagęszczenia na przewodność cieplną kompozytu wapienno-konopnego był przedmiotem szczegółowych badań własnych, których wyniki przedstawiono w publikacjach [5] i [7].

Trzecim czynnikiem wpływającym na przewodność cieplną jest uziarnienie

paździerzy konopnych, choć badania w tym zakresie dają niejednoznaczne wyniki. Drobniejsze frakcje, wypełniając przestrzenie między większymi cząstkami, zagęszczają strukturę i nieznacznie podnoszą przewodność cieplną. Brzyski i in. zaobserwowali różnicę λ rzędu 6% między kompozytami z drobnej i grubszej frakcji (Brzyski et al., 2020), a Williams i in. odnotowali że wartości λ dla frakcji o średniej długości cząstek 7,5 i 15,3 mm oscylowały wokół 0,12 W/(m·K), podkreślając że wpływ uziarnienia był niemal niezauważalny (Williams et al., 2018). Wyraźniejsze różnice, sięgające nawet 34%, uzyskał Niyigena i in. w badaniu 13 rodzajów paździerzy, wiążąc tę zmienność nie tylko z uziarnieniem, lecz także z odmiennym składem chemicznym kruszywa z różnych źródeł (Niyigena et al., 2018). Nie bez znaczenia może być również fakt, że mieszanka składająca się z drobniejszych cząstek paździerzy podlega łatwiejszemu zagęszczeniu i upakowaniu podczas formowania co zwiększa gęstość kompozytu i konsekwentnie przewodność cieplną. Wpływ uziarnienia paździerzy na przewodność cieplną został szczegółowo przebadany w publikacji [4], a jego implikacje dla interpretacji wyników omówiono również w publikacji [7].

Kompozyt wapienno-konopny jest materiałem anizotropowym, w którym cząstki kruszywa układają się dłuższym bokiem prostopadle do kierunku formowania (Williams et al., 2018). Ma to odzwierciedlenie w przewodności cieplnej, która osiąga niższe wartości w kierunku równoległym do kierunku formowania materiału (Rysunek). Różnica ta może sięgać nawet 16% (Williams et al., 2017). Zjawisko to ma praktyczne znaczenie projektowe, gdyż kierunek układania warstw ściany bezpośrednio przekłada się na efektywną izolacyjność przegrody. W niniejszym programie badawczym kierunek formowania próbek był zachowany jednolicie we wszystkich badaniach, z wyjątkiem publikacji [5], w której badano kompozyty przeznaczone do różnych zastosowań budowlanych (ścian, dachów i podłóg) co determinowało odmienny kierunek układania materiału oraz przepływu ciepła. Na wartość λ wpływają również wilgotność i temperatura materiału, które liniowo zwiększają przewodność cieplną, co zostało wielokrotnie potwierdzone w literaturze (Collet & Pretot, 2014; Pierre et al., 2014; Rahim et al., 2016; Seng et al., 2018). Jest to szczególnie istotne w praktyce, gdyż kompozyt wapienno-konopny aktywnie buforuje wilgoć z otoczenia dzięki higroskopijności paździerzy konopnych (Ahlberg et al.,

2014).



Rysunek 9. Wpływ orientacji formowania i stosunku paździerz do spoiwa na przewodność cieplną kompozytu (Williams et al., 2018).

Obok przewodności cieplnej istotnym parametrem termicznym kompozytu jest ciepło właściwe (c_p), decydujące o pojemności cieplnej przegrody i jej zdolności do akumulowania energii oraz łagodzenia dobowych wahań temperatury. Wartości c_p raportowane w literaturze cechują się wyjątkowo dużym rozrzutem, wynoszącym od 300 do 1601 J/(kg·K) (Brzyski et al., 2020; P. de Bruijn & Johansson, 2013; Seng et al., 2018), co wynika zarówno z różnic w składzie kompozytów, jak i ze stosowanej metodyki pomiarowej. W literaturze stosowane są metody bezpośrednie (np. kalorymetria) oraz pośrednie, w których c_p wyznaczane jest na podstawie pomiarów przewodności cieplnej i dyfuzyjności. Metody pośrednie mogą systematycznie zaniżać wyniki. W badaniu (Seng et al., 2018) ta sama próbka zbadana metodą bezpośrednią i pośrednią dała wartości różniące się o 18%. Wykazują one ponadto wrażliwość na anizotropię materiału: dla kompozytu o gęstości ok. 400 kg/m³ uzyskano wartości 620 i 840 J/(kg·K) odpowiednio dla przepływu ciepła równoległego i prostopadłego do orientacji cząstek paździerz (Pierre et al., 2014), co koresponduje z opisaną wcześniej anizotropią λ . Dodatkowym źródłem rozbieżności jest wilgotność próbek: ze względu na wysokie ciepło właściwe wody nawet niewielka różnica w zawartości wilgoci może istotnie zawyżać zmierzony wynik (Abdellatef et al., 2020; P. de Bruijn & Johansson, 2013). Rodzaj spoiwa i uziarnienie paździerz mają natomiast drugorzędne znaczenie

dla cp (Brzyski et al., 2020; Walker & Pavía, 2014). Zagadnienie ciepła właściwego kompozytu wapienno-konopnego zostało szczegółowo zbadane w publikacji [5].

Zestawiając omówione parametry, kompozyt wapienno-konopny wyróżnia się korzystnym połączeniem umiarkowanej izolacyjności termicznej z relatywnie wysoką pojemnością cieplną, co czyni go materiałem szczególnie predysponowanym do zastosowań, w których kluczowa jest stabilność termiczna wewnątrz, a nie wyłącznie minimalizacja współczynnika λ . Jednocześnie wieloczynnikowy i wzajemnie powiązany charakter zależności między składem, technologią formowania a właściwościami cieplnymi sprawia, że jednoznaczne określenie parametrów termicznych projektowanej przegrody jest utrudnione. Wpływ poszczególnych zmiennych, takich jak proporcji B/S, stopnia zagęszczenia, uziarnienia kruszywa czy kierunku formowania – nie jest addytywny, a ich oddziaływanie może się wzajemnie nakładać. Stanowi to istotne wyzwanie zarówno na etapie projektowania przegród budowlanych z tego materiału, jak i przy formułowaniu ogólnych zaleceń normalizacyjnych.

4.2.3. Paroprzepuszczalność

Kompozyt wapienno-konopny charakteryzuje się wysoką paroprzepuszczalnością, co stanowi jedną z jego istotnych zalet użytkowych w kontekście regulacji wilgotności w budynkach. Współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej (μ) mierzony w zakresie wilgotności względnej do 50% mieści się w przedziale 3,6–7,7, przy czym wartości bliskie 5 są w literaturze najczęściej spotykane (Brzyski, 2018; Collet et al., 2013; Walker & Pavía, 2014). Na wartość współczynnika μ wpływają zarówno właściwości składników, jak i ich wzajemne proporcje (Brzyski, 2018). Badania wykazały jednak, że mikropory spoiwa mają stosunkowo niewielki udział w oporze dyfuzyjnym materiału. Decydujące znaczenie mają makropory między cząstkami paździerzy, których struktura kształtowana jest głównie przez proporcję składników i stopień zagęszczenia mieszanki (Walker & Pavía, 2014). Oznacza to, że paroprzepuszczalność kompozytu jest w dużej mierze pochodną tych samych czynników technologicznych, które determinują jego właściwości cieplne. Wpływ proporcji składników i stopnia zagęszczenia na tę właściwość był przedmiotem badań

własnych przedstawionych w publikacjach [1] i [5].

Istotnym zjawiskiem jest zależność paroprzepuszczalności od poziomu wilgotności względnej otoczenia (RH). Wyższe wartości RH indukują wyższą przepuszczalność pary wodnej przez kompozyt (Collet et al., 2013). Potwierdzają to badania (Brzyski et al., 2020), w których współczynnik μ wyznaczono dla dwóch zakresów wilgotności (0–50% i 50–94%) oraz dla dwóch frakcji paździerzy (gruboziarnisty i drobnoziarnisty). Dla niższego zakresu RH uzyskano wartości μ wynoszące odpowiednio 12,18 i 12,37, natomiast dla wyższego – 5,57 i 4,94. Wyniki te potwierdzają wyraźnie wyższą paroprzepuszczalność materiału w warunkach podwyższonej wilgotności, a jednocześnie wskazują na marginalny wpływ uziarnienia paździerzy na tę właściwość.

4.2.4. Palność

Palność jest jedną z najczęściej wyrażanych obaw wobec materiałów budowlanych pochodzenia organicznego, w tym kompozytu wapienno-konopnego. Nieformalne próby, w których przykładano ogień do bloczka z kompozytu przy użyciu palnika gazowego, wskazują na wysoką odporność materiału na działanie ognia (Brzyski, 2018). Trudno jednak uznać je za miarodajny dowód, gdyż stanowią jedynie wstępną obserwację nieodpowiadającą warunkom znormalizowanych badań ogniowych.

Bardziej wiarygodne dane pochodzą z badań przeprowadzonych we Francji i Wielkiej Brytanii, w których badano reakcję pełnowymiarowych ścian z kompozytu wapienno-konopnego na ogień. W trakcie 100-minutowego badania nie stwierdzono emisji toksycznych substancji, a struktura kompozytu nie uległa zapłonowi. Producent spoiwa Tradical podaje, że ściany i stropy wykonane zgodnie z jego specyfikacją techniczną uzyskały klasę reakcji na ogień B-s1, d0 (Lhoist Southern Europe, 2017), przy czym specyfikacja ta została zastosowana również przy wykonaniu próbek w publikacji [5].

Kompozyt wapienno-konopny składa się w znacznej mierze z paździerzy konopnych, które same w sobie są łatwopalne. Kluczową rolę ochronną pełni spoiwo

mineralne, które pokrywa cząstki konopne i odcina dostęp ognia do ich powierzchni. Dokładne otoczenie paździerzy spoiwem jest zatem warunkiem koniecznym dla zapewnienia odpowiedniej odporności ogniowej. W Polsce w 2024 roku dzięki staraniom Ogólnopolskiego Stowarzyszenia Budownictwa Naturalnego (OSBN) przeprowadzono badania reakcji na ogień oraz stopnia rozprzestrzeniania ognia kompozytu wapienno-konopnego (Rysunek 10). Materiał uzyskał klasę B-s1, d0 reakcji na ogień oraz klasyfikację NRO w zakresie rozprzestrzeniania ognia, co potwierdza wyniki badań z Europy Zachodniej. Oznacza to, że kompozyt wapienno-konopny klasyfikuje się jako materiał niezapalny o najniższej klasie wytwarzania dymu i płonących cząstek. Palność kompozytu wapienno-konopnego nie była przedmiotem badań w niniejszym programie badawczym, jednak ze względu na jej praktyczne znaczenie dla dopuszczenia materiału do stosowania w budownictwie omówiono ją jako element szerszej charakterystyki materiału.

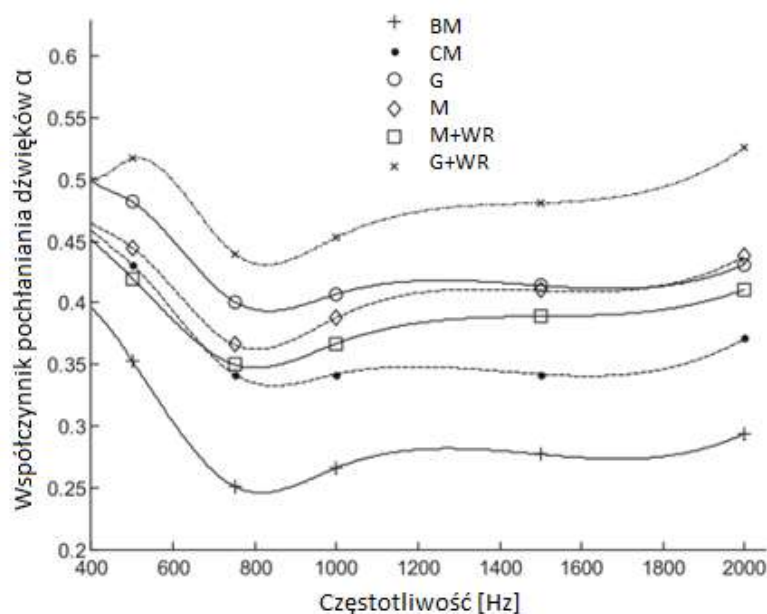


Rysunek 10. Badanie reakcji na ogień (zdjęcie autora).

4.2.5. Izolacyjność akustyczna

Izolacyjność akustyczna przegrody budowlanej opisywana jest najczęściej współczynnikiem R_w , określającym redukcję dźwięków powietrznych w decybelach. Im wyższa jest ta wartość, tym skuteczniejsze tłumienie. Polska norma PN-B-02151-3:2015 wymaga dla ścian między mieszkaniami w budownictwie wielorodzinnym $R_w \geq 50$ dB (PKN, n.d.)(*PN-B-02151-3:2015 Akustyka budowlana. Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych*, PKN)(PKN, n.d.). Badania przeprowadzone przez brytyjskie Centrum Nauki o Budownictwie (BRE, Building Research Establishment) w 2001 roku na budynkach wielorodzinnych wykazały, że ściany z kompozytu wapienno-konopnego o grubości 150 mm i gęstości 550 kg/m^3 osiągnęły izolacyjność na poziomie 57–58 dB, spełniając wymagania brytyjskie (min. 49 dB), choć wypadły ok. 6 dB gorzej niż porównywalne ściany z pustaków gazobetonowych (BRE Construction Division, 2002). Odnotowano przy tym, że nieotynkowana powierzchnia kompozytu wykazywała nieco lepszą izolacyjność niż powierzchnia otynkowana, co wiąże się z pochłanianiem dźwięku przez porowatą strukturę materiału (Kinnane et al., 2016).

Drugą istotną miarą jest współczynnik pochłaniania dźwięku α , gdzie 0 oznacza pełne odbicie, a 1 całkowite pochłonięcie energii akustycznej. Kompozyt wapienno-konopny osiąga wartości α od 0,24 do 0,53 w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz, przy czym absorpcja zależy zarówno od częstotliwości, jak i od rodzaju spoiwa. Dodatki hydrauliczne pogarszają pochłanianie, najlepiej natomiast wypadają spoiwa wapienno-pucolanowe, których porowata struktura sprzyja absorpcji (Rysunek) (Kinnane et al., 2016). Warto zaznaczyć, że izolacyjność akustyczna powinna być rozpatrywana dla całej przegrody, a nie pojedynczego materiału, gdyż jednostkowe parametry dają jedynie orientacyjny pogląd na zdolność do tłumienia dźwięku. Izolacyjność akustyczna nie była przedmiotem badań w niniejszym programie badawczym, jednak ze względu na jej praktyczne znaczenie dla zastosowań budowlanych omówiono ją jako element szerszej charakterystyki materiału.



Rysunek 11. Absorpcja dźwięku przez ścianę z betonu konopnego dla różnych spoiw w zakresie 500-2000 Hz (Kinnane et al., 2016).

4.2.6. Nasiąkliwość

Nasiąkliwość, czyli zdolność materiału do wchłaniania i magazynowania wody, ma istotne znaczenie dla trwałości, izolacyjności termicznej oraz odporności na korozję biologiczną, szczególnie w przypadku materiałów organicznych, które są na nią szczególnie narażone (Grudzińska & Brzyski, 2019; Stevulova et al., 2015). Paździerz konopne są pod tym względem wyjątkowo wrażliwe: w kontakcie z wodą ciekłą mogą w ciągu kilku minut podwoić swoją masę, a po 24 godzinach zwiększyć ją nawet czterokrotnie. Przekłada się to na długi czas schnięcia świeżego kompozytu oraz podatność na wzrost mikrobiologiczny i degradację struktury kruszywa w warunkach trwałego zawilgocenia (Hussain et al., 2019b).

Nasiąkliwość kompozytu wapienno-konopnego wyraża się jako procentowy przyrost masy materiału nasyconego wodą względem suchego i osiąga stan pełnego nasycenia po około 7 dniach (Brzyski, 2018). Jej wartość maleje wraz ze wzrostem udziału spoiwa w mieszance: przy stosunku B/S wynoszącym odpowiednio 1:1, 1:1,5 i 1:2 nasiąkliwość wynosiła 161%, 118% i 109% (Dhakal et al., 2017). Nasiąkliwość można ograniczać przez częściowe zastępowanie kruszywa konopnego perlitem ekspandowanym, paździerzami lnianymi lub kazeiną kwasową (Brzyski, 2018; Brzyski

& Gaska-Jędruch, 2024; Brzyski & Suchorab, 2020), a także przez stosowanie drobniejszych frakcji kruszywa, gdyż większe cząstki paździerzy sprzyjają większej absorpcji wody przez kompozyt (Brzyski et al., 2020). Nasiąkliwość nie była przedmiotem badań w niniejszym programie badawczym, jednak jej wpływ na trwałość kompozytu omówiono w kolejnym podrozdziale i publikacji [2].

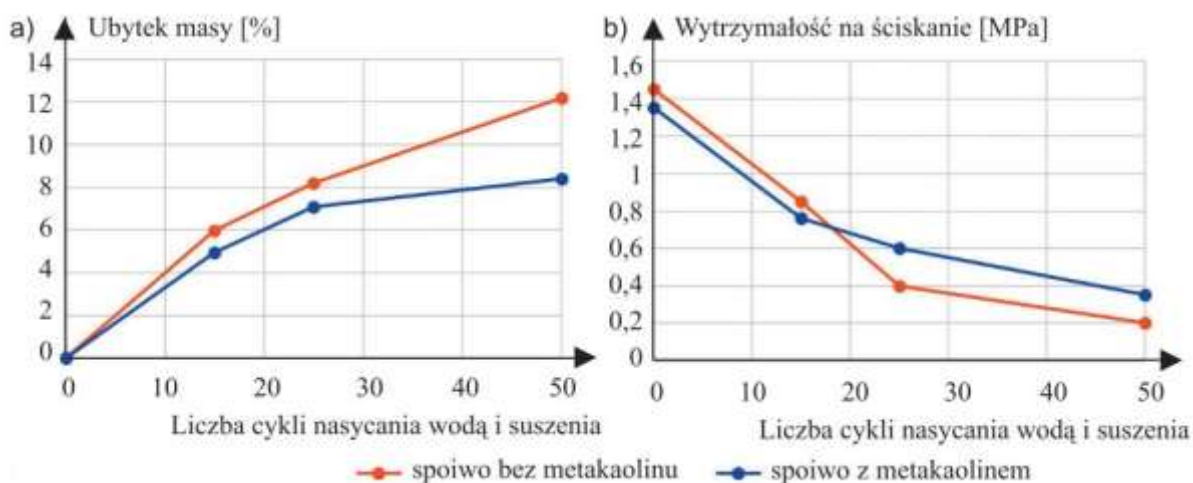
4.2.7. Trwałość

Trwałość materiałów budowlanych odnosi się do ich zdolności do zachowania właściwości technicznych i eksploatacyjnych w założonym okresie użytkowania, przy minimalnych kosztach konserwacji. Na trwałość oddziałują czynniki zewnętrzne (fizyczne, chemiczne i biologiczne), wewnętrzne, wynikające z właściwości fizykochemicznych składników, oraz pośrednie, związane z jakością produkcji i wykonawstwa (Osiecka, 2002).

Jak wspomniano w poprzednim podrozdziale, kompozyt wapienno-konopny charakteryzuje się wysoką nasiąkliwością wagową, co sprawia, że woda jest głównym czynnikiem jego degradacji. Cykliczne nasycanie próbek wodą i suszenie powoduje znaczące spadki wytrzymałości na ściskanie, sięgające nawet 86% w odniesieniu do próbek referencyjnych, oraz zmiany mikrostruktury: zwiększoną porowatość, propagację pęknięć i osłabienie przyczepności paździerza do spoiwa (Rysunek) (P. B. de Bruijn et al., 2009; Walker et al., 2014). Co istotne, badania z zastosowaniem cyklicznej zmiany wilgotności względnej otoczenia, bez bezpośredniego zanurzania próbek, nie wykazały istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych materiału. Towarzyszący im nieznaczny wzrost gęstości i zmniejszenie porowatości tłumaczy się postępującą hydratacją spoiwa i karbonatyzacją, które stopniowo uszczelniają mikrostrukturę (Marceau et al., 2017). Wskazuje to, że kompozyt wapienno-konopny chroniony przed bezpośrednim działaniem wody kapilarnej, atmosferycznej i kondensacyjnej może zachować właściwości użytkowe przez długi czas.

Mrozoodporność kompozytu zależy przede wszystkim od rodzaju spoiwa i jego porowatości, przy czym spoiwa hydrauliczne, charakteryzujące się mniejszymi porami, wykazują wyższą odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w porównaniu ze spoiwami wapienno-pucolanowymi. W niektórych seriach

odnotowano nawet wzrost wytrzymałości po cyklach mrozowych, co tłumaczono dodatkową hydratacją w trakcie nasycania próbek wodą, a nie rzeczywistą odpornością materiału na mróz. Problem niezakończonego procesu wiązania spoiwa pozostaje istotnym utrudnieniem metodologicznym przy ocenie mrozoodporności (P. B. de Bruijn et al., 2009; Walker et al., 2014).



Rysunek 12. Utrata masy (a) oraz zmiana wytrzymałości na ściskanie (b) kompozytu wapienno-konopnego po cyklach nasycania wodą i suszenia (Zerrouki et al., 2022).

Kompozyt wapienno-konopny wykazuje naturalną odporność biologiczną, wynikającą z właściwości paździerzy konopnych zawierających związki fenolowe i inne substancje o działaniu przeciwdrobnoustrojowym (Khan et al., 2015). Dodatkowo alkaliczne środowisko spoiwa ogranicza rozwój większości mikroorganizmów, a w kontrolowanych badaniach laboratoryjnych inokulacja próbek kulturami *Aspergillus*, *Penicillium* i *Bacillus* nie wykazała znaczącej degradacji materiału (Walker et al., 2014). Ryzyko korozji biologicznej wzrasta jednak wraz ze spadkiem pH poniżej 9,2, do jakiego może dochodzić w wyniku zaawansowanej karbonatyzacji starszych kompozytów (Marceau et al., 2017). W zakresie odporności chemicznej ekspozycja na 5-procentowy roztwór NaCl nie wykazała negatywnego wpływu na wytrzymałość mechaniczną, gdyż sole krystalizowały głównie na powierzchni próbek i były łatwo wypłukiwane przez opady (Arizzi et al., 2016; Walker et al., 2014).

Kluczową rolę w kształtowaniu trwałości odgrywa skład spoiwa. Dodatek metakaolinu obniża pH kompozytu do bezpiecznego poziomu (z ok. 13,4 do 11,4 po

cyklach starzenia), ograniczając degradację organicznych składników paździerzy oraz zmniejszając straty wytrzymałości mechanicznej podczas testów przyspieszanego starzenia (Walker et al., 2014; Zerrouki et al., 2022). Szczegółowy przegląd metod badawczych stosowanych w literaturze, obejmujący cykliczne nasycanie wodą i suszenie, zmienność wilgotności otoczenia, cykle zamrażania i rozmrażania, ekspozycję na chlorki oraz badania korozji biologicznej i pomiaru pH, wraz z zestawieniem i krytyczną analizą wyników, został przedstawiony w publikacji [2].

4.3. Technologie produkcji i zastosowania

Kompozyt wapienno-konopny może być wytwarzany i wbudowywany na kilka sposobów, różniących się stopniem uprzemysłowienia, wymaganym zapleczem sprzętowym oraz możliwymi zastosowaniami w budynku. Wybór technologii determinuje zarówno właściwości końcowe materiału, jak i ekonomikę inwestycji. Ten pierwszy aspekt należy uwzględniać przy porównywaniu wyników badań pochodzących z różnych źródeł literaturowych, drugi natomiast jest istotnym czynnikiem przy wyborze metody wykonania w praktyce budowlanej. Wyróżnia się trzy główne metody: szalunkową, natryskową oraz prefabrykację.

Dominującą metodą stosowaną w Polsce jest metoda szalunkowa. Polega na wymieszaniu składników, czyli paździerzy, spoiwa i wody, bezpośrednio na placu budowy, a następnie ręcznym wbudowaniu mokrej mieszanki w szalunek (Rysunek). Szalunek zdejmuje się zazwyczaj już następnego dnia, gdy materiał osiągnie wystarczającą kohezję. Metodę tę stosuje się do wykonywania ścian zewnętrznych i wewnętrznych, izolacji podłóg oraz stropów. Metoda szalunkowa jest szczególnie atrakcyjna w budownictwie jednorodzinnym realizowanym systemem gospodarczym. Nie wymaga ona specjalistycznych narzędzi i jest najtańsza spośród dostępnych technologii. Jej ograniczeniem jest konieczność zapewnienia na placu budowy odpowiedniej przestrzeni do składowania i mieszania składników oraz wykonywania robót w warunkach osłoniętych, gdyż świeży kompozyt i składowane materiały wymagają ochrony przed opadami i mrozem. W niniejszym programie badawczym zastosowano metodę szalunkową jako odpowiadającą warunkom typowym dla budownictwa w Polsce.



Rysunek 13. Proces wznoszenia ściany z kompozytu wapienno-konopnego metodą szalunkową (zdjęcie autora).

Kluczowym elementem technologicznym przy metodzie szalunkowej jest dobór odpowiedniego mieszalnika. Najefektywniejsze okazują się betoniarki planetarne o pionowej osi obrotu i niskiej prędkości, dostępne w pojemnościach od 100 do 1200 litrów, których konstrukcja sprawdza się przy mieszaniu lekkiego, objętościowego materiału jakim jest kompozyt wapienno-konopny. Betoniarki bębnowe, powszechnie dostępne i tanie w wynajmie, sprawdzają się przy mieszankach o wyższym udziale spoiwa, lecz ich skuteczność przy składach z przewagą kruszywa jest ograniczona, a wypełnienie zbiornika nie może przekraczać 30–40% jego objętości.

Kolejną technologią jest metoda natryskowa, która polega na aplikacji materiału bezpośrednio na szalunek tracony przy użyciu specjalistycznego sprzętu pompującego (Rysunek). Umożliwia znaczne przyspieszenie robót oraz uzyskanie bardziej jednorodnej struktury materiału w porównaniu z metodą ręczną. Wymaga jednak dedykowanego sprzętu i wykwalifikowanej obsługi, co podnosi koszty realizacji i ogranicza jej dostępność, zwłaszcza w Polsce, gdzie rynek wykonawczy dopiero się kształtuje.



Rysunek 14. Natryskiwanie kompozytu wapienno-konopnego (źródło: <https://hempstone.net/>)

Trzecią metodą jest prefabrykacja, która może przyjmować dwie formy. Bardziej rozpowszechnione i dostępne handlowo są małogabarytowe elementy w postaci bloczków, produkowanych w zakładowych, kontrolowanych warunkach i murowanych na placu budowy analogicznie do tradycyjnych materiałów ściennych. Drugą rodzajem są wielkogabarytowe panele ścienne lub płyty, umożliwiające szybszy montaż, lecz wymagające sprzętu do transportu i wbudowania ciężkich elementów. Zaletą obu wariantów prefabrykacji jest wysoka powtarzalność właściwości materiału i skrócenie czasu mokrych robót na budowie, wadą zaś wyższy koszt wytworzenia i logistyki. W Polsce prefabrykacja pozostaje metodą marginalną w porównaniu z metodą szalunkową.

Kompozyt wapienno-konopny jest materiałem nienośnym, stosowanym jako wypełnienie, izolacja lub warstwa wykończeniowa w różnych elementach budynku: ścianach zewnętrznych i wewnętrznych, dachach i stropach, podłogach na gruncie, a także w postaci tynku przy renowacji przegród i zabytkowych konstrukcji szachulcowych. Każde z tych zastosowań stawia odmienne wymagania materiałowe: ściany wymagają równowagi między izolacyjnością a wytrzymałością, dachy możliwie najniższej gęstości, podłogi zaś najwyższej odporności na ściskanie. Przekłada się to bezpośrednio na skład mieszanki: im wyższy priorytet wytrzymałości, tym wyższy

powinien być stosunek spoiwa do paździerzy, kosztem właściwości termoizolacyjnych. Wpływ tych różnic składu kompozytu wapienno-konopnego przeznaczonego do zastosowań ściennych, dachowych lub podłogowych na właściwości mechaniczne i fizyczne zbadano w publikacji [5].

5. Metodyka badań

5.1 Program badań kompozytu wapienno-konopnego

Punktem wyjścia niniejszego programu badawczego było dostrzeżenie zmiennych najczęściej występujących w warunkach budowy oraz luk badawczych zidentyfikowanych podczas przeglądu literatury. Aby ograniczyć zakres badań, zdecydowano się na jedno spoiwo o stałym składzie. Badania wstępne przedstawione w publikacji [1] i [3] oraz przegląd literatury dotyczący trwałości kompozytów (publikacja [2]) pozwoliły ustalić skład spoiwa opartego na wapnie hydratyzowanym jako składniku podstawowym, odpowiadającego dostępności surowców na polskim rynku i posiadającego walory ekologiczne. Jako dodatek hydrauliczny zastosowano cement portlandzki zamiast trudno dostępnego w Polsce wapna hydraulicznego, a część cementu zastąpiono metakaolinitem ze względu na jego korzystny wpływ na trwałość i stabilizację pH kompozytu. Skład spoiwa jest zbliżony do dedykowanych spoiw komercyjnych dostępnych za granicą.

Na podstawie zebranych doświadczeń i szerokiej analizy literatury zdefiniowano cztery kluczowe zmienne badawcze, szczegółowo opisane w publikacji [3] i zestawione w Tabeli 2. Uzupełnieniem głównego programu były badania dodatkowe, w których zbadano wpływ stopnia zagęszczenia na kompozyty przeznaczone do różnych zastosowań budowlanych, wykonane zgodnie z zaleceniami producenta spoiwa (Tabela 3).

Pierwszą zmienną jest stosunek spoiwa do paździerzy (B/S). Przyjęto szeroki zakres wartości: 1:1, 2:1 oraz 3:1 (wagowo). Proporcja 1:1 reprezentuje minimalną ilość spoiwa pozwalającą na zabezpieczenie paździerzy i zachowanie charakteru kompozytu, odpowiadając zastosowaniom izolacyjnym o priorytecie niskiej gęstości, takim jak wypełnienie w szalunku traconym lub izolacja zasypowa stropu. Proporcja 2:1 stanowi wartość najczęściej spotykaną w literaturze jako optymalna dla przegród

pionowych, reprezentującą typowe zastosowanie konstrukcyjno-izolacyjne. Proporcja 3:1, choć rzadziej spotykana w literaturze, pozwala określić granice racjonalności stosowania większej ilości spoiwa. Większa zawartość spoiwa poprawia właściwości mechaniczne i znajduje zastosowanie m.in. w wylewkach izolacyjnych (2,75:1) czy tynkach izolacyjnych (4:1).

Drugą zmienną jest stopień zagęszczenia materiału podczas formowania. Ze względu na niską gęstość nasypową i klinowanie się cząstek paździerzy, kompozyt wapienno-konopny wymaga dodatkowego ubijania, zwłaszcza tam gdzie wymagana jest określona wytrzymałość. W literaturze naukowej brak precyzyjnych wytycznych dotyczących sposobu zagęszczania, co, jak wykazano w rozdziale 4, ma istotny wpływ na właściwości gotowego materiału. Przyjęto trzy poziomy zagęszczenia: 150% jako minimalny, zapewniający zachowanie kształtu po rozformowaniu, 190% jako maksymalny możliwy do osiągnięcia przez ręczne ubijanie, oraz pośredni poziom 170%, umożliwiający pełniejszą analizę wpływu tego czynnika. Metoda określania stopnia zagęszczenia została szczegółowo opisana w rozdziale 5.3.

Trzecią zmienną jest stosunek wody do spoiwa (W/B). Paździerze konopne są wysoce wodozadnym kruszywem, a jednocześnie spoiwo wymaga wody do prawidłowego wiązania. W literaturze stosuje się bardzo różne ilości wody dla podobnych składów, a sposób określania konsystencji oparty jest często na organoleptycznej ocenie badacza. Celem badań było określenie wpływu niedoboru i nadmiaru wody na właściwości kompozytu. W tym celu opracowano wzór wyznaczający optymalną proporcję W/B dla przyjętego składu spoiwa, a następnie przyjęto trzy wartości: optymalną oraz zwiększoną i zmniejszoną o założoną wartość. Wzór przedstawiono w rozdziale 5.2.3.

Czwartą zmienną jest uziarnienie paździerzy konopnych. Niejednoznaczność wpływu rozmiaru cząstek na właściwości kompozytu oraz częste porównywanie w literaturze paździerzy pochodzących od różnych dostawców skłoniły do podjęcia tej zmiennej przy jednoczesnej kontroli źródła surowca. Wszystkie paździerze pochodziły od tego samego producenta i z tego samego zbioru. Przy użyciu sit laboratoryjnych otrzymano trzy frakcje o zróżnicowanym uziarnieniu, których szczegółowy opis

przedstawiono w rozdziale 5.2.2.

Tabela 2. Zmienne badawcze w głównym programie badawczym.

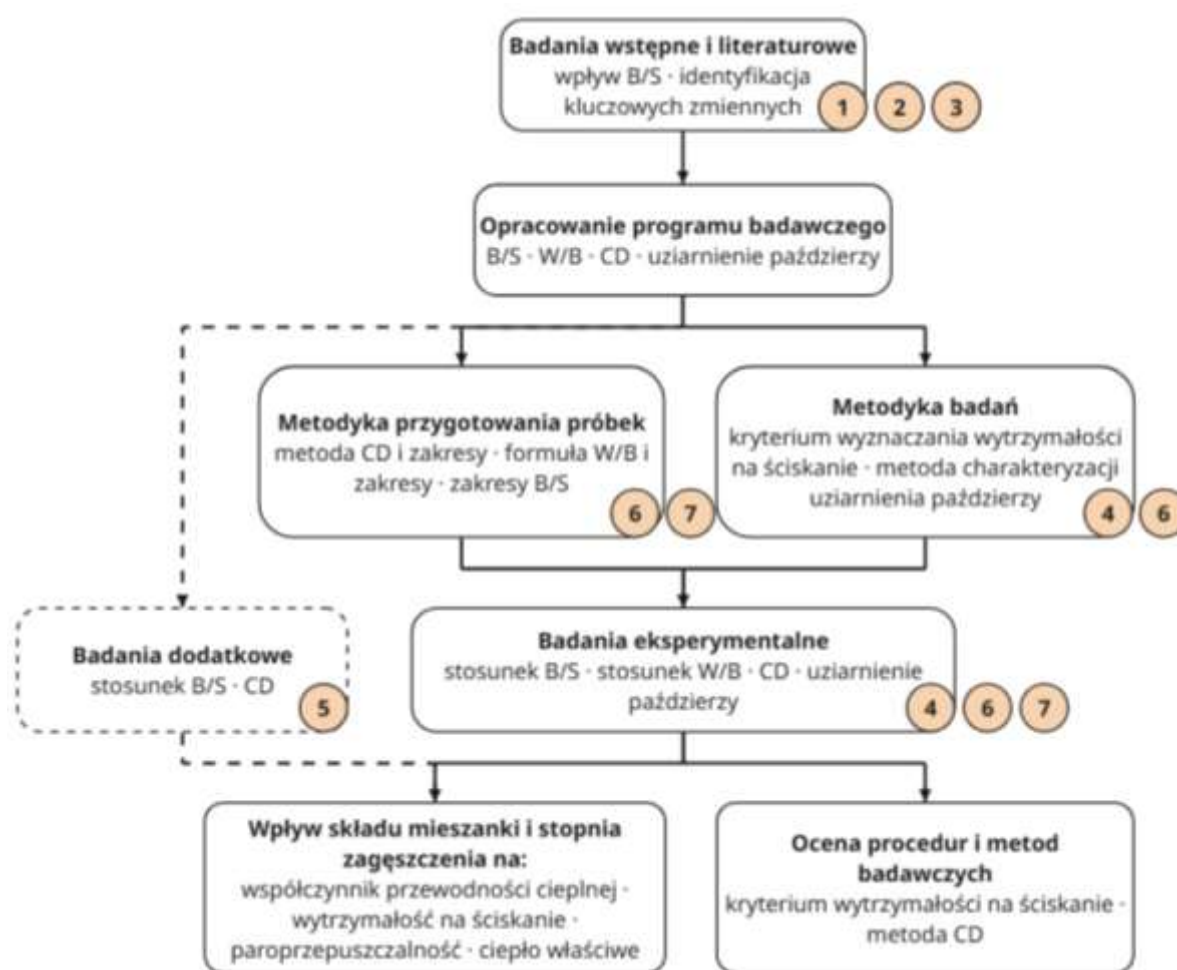
Zmienna	Symbol	Poziomy	Publikacje
Stosunek spoiwa do paździerzy	B/S	1:1, 2:1, 3:1	Publikacja [1], [4], [7]
Stosunek wody do spoiwa	W/B	Trzy poziomy według wzoru	Publikacja [7]
Stopień zagęszczenia	CD	150%, 170%, 190%	Publikacja [6], [7]
Uziarnienie paździerzy	-	Trzy frakcje (F-drobna, M-średnia, C-gruba)	Publikacja [4]

Tabela 3. Zmienne badawcze w badaniach dodatkowych (publikacja [5]).

Zmienna	Poziomy	Uwagi
Stosunek spoiwa do paździerzy	1:1, 1:1,8, 1:2,25	Proporcje przyjęte według oficjalnych zaleceń producenta
Stopień zagęszczenia	Przyrost gęstości świeżej mieszanki co 30 kg/m ³	Metoda CD nie była stosowana

Obok badań wpływu zmiennych na właściwości kompozytu, istotnym elementem programu badawczego było opracowanie i weryfikacja narzędzi metodycznych (Rysunek). Podczas przeglądu literatury zidentyfikowano znaczną różnorodność metod wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego. W trakcie badań własnych, w publikacji [5], dostrzeżono trudność w zastosowaniu jednej metody do wszystkich przypadków składu mieszanki, co skłoniło

do zaproponowania nowego podejścia. Podejście to zestawiono z istniejącymi metodami w publikacji [6], a jego weryfikację w szerszym zakresie składów przeprowadzono w publikacji [7]. Opis przyjętej metody wyznaczania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w rozdziale 5.5. Ponadto w ramach programu badawczego zweryfikowano skuteczność analizy obrazu jako narzędzia do charakteryzacji uziarnienia paździerzy konopnych oraz opracowano obiektywną metodę określania stopnia zagęszczenia mieszanki, opisane odpowiednio w rozdziałach 5.2 i 5.3.



Rysunek 15. Schemat programu badawczego z zaznaczeniem powiązań między etapami badań a poszczególnymi publikacjami; ○ - numer publikacji.

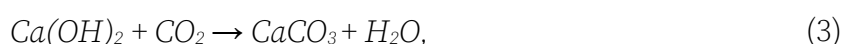
5.2. Materiały wykorzystywane w badaniach

5.2.1. Spoiwo

Główne spoiwo zastosowane w programie badawczym stanowi hybrydowy układ trójskładnikowy, opracowany na podstawie analizy literatury (Arnaud &

Gourlay, 2012; Collet & Pretot, 2014; Delannoy et al., 2018; Dhakal et al., 2017; Elfordy et al., 2008; Kinnane et al., 2016; Sinka et al., 2018; Walker et al., 2014; Walker & Pavia, 2014) oraz badań wstępnych (publikacja [1], publikacja [2]). W jego skład wchodzi: wapno hydratyzowane klasy CL 90S (Piotrowice Sp. z o.o., Zawichost, Polska), cement portlandzki klasy CEM I 42,5R (Holcim S.A., Małogoszcz, Polska) oraz metakaolin typu L05 (Mikrosilika Trade, Warszawa, Polska) w proporcjach wagowych 75:15:10.

Podstawowym składnikiem spoiwa jest wapno hydratyzowane. Jego twardnienie przebiega dwuetapowo: w pierwszej kolejności zachodzi hydratacja tlenku wapnia (Równanie 2), a następnie stopniowa karbonatyzacja wodorotlenku wapnia pod wpływem dwutlenku węgla atmosferycznego w obecności wilgoci (Równanie 3).

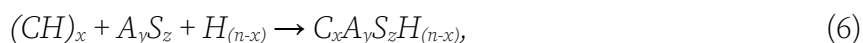


Jak wspomniano we wstępie stosowanie wyłącznie wapna hydratyzowanego wiąże się z powolnym przyrostem wytrzymałości mechanicznej, co utrudnia proces technologiczny. W celu poprawy wczesnej wytrzymałości na ściskanie zastosowano dodatek cementu portlandzkiego. W wyniku hydratacji i hydrolizy krzemianów wapnia (alitu i belitu) cement tworzy fazy C-S-H oraz portlandyt, które odpowiadają za wczesnofazowe usztywnienie matrycy (Równanie 4, 5). Udział cementu ustalono na poziomie 15% (wagowo). W literaturze jego zawartości stosuje się od 2,7 do 23% aby uzyskać efekt przyspieszonego wiązania bez zbytniego uszczelnienia matrycy, które mogłoby obniżyć znacznie paroprzepuszczalność kompozytu wapienno-konopnego.



Metakaolin reaguje z wodorotlenkiem wapnia wydzielanym zarówno przez wapno hydratyzowane, jak i w wyniku hydratacji cementu, tworząc dodatkowe fazy wiążące: krzemian wapnia hydratyzowany C-S-H o niskim stosunku Ca/Si oraz glinokrzemian

wapnia hydratyzowany C-A-S-H (Równanie 6):



Łączne działanie opisanych mechanizmów: karbonatyzacyjnego, hydraulicznego i pucolanowego prowadzi do ciągłego i wielofazowego przyrostu wytrzymałości matrycy. Szczegółowy skład chemiczny poszczególnych składników spoiwa zestawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Skład chemiczny (wyrażony przez tlenki) spoiw zastosowanych w badaniach według deklaracji producentów.

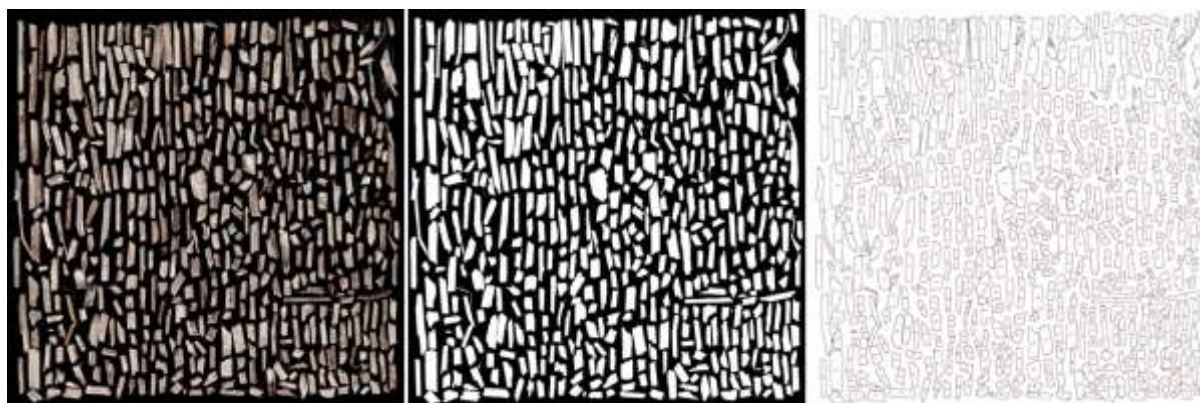
Związek chemiczny	Wapno hydratyzowane CL 90S	Cement portlandzki CEM I 42,5R	Metakaolin L05
CaO + MgO	≥90%	-	-
MgO	≤1,2%	0,5-4%	0,18%
CO ₂	≤3,5%	-	-
SO ₃	≤1%	1,5-3,5%	-
CaO	-	60-67%	0,13%
SiO ₂	-	17-25%	54,1%
Al ₂ O ₃	-	3-8%	40,1%
Fe ₂ O ₃	-	1-6%	1,1%
Na ₂ O	-	0,1-1,0	-
K ₂ O	-	0,3-1,3%	0,8%
TiO ₂	-	-	1,8%

W celu odniesienia wyników do szerszego kontekstu literaturowego, w ramach badań dodatkowych zastosowano również dedykowane spoiwo komercyjne. W publikacji [5] zastosowano wapno formułowane klasy FL A 3.5 zgodne z normą EN 459-1:2015, zawierające 75% wapna powietrznego i 25% spoiwa hydraulicznego.

5.2.2 Paździerze konopne

W programie badawczym skupiono się na zastosowaniu paździerzy konopnych możliwie jak najbardziej lokalnych. Z tego powodu zdecydowano się zastosować paździerze konopne od polskiego producenta (Podlaskie Konopie, Dobrzyniówka). Zbiór słomy odbył się w 2023 roku, a proces dekortykacji był poprzedzony naturalnym rośnieniem na polu. Ważnym aspektem, o którym wspomniano w publikacji [3], było to, że materiał podczas całego programu badawczego pochodził z tego samego roku produkcji i tej samej odmiany, aby zniwelować różnice związane ze składem chemicznym, które mogą wystąpić ze względu na organiczny charakter kruszywa.

Aby uzyskać różnorodność uziarnienia, paździerze konopne przesiano mechanicznie na sitach, otrzymując trzy frakcje: droбноziarnistą (F), średnioziarnistą (M) oraz gruboziarnistą (C). Ze względu na specyficzny kształt cząstek ich rozmiar określono przy pomocy analizy obrazowej z wykorzystaniem programu ImageJ (Rysunek).



Rysunek 16. Proces przygotowywania obrazu uziarnienia do analizy przy pomocy programu ImageJ.

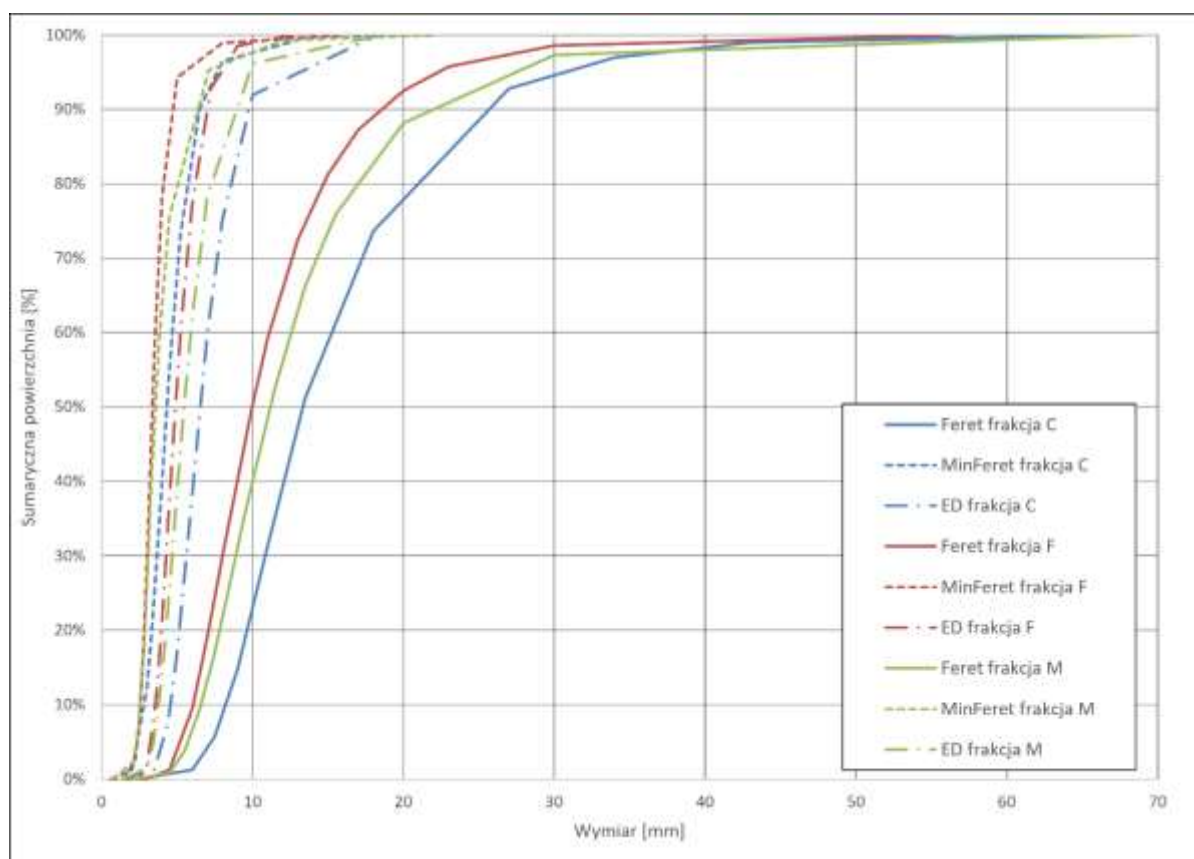
Wytyczne Komitetu Technicznego RILEM dotyczące charakteryzacji bio-kruszyw metodą analizy obrazowej rekomendują próbkę o masie 3–6 g, co powinno

odpowiadać minimum 2000 cząstek (Amziane et al., 2017). W ramach publikacji [4] zweryfikowano tę rekomendację dla stosowanych paździerzy, porównując wyniki analizy próbek o masach 3 g, 15 g i 96 g pod kątem dokładności odwzorowania rozkładu uziarnienia. W przypadku stosowanych paździerzy próbka 3 g zawierała jedynie ok. 500 cząstek, co wskazuje na znacznie grubsze frakcje niż te dla których opracowano wytyczne RILEM.

Analiza obrazowa pozwoliła na precyzyjne scharakteryzowanie kształtu i rozmiaru cząstek przy użyciu następujących parametrów: maksymalna i minimalna przekątna Fereta, średnica równoważna, powierzchnia, krągłość oraz wydłużenie. Szczegółowy opis metody przedstawiono w publikacji [4]. Wszystkie obrazy ze skanów zostały publicznie udostępnione w repozytorium Zenodo ((Narloch et al., 2025)) w celu zapewnienia transparentności i możliwości weryfikacji wyników. Dodatkowo zbadano wilgotność kruszywa, która wynosiła 12–16% oraz gęstość objętościową. Frakcje zastosowano w publikacjach [4], [6] i [7], a charakterystykę otrzymanych grup kruszywa przedstawiono w Tabeli 5 i Rysunku 17.

Tabela 5. Charakterystyka grup paździerzy użytych w programie badawczym.

Frakcja paździerzy konopnych	Gęstość nasypowa [kg/m ³]	Średnia przekątna Feret' a [mm]	Średnia minimalna przekątna Feret' a [mm]	Średnia średnica równoważna [mm]	Średnia powierzchnia [mm ²]	Średnia krągłość [-]	Średnie wydłużenie [-]
Drobnoziarniste (F)	108.6	9.26	3.15	4.47	21.33	0.48	3.09
Średnioziarniste (M)	103.8	10.02	3.42	4.83	25.52	0.49	3.10
Gruboziarniste (C)	97.5	12.34	4.01	5.79	36.49	0.45	3.33



Rysunek 17. Rozkład uziarnienia poszczególnych grup paździerzy konopnych. Feret - przekątna Feret’a, MinFeret - minimalna przekątna Feret’a, ED - średnica równoważna.

W publikacji [1] wykorzystano paździerze konopne od tego samego wytwórcy, jednak bez podziału na frakcje - zastosowano materiał bezpośrednio od producenta. W publikacji [5] zastosowano paździerze konopne od zagranicznego dostawcy europejskiego (*Chanvribat Shives*, n.d.).

5.2.3. Woda

W badaniach wstępnych (publikacja [1]) ilość wody wyznaczono na podstawie danych literaturowych dla spoiw o zbliżonym składzie. W badaniach uzupełniających (publikacja [5]) proporcja wody wynikała z zaleceń producenta spoiwa dla konkretnego składu mieszanki. W głównym programie badawczym w celu wyznaczenia optymalnej ilości wody dla zastosowanego składu spoiwa zebrano dane literaturowe dotyczące zapotrzebowania na wodę dla kompozytów o zbliżonych składach spoiwa i różnych proporcjach B/S. Do zebranych danych dopasowano

krzywą metodą najmniejszych kwadratów, uzyskując empiryczny wzór opisujący zależność między proporcjami składników mieszanki a optymalnym zapotrzebowaniem na wodę (Równanie 7):

$$W_B = 1.95 \cdot B_S^{-0.51} \quad (7)$$

Gdzie:

W_B – stosunek wody do spoiwa (W/B);

B_S – stosunek spoiwa do paździerzy (B/S).

Wzór opisuje zależność między proporcjami składników a optymalnym zapotrzebowaniem na wodę w całym zakresie badanych proporcji B/S. W publikacji [7], w której szczegółowo zbadano wpływ stosunku wody do spoiwa, przyjęto trzy poziomy W/B z krokiem 0,2: wartość optymalną wyznaczoną ze wzoru oraz wartości o 0,2 niższą i wyższą.

5.3. Przygotowywanie próbek

Proces przygotowywania próbek był zaprojektowany tak, aby możliwie wiernie odzwierciedlać warunki metody szalunkowej stosowanej w praktyce budowlanej. Mieszanie składników odbywało się przy użyciu betoniarki planetarnej z pionową osią obrotu o pojemności 150 litrów. W pierwszej kolejności mieszano ze sobą suche składniki spoiwa, następnie dodawano wodę i mieszano do uzyskania jednorodnej zawiesiny. Kolejnym etapem było stopniowe dosypywanie paździerzy, tak aby równomiernie pokryły się spoiwem i całość stała się homogeniczna.

Gotową mieszankę układano w formach, dbając o zachowanie założonego stopnia zagęszczenia. W badaniach wstępnych (publikacja [1]) zagęszczenie określano wyłącznie na podstawie praktyki budowlanej, bez zastosowania obiektywnej metody pomiarowej. Problem ten nie jest odosobniony, gdyż w literaturze stopień zagęszczenia jest rzadko precyzyjnie raportowany, mimo udokumentowanego wpływu na właściwości kompozytu. Dostrzeżenie tych ograniczeń stało się impulsem do opracowania w ramach programu badawczego powtarzalnej metody jego określania. Metoda ta polega na wyznaczeniu gęstości tzw. „luźnego zasypu”.

Odbywało się to przez ułożenie mieszanki luzem w formie o stałych wymiarach i jej zważeniu. Zakładając określony stopień zagęszczenia obliczano masę materiału, którą należy umieścić w formie o określonej objętości. Stopień zagęszczenia można opisać jako stosunek gęstości (Równanie 8):

$$CD [\%] = (\rho_C / \rho_L) \cdot 100 \quad (8)$$

gdzie:

ρ_C – gęstość świeżej próbki po zagęszczeniu [kg/m^3]

ρ_L – gęstość “luźnego zasypu” [kg/m^3]

Ubijanie materiału odbywało się w warstwach o grubości 7,5 cm przy użyciu drewnianych ubijaków o powierzchni zbliżonej do powierzchni próbki. Dodatkowo rejestrowano liczbę swobodnych uderzeń ubijaka dla każdej warstwy, co przedstawiono w publikacji [7]. Do badania wpływu zagęszczenia na właściwości kompozytu przyjęto trzy poziomy: 150%, 170% i 190%, których wpływ na wytrzymałość na ściskanie i przewodność cieplną określono w publikacjach [6] i [7]. W publikacjach [4], [6] i [7] stosowano już wypracowaną metodę zagęszczania. W badaniach dodatkowych (publikacja [5]) zagęszczenie było kontrolowane przez przyrostową zmianę gęstości świeżej mieszanki co 30 kg/m^3 , bez zastosowania metody CD.

Próbki rozformowywano po 24 godzinach, a następnie sezonowano w komorze klimatycznej w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $60 \pm 10\%$ aż do badania. Próbki przeznaczone do badań wytrzymałości na ściskanie badano po 28 dniach, natomiast przewodność cieplną wyznaczano średnio po 120 dniach. Serie do wytrzymałości na ściskanie wynosiły minimum 5 próbek, a do przewodności cieplnej minimum 3.

5.4. Badania właściwości fizycznych

5.4.1. Badanie współczynnika przewodności cieplnej

Współczynnik przewodzenia ciepła został wyznaczony przy użyciu aparatu płytowego FOX 314 (TA Instruments, New Castle, DE, USA) w Laboratorium Fizyki Budowli na Wydziale Inżynierii Lądowej, z obszarem pomiarowym 10×10 cm. Metoda opiera się na zasadzie jednokierunkowego, jednorodnego i ustalonego przepływu ciepła, opisywanego przez jednowymiarowe prawo Fouriera (Równanie 9):

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

gdzie:

q – gęstość strumienia ciepła (W/m^2),

λ – współczynnik przewodzenia ciepła ($\text{W/m}\cdot\text{K}$),

dT/dx – gradient temperatury (K/m).

Próbki o wymiarach 30×30 cm i grubości 8 cm zostały umieszczone pomiędzy dwiema płytami o kontrolowanej temperaturze – ogrzewaną płytą dolną i chłodzoną płytą górną - przy różnicy temperatur 20 K i średniej temperaturze próbki wynoszącej 20°C , zgodnie z normą EN 12667. Przepływ ciepła odbywał się pionowo, od dołu ku górze, w kierunku prostopadłym do kierunku zagęszczania próbki, co odzwierciedla rzeczywiste warunki przepływu ciepła w ścianie i odpowiada metodzie szalunkowej. Wyjątek stanowiły próbki przeznaczone do zastosowań dachowych i podłogowych w publikacji [5], dla których kierunek przepływu ciepła był równoległy do kierunku formowania, co odpowiada rzeczywistym warunkom eksploatacji tych przegród. Tę metodę wyznaczania przewodności cieplnej zastosowano w całym programie badawczym tj. w publikacjach (1,4,5,7).

5.4.2. Badanie ciepła właściwego

Ciepło właściwe kompozytu wapienno-konopnego wyznaczono metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) przy użyciu aparatu DSC 404 F1 Pegasus (Netzsch), z szafirem amorficznym jako materiałem referencyjnym i argonem jako gazem osłonowym.

Próbki kompozytu rozdrabniano przy użyciu młyna udarowego, suszono w temperaturze 70°C przez 72 godziny, a następnie umieszczano w tyglach DSC. Dla każdego rodzaju mieszanki przygotowano 5 próbek o masie ok. 16–18 mg. Pomiary prowadzono w zakresie temperatur 30–70°C w trzech cyklach grzania i chłodzenia z prędkością 2 K/min, a dane do wyznaczenia ciepła właściwego pobrano z ostatniego cyklu grzania. Dokładność pomiaru zweryfikowano na próbce referencyjnej szafiru — maksymalna odchyłka nie przekroczyła 1,5%. Badania ciepła właściwego przeprowadzono w publikacji [5].

5.4.3. Badanie paroprzepuszczalności

Paroprzepuszczalność kompozytu wapienno-konopnego wyznaczono metodą kubelkową (ang. Cup method), zgodnie z normą EN 12086 w publikacji [1] oraz EN ISO 12572:2016 w publikacji [5]. Badania przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 12,8 cm i wysokości 6 cm (publikacja [1]) lub 5 i 8 cm (publikacja [5]), umieszczonych na naczyniach wypełnionych chlorkiem wapnia (CaCl_2) jako pochłaniaczem wilgoci. Próbki kondycjonowano przed badaniem do stabilizacji masy, a następnie umieszczano w komorze klimatycznej w temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%. Zmiany masy mierzono w odstępach 1–3 dni, a badanie kończono gdy pięć kolejnych zmian masy mieściło się w tolerancji $\pm 5\%$ średniej. Współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej μ wyznaczono jako stosunek paroprzepuszczalności powietrza ($\delta a = 720 \cdot 10^{-6} \text{ g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$) do paroprzepuszczalności materiału.

5.5. Badania właściwości mechanicznych

5.5.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie wyznaczano w niszczących próbach ściskania. W badaniach wstępnych (publikacja [1]) wykorzystano maszynę wytrzymałościową umożliwiającą stopniowe przykładanie obciążenia z przyrostem 1,5 kN/min oraz odczyt naprężenia dla kolejnych poziomów odkształcenia (5%, 10%, 15% i 20%), jednak bez rejestracji pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie. Zastosowano próbki sześciennie o boku 10 cm.

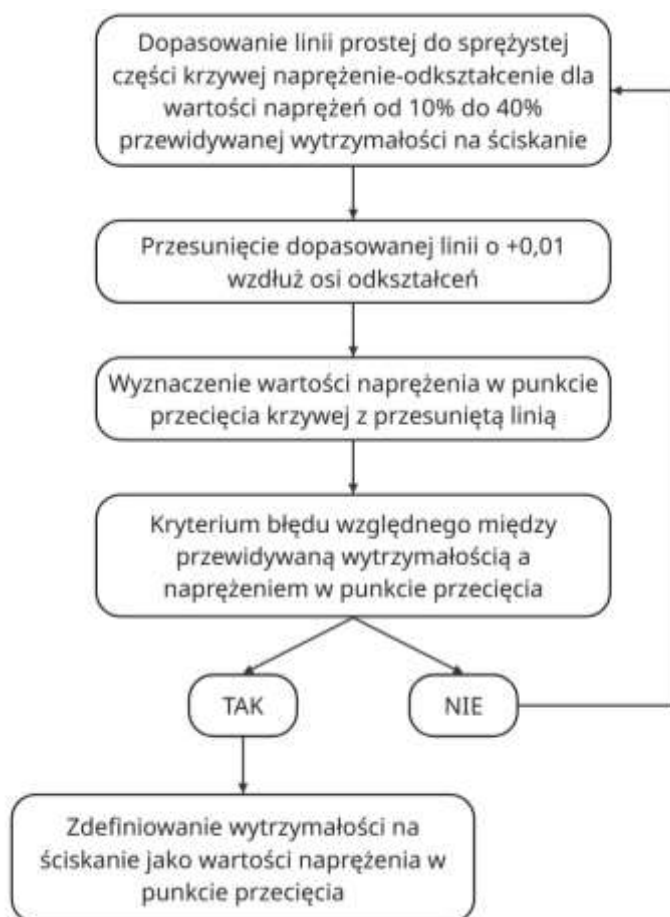
W kolejnych publikacjach [5], [6] i [7] badania przeprowadzono na maszynie

wytrzymałościowej Instron 3382 (maksymalna siła 100 kN), umożliwiającej rejestrację pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie w czasie rzeczywistym przy użyciu oprogramowania Instron Bluehill. Zdecydowano się na próbki sześciennie o boku 15 cm, ze względu na długość cząstek paździerzy konopnych, która mogłaby wpływać na reprezentatywność w przypadku mniejszych próbek. Próbki ściskano przy stałej prędkości przesuwu głowicy 5 mm/min. Na każdej próbce umieszczono stalową płytkę o grubości 8 mm zapewniającą równomierny kontakt z głowicą. Przed każdą próbą przykładano wstępne obciążenie ok. 0,02 kN, aby ograniczyć nierówności powstałe podczas ubijania powierzchni próbki. Próbę kończono po osiągnięciu odkształcenia 13,3% lub przy wyraźnym spadku naprężenia. We wszystkich badaniach próbki ściskano w kierunku równoległym do osi formowania, odpowiadającym rzeczywistemu kierunkowi przenoszenia obciążeń w technologii szalunkowej.

W trakcie realizacji programu badawczego dostrzeżono potrzebę ujednolicenia metody wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego. Stosowane podejście ewoluowało na kolejnych etapach badań, prowadząc do opracowania i weryfikacji nowego kryterium. W publikacji [1] przyjęto kryterium naprężenia przy 10% odkształceniu, zgodnie z podejściem analogicznym do normy EN 826. W publikacji [5] zastosowano różne kryteria w zależności od zachowania mechanicznego badanych serii: dla próbek serii F (podłogowa) wytrzymałość wyznaczono jako maksymalne zarejestrowane naprężenie, dla serii W (ścienna) zastosowano metodę redukcji sztywności, w której za wytrzymałość przyjmuje się naprężenie w punkcie, gdzie chwilowa sztywność spada do 25% swojej wartości maksymalnej wyznaczonej na podstawie dwudziestopunktowej średniej kroczącej, natomiast dla serii R (dachowa) przyjęto naprężenie przy 5% odkształceniu jako granicę stanu użytkowalności. Dodatkowo dla wszystkich serii wyznaczono naprężenie przy 5% odkształceniu w celu umożliwienia porównania wyników.

W publikacji [6] przeprowadzono systematyczne porównanie metod wyznaczania wytrzymałości na ściskanie stosowanych w literaturze, w tym metod zastosowanych we wcześniejszych etapach programu badawczego. Na tej podstawie zaproponowano nowe podejście oparte na adaptacji procedury z normy EN 408,

definiujące wytrzymałość jako naprężenie odpowiadające 1% trwałemu odkształceniu materiału, które okazało się najbardziej uniwersalne spośród analizowanych metod. Wybór kryterium 1% trwałego odkształcenia wynika z założenia, że kompozyt wapienno-konopny współpracuje z elementami drewnianymi konstrukcji, gdzie trwałe odkształcenie definiuje się jako nieodwracalne odkształcenie pozostające po odciążeniu. Metoda polega na wstępnym oszacowaniu oczekiwanej wytrzymałości każdej próbki, dopasowaniu linii trendu metodą najmniejszych kwadratów do sprężystej części krzywej naprężenie-odkształcenie (do 40% szacowanej wytrzymałości), a następnie przesunięciu tej linii o 1% wzdłuż osi odkształceń. Punkt przecięcia przesuniętej linii z krzywą doświadczalną przyjmowany jest jako wytrzymałość kompozytu. Schematyczne przedstawienie metody pokazano na Rysunku 18.



Rysunek 18. Schemat procedury wyznaczania wytrzymałości na ściskanie metodą zaproponowaną w publikacji [6].

W publikacji [7] zweryfikowano stosowalność tej metody w szerszym zakresie składów

mieszanki, identyfikując jednocześnie przypadki, w których bardziej odpowiednie okazało się kryterium naprężenia przy 5% odkształceniu. Szczegółowe omówienie wyników tej analizy przedstawiono w rozdziale 6.

W większości badań przyjęto 28-dniowy czas sezonowania jako standardowy punkt odniesienia stosowany zarówno w badaniach betonów i zapraw cementowych, jak i w większości badań nad kompozytami wapienno-konopnymi, co umożliwia porównywanie wyników między badaniami (Bardouh et al., 2024). W publikacji [5] próbki do badań wytrzymałości sezonowano przez 90 dni zgodnie z wytycznymi producenta spoiwa. Ze względu na powolną karbonatyzację spoiwa wapiennego wytrzymałość kompozytu wzrasta przez wiele miesięcy po wyprodukowaniu, a wyniki po 28 dniach stanowią wartości zachowawcze. Rzeczywista wytrzymałość materiału w konstrukcji będzie wyższa, co jest korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa projektowania.

6. Synteza wyników badań

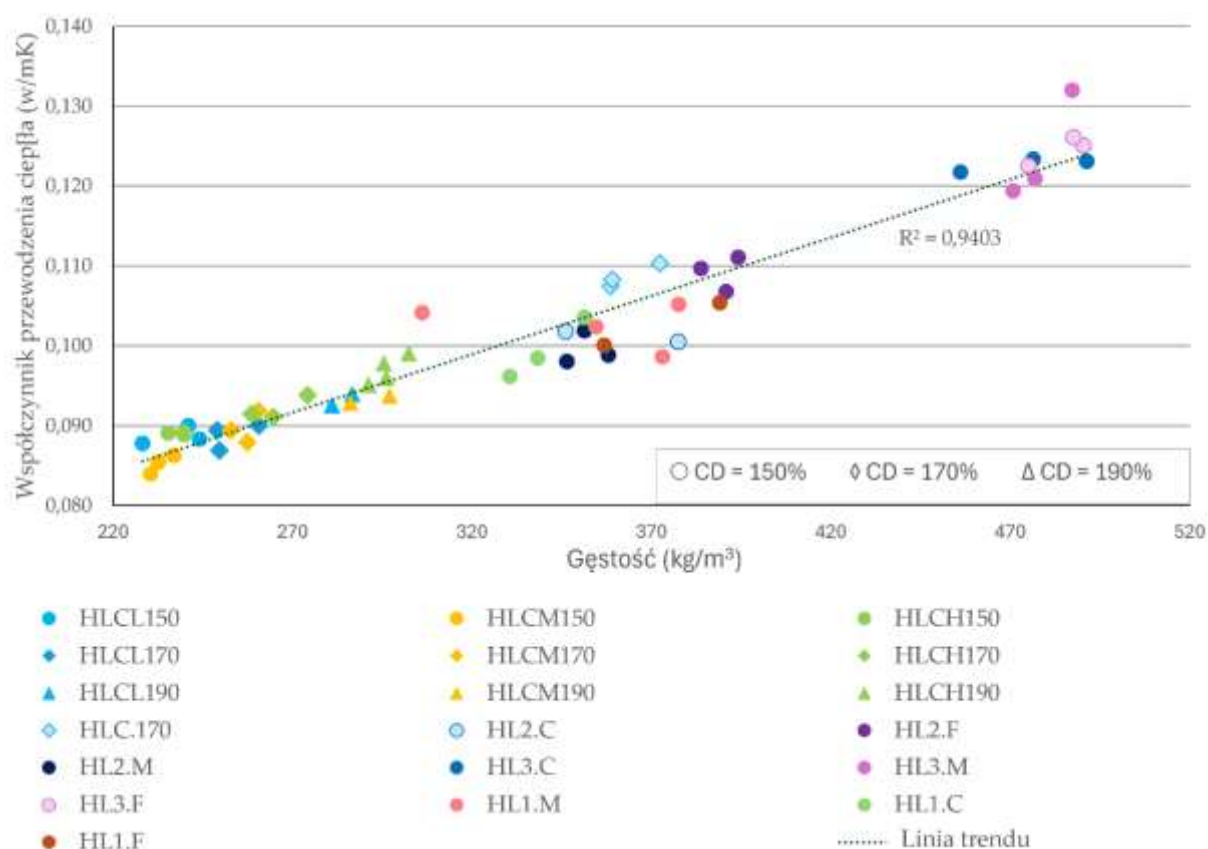
Niniejszy rozdział przedstawia syntezę wyników uzyskanych w ramach programu badawczego. Wyniki omówiono w odniesieniu do dwóch głównych celów pracy: określenia wpływu składu mieszanki i stopnia zagęszczenia na właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego oraz zaproponowania nowego kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie.

6.1 Wpływ składu mieszanki na właściwości kompozytu wapienno-konopnego

6.1.1 Wpływ stosunku spoiwa do paździerzy (B/S)

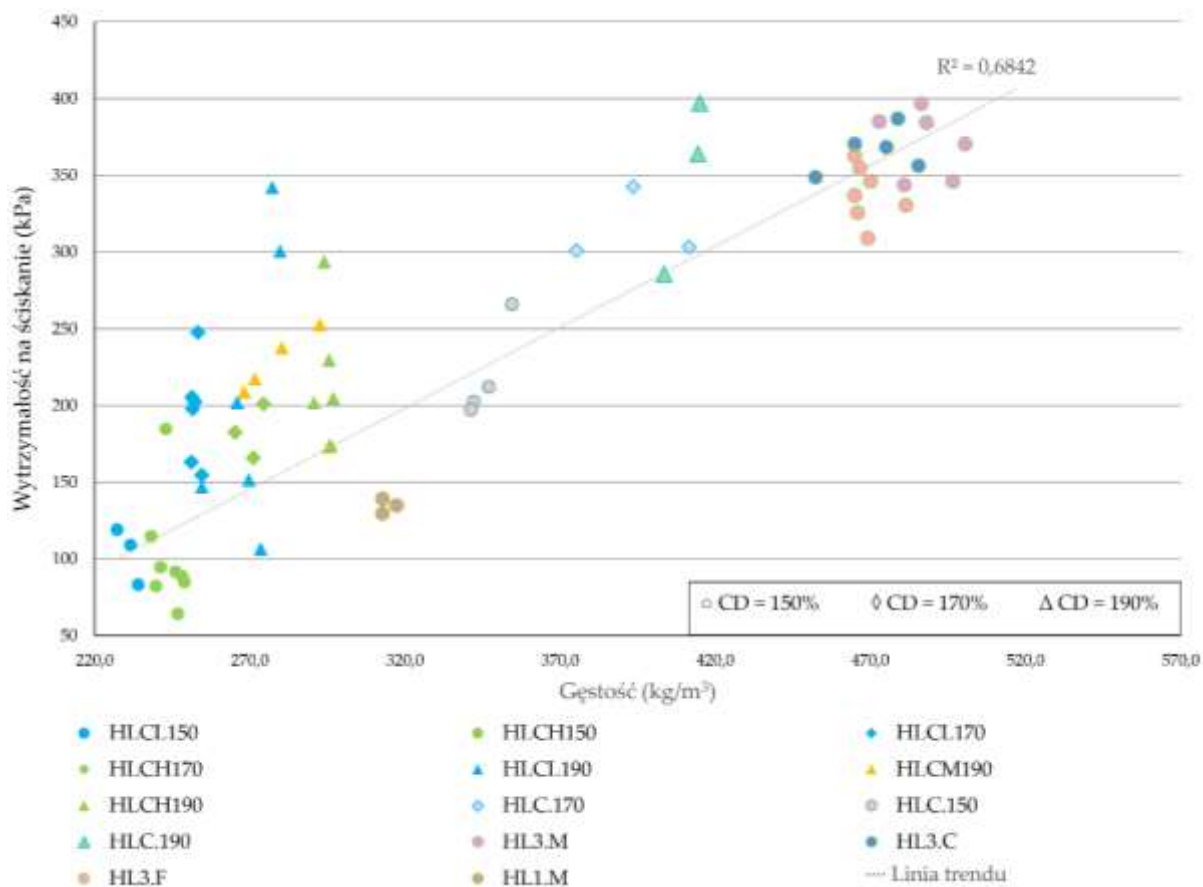
Spośród badanych zmiennych stosunek spoiwa do paździerzy wykazał największy wpływ na właściwości kompozytu wapienno-konopnego we wszystkich badanych seriach programu badawczego. Jego wpływ realizuje się przede wszystkim poprzez gęstość objętościową materiału: wzrost proporcji B/S prowadzi do zwiększenia udziału spoiwa w jednostce objętości kompozytu, co skutkuje wzrostem gęstości. Zależność ta ma charakter liniowy i została potwierdzona we wszystkich badanych seriach (publikacje [1], [4], [5], [7]).

Przewodność cieplna wzrasta wraz z gęstością i proporcją B/S. W zakresie badanych składów osiągnęła wartości od 0,067 W/(m·K) dla serii o najniższej gęstości (seria R, publikacja [5]) do 0,134 W/(m·K) dla serii o najwyższej gęstości (seria F, publikacja [5]). Analiza rozszerzonego zbioru danych z publikacji [4], [6] i [7] wykazała silną liniową zależność między przewodnością cieplną a gęstością objętościową ($R^2 = 0,9403$, $n = 55$) (Rysunek 19).



Rysunek 19. Przewodność cieplna kompozytu wapienno-konopnego w funkcji gęstości objętościowej. Zestawienie wyników z programu badawczego.

Wytrzymałość na ściskanie wykazuje analogiczną zależność od gęstości, jednak z większym rozrzutem ($R^2 = 0,68$, $n = 68$), co wynika ze zróżnicowanego charakteru mechanicznego kompozytu w zależności od proporcji B/S, omówionego szczegółowo w rozdziale 7.5. (Rysunek 20).



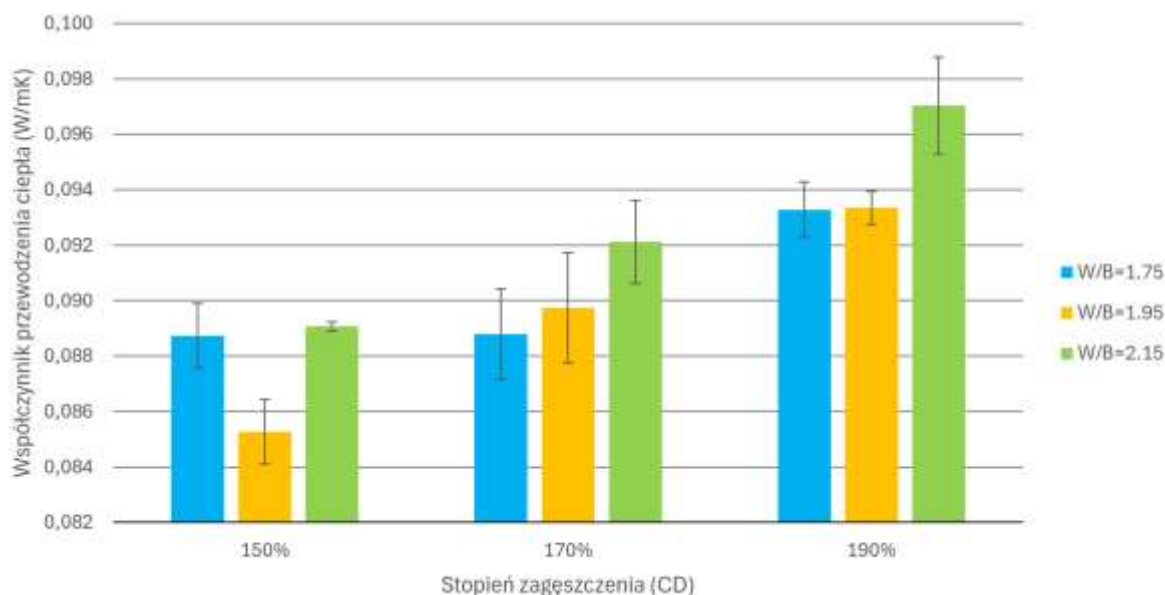
Rysunek 20. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego wyznaczona zaproponowaną metodą (1% trwałego odkształcenia) w funkcji gęstości objętościowej. Zestawienie wyników z programu badawczego (publikacja [7]).

Paroprzepuszczalność maleje wraz ze wzrostem gęstości i proporcji B/S. Współczynnik oporu dyfuzyjnego μ wzrastał od 3,6 dla serii dachowej (R) do 10,1 dla serii podłogowej (F), przy zależności bliskiej wykładniczej ($R^2 = 0,99$ dla połączonych serii R i F). Skład spoiwa nie wykazał istotnego wpływu na paroprzepuszczalność przy tej samej gęstości materiału (publikacja [1]).

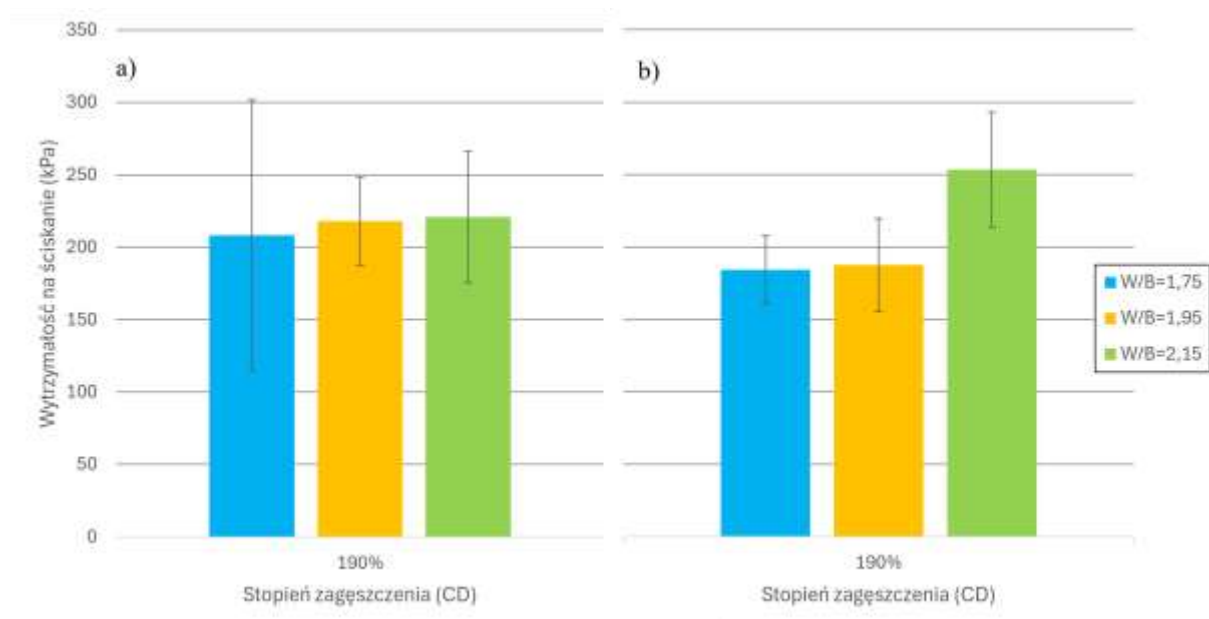
Ciepło właściwe zbadane w publikacji [5] wykazało zmienność w funkcji składu i temperatury. Po ekstrapolacji do 20°C uzyskano wartości 0,629, 0,710 i 0,729 J/(g·K) dla serii R, W i F, mieszczące się w dolnym zakresie danych literaturowych. Kluczowym odkryciem było niskie ciepło właściwe samych paździerzy konopnych, co może wyjaśniać rozbieżności w danych literaturowych dotyczących tej właściwości.

6.1.2. Wpływ stosunku wody do spoiwa (W/B)

Wpływ stosunku wody do spoiwa zbadano w publikacji [7] przy B/S = 1:1 i trzech poziomach W/B (1,75; 1,95; 2,15). Zmienna ta wykazała marginalny wpływ na gęstość objętościową i przewodność cieplną, przy czym różnice między seriami często mieściły się w granicach niepewności pomiarowej (Rysunek). Wpływ W/B na wytrzymałość na ściskanie pozostał nierozstrzygnięty przy badanym B/S = 1:1 (Rysunek). Mechanizm działania tej zmiennej oraz perspektywy dalszych badań omówiono w rozdziale 7.2.



Rysunek 21. Średnia przewodność cieplna dla poszczególnych serii w zależności od stosunku wody do spoiwa (W/B), z podziałem według stopnia zagęszczenia.

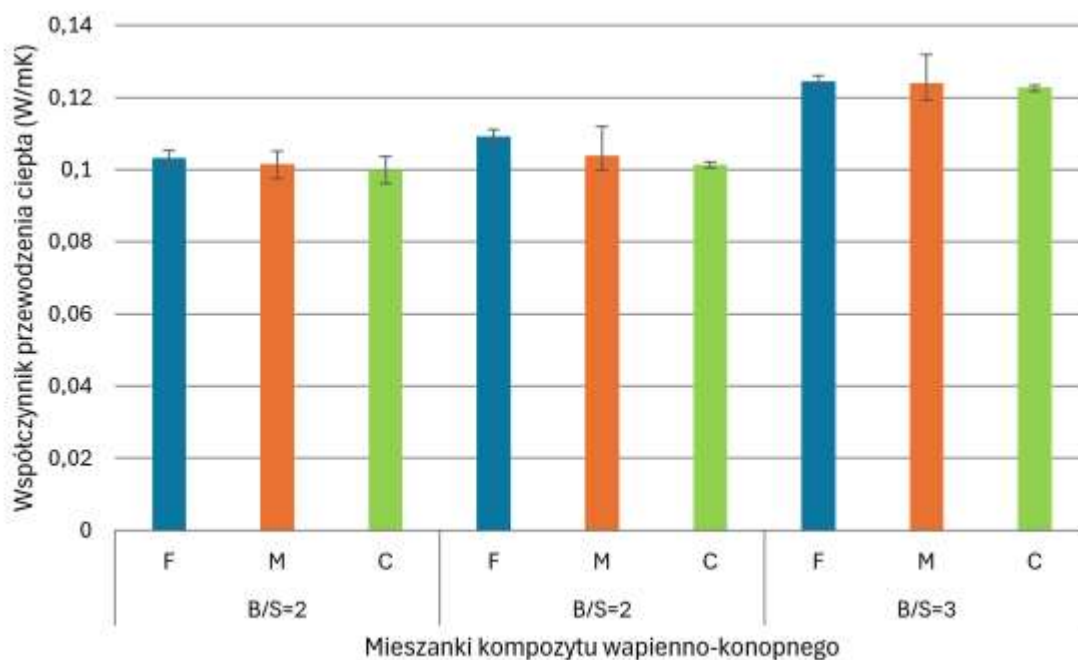


Rysunek 22. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stosunku wody do spoiwa (W/B) przy stopniu zagęszczenia 190%: (a) metoda 1% trwałego odkształcenia; (b) kryterium 5% odkształcenia.

6.1.3. Wpływ uziarnienia paździerzy

Wpływ uziarnienia paździerzy na przewodność cieplną zbadano w publikacji [4] przy trzech frakcjach (drobnej F, średniej M i grubej C) i dwóch proporcjach B/S. Zastosowanie grubszej frakcji skutkowało niższą gęstością kompozytu i odpowiednio niższą λ , przy całkowitej redukcji od frakcji drobnej do grubej wynoszącej ok. 7,6%. Efekt uziarnienia był wyraźnie mniejszy niż wpływ proporcji B/S (Rysunek). Nie zidentyfikowano natomiast systematycznego wpływu uziarnienia na wytrzymałość na ściskanie. Mechanizm tych zależności oraz ograniczenia metodyczne omówiono w rozdziale

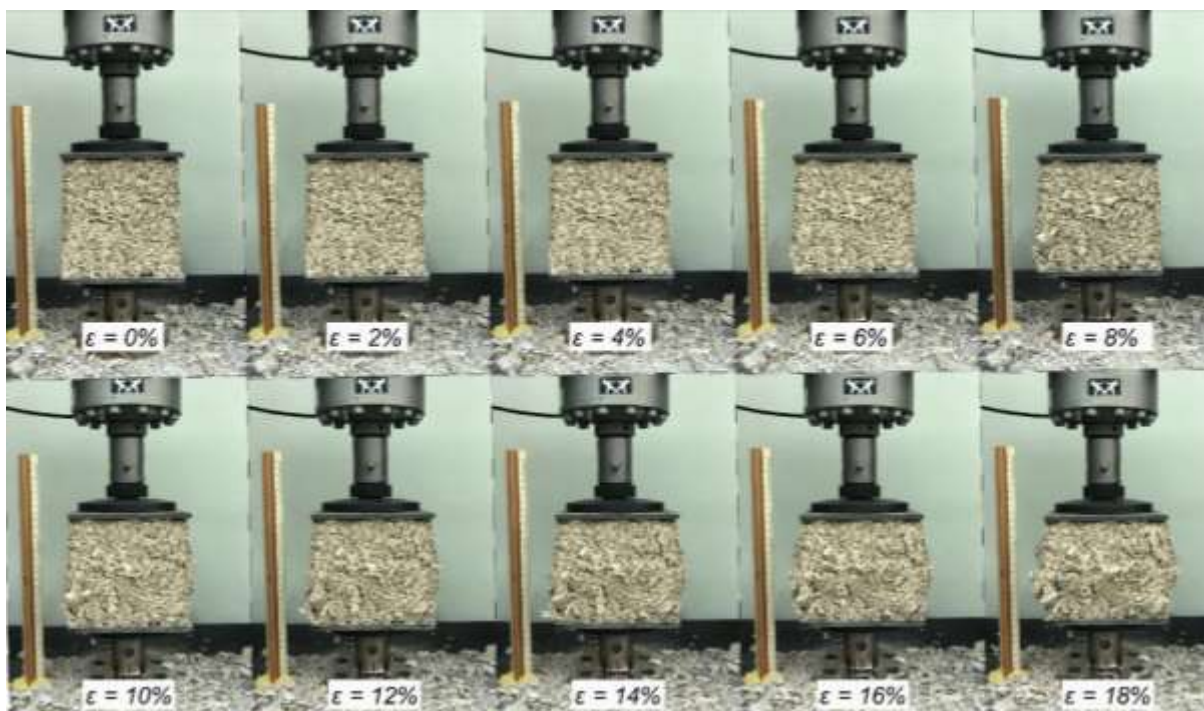
7.1.3.



Rysunek 23. Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytu wapienno-konopnego w funkcji uziarnienia paździerzy i stosunku spoiwa do paździerzy (B/S). F - frakcja drobnoziarnista, M - frakcja średnioziarnista, C - frakcja gruboziarnista.

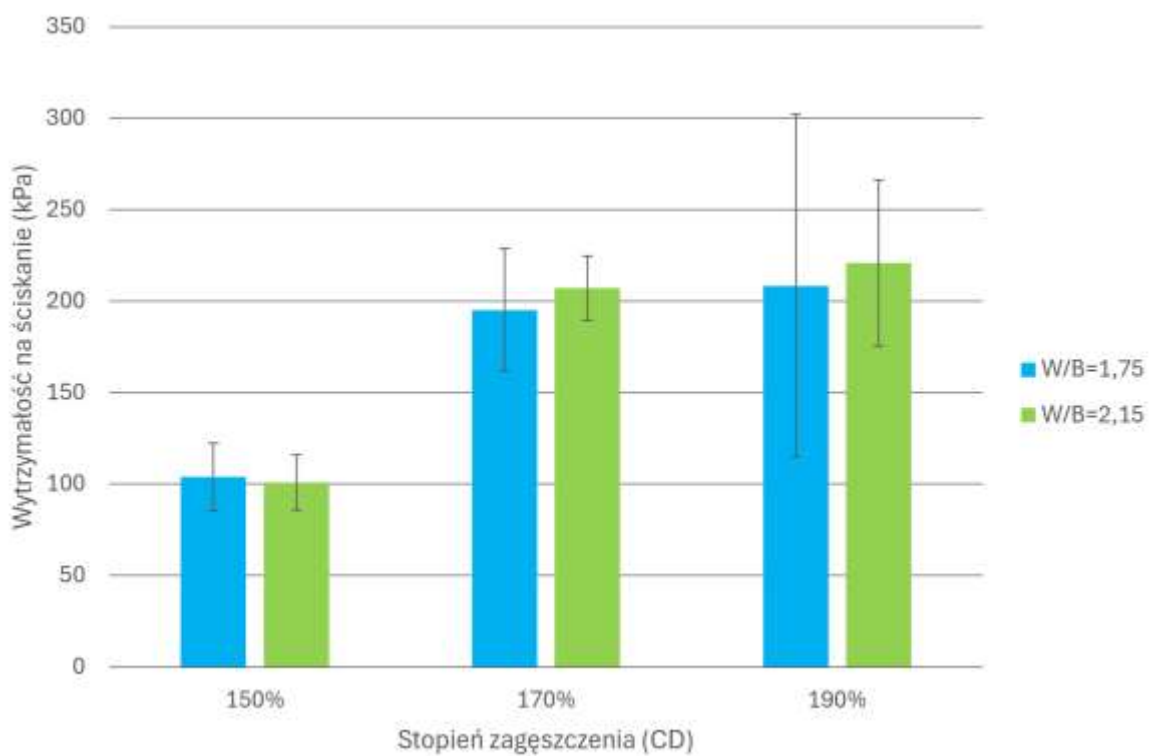
6.2 Wpływ stopnia zagęszczenia na właściwości kompozytu wapienno-konopnego

We wszystkich badanych seriach programu badawczego wzrost stopnia zagęszczenia prowadził do wzrostu gęstości objętościowej kompozytu. W publikacji [6], gdzie stosowano trzy poziomy CD przy B/S = 2:1, wzrost zagęszczenia o 20% i 40% względem poziomu minimalnego (CD = 150%) skutkował odpowiednio wzrostem gęstości o 13,6% i 18,7%, przy gęstościach 346,2, 393,4 i 411,0 kg/m³. Obserwacje wizualne podczas prób ściskania ujawniły charakterystyczne mechanizmy zniszczenia zależne od stopnia zagęszczenia. Próbkę o niższym zagęszczeniu (CD = 150%) wykazywały odspajanie większych skupisk -paździerzy i bardziej wyraźną degradację powierzchni, podczas gdy próbki o wyższym zagęszczeniu (CD = 190%) charakteryzowały się znacznie ograniczonym uszkodzeniem powierzchni. We wszystkich seriach odkształceniu towarzyszyło stopniowe wybrzuszenie boczne bez wyraźnej powierzchni zniszczenia typowej dla materiałów kruchych, a oderwane cząstki pozostawały częściowo połączone przez resztkowe mosty spoiwa (Rysunek 8).

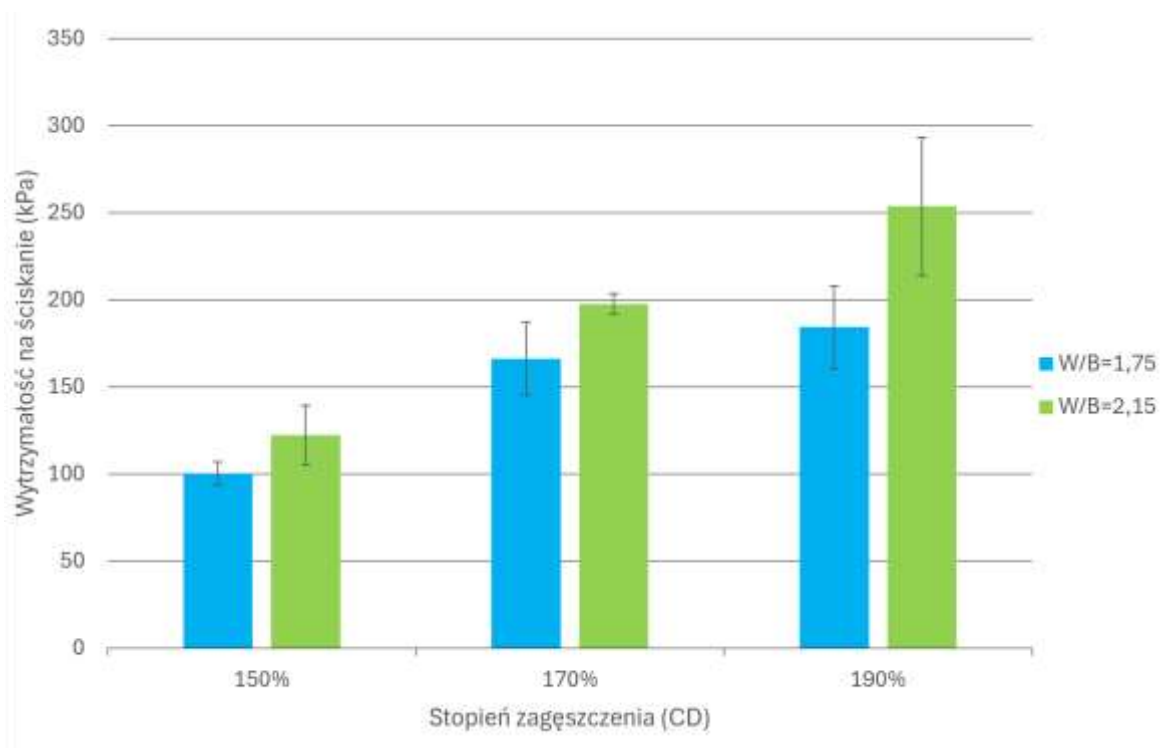


Rysunek 8. Progresja zniszczenia próbek kompozytu wapienno-konopnego podczas próby ściskania w odstępach co 2% odkształcenia (0–18%). Zdjęcia ilustrują charakterystyczne cechy zniszczenia: stopniowe wybrzuszenie boczne, postępujące odspajanie cząstek oraz powstawanie pęknięć wzdłuż ziaren kruszywa, przy maksymalnej koncentracji uszkodzeń w środkowej części próbki.

W publikacji [7] wykazano nieliniowy charakter wpływu zagęszczenia na wytrzymałość na ściskanie: przyrost wytrzymałości przy przejściu z $CD = 150\%$ do $CD = 170\%$ był ok. 6–9-krotnie większy niż przy przejściu z $CD = 170\%$ do $CD = 190\%$, co wskazuje na nasycenie efektu zagęszczenia powyżej $CD = 170\%$. Wzorzec ten był spójny we wszystkich badanych grupach W/B, choć dokładna skala różnic zależała od zastosowanej metody wyznaczania wytrzymałości (Rysunek 25 i 26).

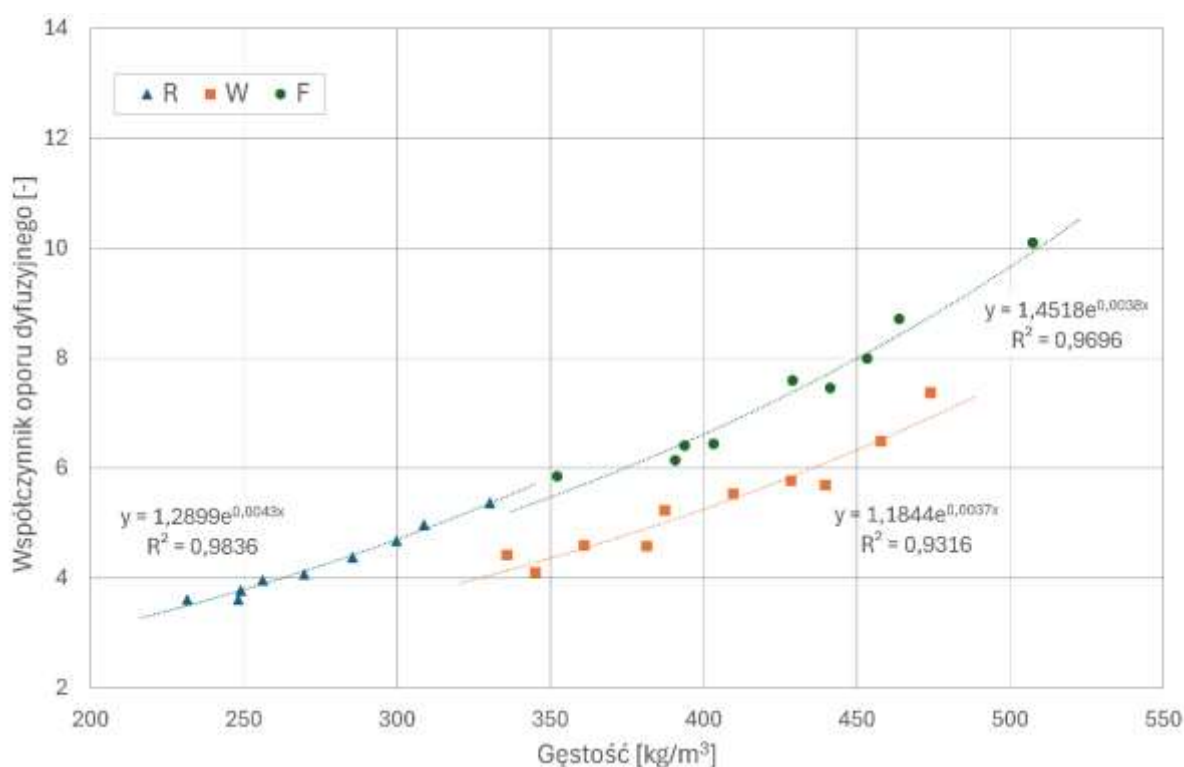


Rysunek 25. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stopnia zagęszczenia dla $W/B = 1,75$ i $W/B = 2,15$ według metody 1% trwałego odkształcenia.



Rysunek 26. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stopnia zagęszczenia dla $W/B = 1,75$ i $W/B = 2,15$ według kryterium 5% odkształcenia.

W publikacji [5], gdzie zagęszczenie kontrolowano przez przyrostową zmianę gęstości świeżej mieszanki, zaobserwowano że stopień zagęszczenia wywierał wyraźny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, przewodność cieplną oraz paroprzepuszczalność. Paroprzepuszczalność malała wraz ze wzrostem gęstości we wszystkich seriach przy zależności bliskiej wykładniczej (Rysunek 27). Serie dachowa (R) i podłogowa (F) tworzyły dobrze skorelowany trend wykładniczy ($R^2 = 0,99$), mimo znacznie różnych proporcji składników, co sugeruje gęstość objętościową jako główny parametr determinujący opór dyfuzyjny. Seria ścienna (W) wykazała niższy opór dyfuzyjny niż wynikałoby z tego trendu, co wyjaśniono bardziej heterogeniczną strukturą porów tej serii.



Rysunek 27. Współczynnik oporu dyfuzyjnego (μ) w funkcji gęstości objętościowej dla serii dachowej (R), ściennej (W) i podłogowej (F).

6.3 Kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie

Potrzeba ujednolicenia metody wyznaczania wytrzymałości ujawniła się już w publikacji [5], gdzie trzy serie o różnych proporcjach składników wykazały odmienne zachowanie mechaniczne, wymagające zastosowania różnych kryteriów. Seria podłogowa (F) o najwyższej zawartości spoiwa osiągała wyraźne maksimum

naprężenia na krzywej naprężenie-odkształcenie, co umożliwiałoby zastosowanie kryterium maksymalnego naprężenia. Seria ścienna (W) nie osiągała takiego maksimum, a naprężenia rosły mimo wyraźnego zniszczenia próbki i odkształceń przekraczających 10% - zastosowano tu metodę redukcji sztywności. Jednak ta sama metoda okazała się nieodpowiednia dla serii dachowej (R) o najniższej zawartości spoiwa: ze względu na łagodne nachylenie krzywej naprężenie-odkształcenie punkt redukcji sztywności przesunął się ku bardzo dużym odkształceniom, prowadząc do paradoksalnej sytuacji, w której seria o niższej gęstości wykazywała pozornie wyższą wytrzymałość niż seria W. Z tego powodu dla serii R przyjęto kryterium naprężenia przy 5% odkształceniu.

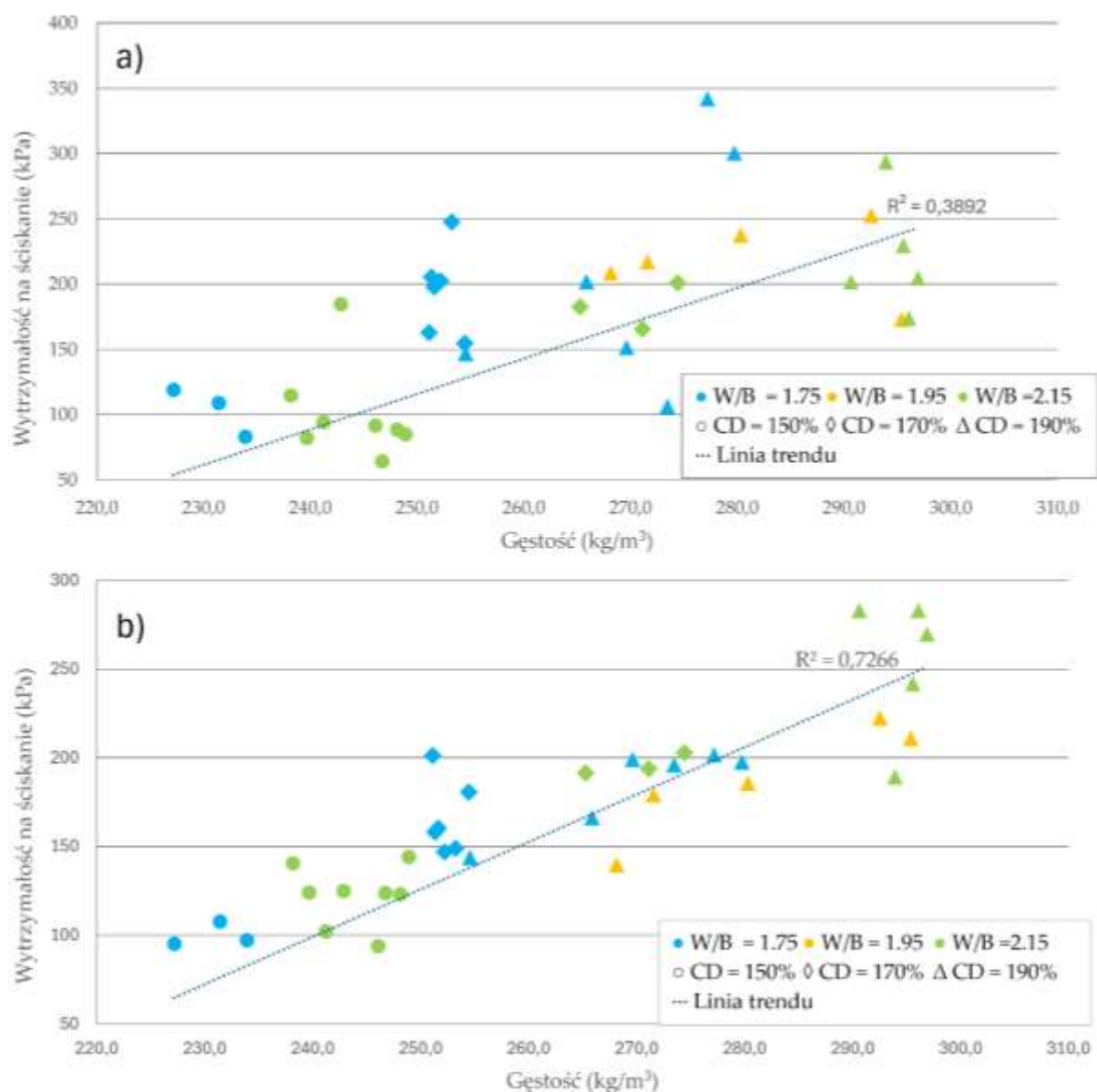
W publikacji [6] przeprowadzono systematyczne porównanie sześciu metod wyznaczania wytrzymałości na ściskanie stosowanych w literaturze. Szczegółowe zestawienie metod wraz z warunkami badania i kryteriami wyznaczania wytrzymałości przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Metody wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego stosowane w literaturze.

Numer Metody	Skrócona Nazwa Metody	Opis Metody
I	Odchylenie od liniowości krzywej naprężenie-odkształcenie (σ - ϵ)	Wytrzymałość na ściskanie definiowana jest jako naprężenie odpowiadające początkowi nieliniowego zachowania na krzywej naprężenie-odkształcenie.
II	Redukcja sztywności o 25%	Wytrzymałość definiowana jest w punkcie, w którym chwilowa sztywność spada do 25% (lub 30%) swojej wartości maksymalnej, wyznaczonej za pomocą ruchomej średniej z 20 punktów
III	Granica użytkowalności (odkształcenie 5%)	Wytrzymałość na ściskanie definiowana jest jako naprężenie odpowiadające odkształceniu 5%, przyjętemu jako granica użytkowalności materiału.
IV	Naprężenie przy odkształceniu 10%	Zgodnie z EN 826, wytrzymałość na ściskanie definiowana jest jako naprężenie przy odkształceniu 10%.
V	Obciążenie maksymalne ($\sigma_{\max}$)	Wytrzymałość na ściskanie definiowana jest jako naprężenie odpowiadające maksymalnemu zarejestrowanemu obciążeniu podczas ściskania.
VI	Cykliczne ściskanie	Wytrzymałość wyznaczana jest podczas końcowego obciążenia do zniszczenia, poprzedzonego trzema kontrolowanymi cyklami ściskania z rosnącymi poziomami odkształcenia.

Wyniki porównania, przedstawione szczegółowo w publikacji [6], wykazały, że metoda oparta na utracie liniowości krzywej (Metoda I) charakteryzowała się najwyższym odchyleniem standardowym i najniższymi wartościami wytrzymałości, wykazując wysoką wrażliwość na subiektywną interpretację. Metoda redukcji sztywności (Metoda II) dawała wartości zbliżone do metod opartych na stałym odkształceniu, lecz wykazywała wysoką zmienność punktu identyfikacji wytrzymałości w zależności od kształtu krzywej. Metoda maksymalnego naprężenia (Metoda V) wymaga osiągnięcia wyraźnego maksimum na krzywej naprężenie-odkształcenie, co w przypadku kompozytu wapienno-konopnego często nie występuje, ograniczając jej powszechne zastosowanie. Metody oparte na stałych poziomach odkształcenia (Metody III i IV) charakteryzowały się najniższym odchyleniem standardowym, jednak wykazywały wrażliwość na zachowanie materiału w początkowej fazie obciążenia. Zaproponowana metoda oparta na 1% trwałym odkształceniu wykazała umiarkowany i stabilny przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zagęszczenia oraz stabilne odchylenie standardowe we wszystkich badanych seriach.

Weryfikacja zaproponowanej metody w publikacji [7] przy B/S = 1:1 ujawniła przypadki ograniczonej stosowalności. Przy niskim zagęszczeniu i niskiej zawartości spoiwa krzywa naprężenie-odkształcenie nie wykazywała wystarczająco wyraźnej zmiany nachylenia, co uniemożliwiało jednoznaczne wyznaczenie punktu przecięcia. W takich seriach jako kryterium uzupełniające zastosowano naprężenie przy 5% odkształceniu (Rysunek 28).



Rysunek 28. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji gęstości objętościowej: (a) metoda 1% trwałego odkształcenia; (b) kryterium 5% odkształcenia.

7. Dyskusja wyników

7.1. Wpływ stosunku spoiwa do paździerzy (B/S)

W publikacji [7] przedstawiono rozszerzony zbiór danych programu badawczego, obejmujący zakresy B/S od 1:1 do 3:1 i gęstości od ok. 227 do 518 kg/m³. Przy tym samym stopniu zagęszczenia (CD = 150%) wzrost λ między najniższym a średnim B/S wyniósł ok. 18%, a między średnim a najwyższym ok. 19%. Wyraźny wpływ proporcji B/S na przewodność cieplną zaobserwowano również w

badaniach dodatkowych przedstawionych w publikacji [5]. Mieszanka dachowa (R), nawet przy najwyższej badanej gęstości, wykazywała znacznie niższą przewodność cieplną niż mieszanka ścienna (W) o podobnej gęstości, co potwierdza dominujący wpływ proporcji składników na właściwości cieplne. Interesującą obserwacją był natomiast wynik mieszanki podłogowej (F) o najwyższym B/S. Osiągnęła ona lepszą izolacyjność termiczną niż mieszanka W przy podobnej gęstości. Prawdopodobną przyczyną jest intensywne pienienie się świeżej mieszanki F podczas mieszania, co doprowadziło do powstania szczególnie porowatej mikrostruktury kompozytu. Mechanizm tego zjawiska wymaga jednak dokładniejszego zbadania.

Proporcja B/S determinuje również fundamentalny charakter mechaniczny kompozytu. Przy niskiej zawartości spoiwa ($B/S = 1:1$) matryca mineralna jest niewystarczająca do dominowania odpowiedzi mechanicznej pod obciążeniem ściskającym. Krzywa naprężenie-odkształcenie pozbawiona jest wyraźnego punktu przegięcia a materiał wykazuje wysoce plastyczne zachowanie typowe dla lekkich materiałów izolacyjnych. Przy wyższej zawartości spoiwa tworzy ono ciągłą matrycę mineralną, w której osadzone są cząstki kruszywa, co skutkuje wyraźniejszą fazą sprężystą i bardziej kruchym zniszczeniem. Wyższy udział spoiwa wydłuża zatem strefę sprężystą przez stopniowe przejmowanie obciążeń przez matrycę mineralną, co wyjaśnia dlaczego zaproponowana metoda 1% trwałego odkształcenia daje wiarygodne wyniki głównie przy $B/S \geq 2:1$.

Proporcja B/S wykazała natomiast wyraźnie mniejszy wpływ na paroprzepuszczalność i ciepło właściwe niż na właściwości termiczne i mechaniczne. Paroprzepuszczalność jest determinowana przede wszystkim przez gęstość objętościową, niezależnie od składu spoiwa, natomiast na ciepło właściwe istotny wpływ wywierają właściwości samych paździerzy konopnych.

7.2. Wpływ stosunku wody do spoiwa (W/B)

Stosunek wody do spoiwa wpływał na końcową gęstość objętościową kompozytu, choć mechanizm tego wpływu jest pośredni. Można by oczekiwać, że nadmiar wody odparowuje podczas dojrzewania i nie wpływa na gęstość materiału. Wyniki wskazują jednak, że wyższa zawartość wody przekładała się na wyższą gęstość

suchego kompozytu. Prawdopodobnym mechanizmem jest poprawa urabialności mieszanki przy wyższym W/B, co umożliwiało efektywniejsze wypełnienie formy pomiarowej podczas wyznaczania gęstości luźnego zasypu. Efekt ten był wyraźniejszy przy wyższych stopniach zagęszczenia, gdzie większa masa materiału była wymagana do osiągnięcia założonego poziomu CD, przez co różnice w gęstości luźnego zasypu kumulowały się i dawały bardziej zauważalny efekt na końcową gęstość kompozytu. Wpływ W/B na przewodność cieplną realizuje się przez ten sam mechanizm. Brak istotnego wpływu na wytrzymałość przy B/S = 1:1 może wynikać z tego, że przy tak niskiej zawartości spoiwa jego absolutna ilość ogranicza jakość matrycy niezależnie od dostępności wody. Przyrost W/B o 0,2 może być ponadto zbyt mały, aby wywołać mierzalny efekt przy tym stosunku składników.

Niezależnie od powyższego, wyższa zawartość wody powinna generalnie sprzyjać właściwościom mechanicznym kompozytu, gdyż paździerze konopne charakteryzują się wysoką zdolnością do absorpcji wody z mieszanki, co ogranicza jej dostępność dla hydratacji spoiwa. Efekt ten może być szczególnie wyraźny w kompozytach o wyższej zawartości spoiwa. Dla właściwej oceny wpływu W/B na właściwości mechaniczne konieczne są dalsze badania przy wyższych proporcjach B/S.

7.3. Wpływ uziarnienia paździerzy

Mechanizm wpływu uziarnienia na przewodność cieplną wynika ze zmian mikrostruktury kompozytu: większe cząstki tworzą większe przestrzenie między sobą w stanie niezagęszczonym, a choć zagęszczenie częściowo zamyka te pustki, w zagęszczonym kompozycie zachowana jest resztkowa przewaga porowatości. Efekt uziarnienia na λ może być zatem bardziej wyraźny w badaniach stosujących drobniejsze i bardziej jednorodne frakcje niż te stosowane w niniejszym programie badawczym. Brak systematycznego wpływu uziarnienia na wytrzymałość na ściskanie przy B/S = 3:1 sugeruje natomiast, że przy wyższej zawartości spoiwa wytrzymałość jest determinowana przez gęstość matrycy mineralnej, a nie przez geometrię kruszywa. Różnice w upakowaniu wynikające z granulometrii są absorbowane przez fazę spoiwa i nie przekładają się na różnice wytrzymałości. Należy jednak zaznaczyć ograniczenie

metodyczne: utrzymanie stałego stopnia zagęszczenia przy różnych frakcjach prowadziło do różnych końcowych gęstości kompozytu ze względu na różnice w efektywności upakowania. Ponieważ zarówno przewodność cieplna, jak i wytrzymałość silnie zależą od gęstości, część efektów przypisywanych uziarnieniu może odzwierciedlać te różnice gęstości, a nie bezpośredni wpływ geometrii cząstek. Pełna ocena wpływu uziarnienia wymagałaby utrzymania porównywalnych końcowych gęstości między frakcjami.

Istotnym aspektem praktycznym zaobserwowanym podczas przygotowania próbek było pogorszenie urabialności mieszanki wraz ze wzrostem rozmiaru cząstek. Grubsze paździerze były trudniejsze do jednorodnego wymieszania i bardziej odporne na zagęszczanie. Warto również odnotować, że stosowane frakcje paździerzy (minimalna długość cząstek ok. 9 mm) są znacznie grubsze niż frakcje stosowane w wielu badaniach zachodnioeuropejskich, gdzie raportowano frakcje o średniej długości nieprzekraczającej 5 mm, co podkreśla potrzebę precyzyjnej charakterystyki granulometrycznej przy porównywaniu wyników między badaniami. W ramach publikacji [4] zweryfikowano metodę analizy obrazowej, wykazując że próbka 15 g zapewnia najlepsze odwzorowanie rozkładu uziarnienia dla stosowanych paździerzy. Metoda analizy obrazowej ogranicza się jednak do pomiarów dwuwymiarowych i nie uwzględnia grubości cząstek, która może różnić się między frakcjami i odmianami konopi. Znajomość całkowitej powierzchni cząstek mogłaby natomiast stanowić podstawę do modelowania mikrostruktury kompozytu, w tym charakterystyki połączeń między paździerzami, rozkładu porowatości oraz właściwości interfazowych, co otwiera interesujący kierunek dalszych badań.

7.4. Wpływ stopnia zagęszczenia na właściwości kompozytu wapienno-konopnego

Jak wykazano w rozdziale 6.2, wpływ zagęszczenia na wytrzymałość ma charakter nieliniowy z wyraźnym nasyceniem powyżej $CD = 170\%$. Zagęszczenie generuje porównywalne bezwzględne przyrosty wytrzymałości niezależnie od proporcji B/S. Jego wpływ na kształt krzywej naprężenie-odkształcenie jest jednak złożony i zależy od zawartości spoiwa. Przy B/S = 1:1 zagęszczenie przede wszystkim

redukuje przestrzeń między cząstkami, nie poprawiając proporcjonalnie ciągłości matrycy, stąd mimo realnego wzrostu wytrzymałości punkt przegięcia pozostaje słabo zaznaczony (publikacja [7]). Obserwacje z publikacji [5] wskazują, że przy wyższej zawartości spoiwa intensywne zagęszczenie może osłabiać wyrazistość punktu przegięcia. Mechanizm ten różni się od wpływu samego B/S. Podczas gdy wyższy udział spoiwa przy stałym zagęszczeniu wzmacnia ciągłość matrycy mineralnej i wydłuża strefę sprężystą, intensywne zagęszczenie przy wysokim B/S zmniejsza odległości między cząstkami paździerzy, zwiększając ich udział w przenoszeniu obciążeń i tym samym modyfikując charakter odpowiedzi mechanicznej. Zależność ta wskazuje na złożony, nieliniowy charakter wpływu zagęszczenia na zachowanie mechaniczne kompozytu, który zależy od wzajemnego oddziaływania zawartości spoiwa i stopnia upakowania kruszywa.

Wyniki publikacji [5] wskazują, że skala wpływu zagęszczenia na λ zależy od zawartości spoiwa. Wzrost λ między minimalnym a maksymalnym stopniem zagęszczenia wyniósł 13,4% dla serii dachowej (B/S = 1:1), 24,0% dla ściennej (B/S = 1,8) oraz 38,3% dla podłogowej (B/S = 2,25). Im wyższa zawartość spoiwa, tym bardziej wyraźny jest wpływ zagęszczenia na przewodność cieplną, gdyż spoiwo jako składnik o znacznie wyższej przewodności niż paździerze efektywniej wypełnia pustki przy zagęszczaniu.

Warto odnotować pewne ograniczenie metody stopniowania zagęszczenia CD: gęstość luźnego zasypu używana jako wartość referencyjna zależy od sposobu wypełniania naczynia pomiarowego przez mieszankę, na co wpływają m.in. rozmiar cząstek paździerzy i konsystencja mieszanki. Mimo tego ograniczenia metoda ma istotną zaletę praktyczną, gdyż opisując zagęszczenie względem stanu niezagęszczonego, umożliwia weryfikację in situ poprzez porównanie objętości świeżej mieszanki z objętością gotowej przegrody.

7.5. Kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie

Trudności z wyznaczaniem wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego wynikają z jego fundamentalnej cechy strukturalnej - braku wyraźnej powierzchni zniszczenia typowej dla materiałów kruchych. W odróżnieniu od betonu

czy cegły, w których pęknięcia propagują wzdłuż określonych płaszczyzn, kompozyt wapienno-konopny wykazuje rozproszony charakter uszkodzeń. Miękkie, wysoce ściśliwe kruszywo organiczne kontynuuje plastyczne odkształcanie nawet po widocznym uszkodzeniu matrycy mineralnej, a narastające zagęszczanie cząstek paździerzy stopniowo przejmuje przenoszenie obciążeń. To właśnie ten mechanizm tłumaczy obserwowany w badaniach ciągły wzrost naprężeń, najczęściej bez wyraźnego maksimum i uzasadnia potrzebę opracowania kryterium wyznaczania wytrzymałości dostosowanego do specyfiki tego materiału.

Stosowanie metod opartych na stałych poziomach odkształcenia całkowitego (Metody III i IV) jest problematyczne, gdyż ignorują one sprężysty komponent odpowiedzi materiału. Ta sama wartość odkształcenia całkowitego może odpowiadać różnym stanom degradacji w zależności od modułu sprężystości materiału, co prowadzi do niejednorodnej interpretacji wyników między seriami o różnym składzie. Metody oparte na kształcie krzywej (Metody I i II) są z kolei wrażliwe na subiektywną interpretację lub na kształt krzywej, co w przypadku materiałów o słabo zaznaczonej fazie sprężystej może prowadzić do wyników niezgodnych z oczekiwaną tendencją wzrostu wytrzymałości wraz z gęstością.

Zaproponowane kryterium 1% trwałego odkształcenia jest uzasadnione merytorycznie, gdyż dostarcza bezpośredniej miary nieodwracalnej deformacji, w odróżnieniu od metod opartych na odkształceniu całkowitym, które nie rozróżniają komponentu sprężystego i plastycznego. Ta sama wartość odkształcenia całkowitego może odpowiadać różnym stanom degradacji w zależności od sztywności materiału, podczas gdy trwałe odkształcenie jednoznacznie wskazuje moment, w którym materiał zaczyna się nieodwracalnie deformować. Analogiczne podejście stosuje się w ocenie wytrzymałości drewna ściskanego w poprzek włókien zgodnie z normą EN 408. Obserwacje z publikacji [7] wskazują jednak na ograniczenie tej metody: w mieszankach o niskiej zawartości spoiwa ($B/S = 1:1$) i niskim stopniu zagęszczenia strefa sprężysta jest tak słabo zaznaczona, a zakres plastyczny tak rozległy, że dopasowanie linii do strefy sprężystej i wyznaczenie punktu przecięcia z krzywą doświadczalną staje się niemożliwe lub daje wyniki obarczone dużą niepewnością.

Obserwacje z publikacji [5] i [7] wskazują spójnie, że żadna z analizowanych metod nie jest w pełni uniwersalna. Zakres stosowalności każdej z nich zależy od proporcji składników mieszanki i związanego z nimi charakteru mechanicznego kompozytu. Zaproponowana metoda daje wiarygodne wyniki przede wszystkim dla mieszanek o wyższej zawartości spoiwa ($B/S \geq 2:1$), natomiast dla mieszanek o niskiej zawartości spoiwa bardziej odpowiednie jest kryterium stałego odkształcenia.

8. Wnioski i rekomendacje

8.1. Wnioski

Niniejsza rozprawa doktorska realizowała dwa główne cele badawcze. W odniesieniu do celu pierwszego, dotyczącego określenia wpływu składu mieszanki i stopnia zagęszczenia na właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego, sformułowano następujące wnioski:

- 1) Stosunek spoiwa do paździerzy (B/S) jest dominującą zmienną kształtującą przewodność cieplną oraz mechaniczne zachowanie kompozytu wapienno-konopnego, działającą przede wszystkim poprzez wpływ na gęstość objętościową materiału. Proporcja B/S wywiera również mierzalny wpływ na paroprzepuszczalność i ciepło właściwe kompozytu.
- 2) Stopień zagęszczenia (CD) w wymierny sposób wpływa na przewodność cieplną, wytrzymałość na ściskanie oraz paroprzepuszczalność kompozytu wapienno-konopnego. Wpływ zagęszczenia na wytrzymałość ma charakter nieliniowy - przyrost wytrzymałości przy przejściu z CD = 150% do CD = 170% był wyraźnie większy niż przy dalszym zagęszczaniu do CD = 190%. Wpływ stopnia zagęszczenia na przewodność cieplną jest tym bardziej wyraźny, im wyższy jest stosunek B/S.
- 3) Stosunek wody do spoiwa (W/B) wykazał marginalny wpływ na gęstość objętościową i przewodność cieplną kompozytu, przy czym jego oddziaływanie realizuje się przede wszystkim poprzez wpływ na urabialność mieszanki i efektywność jej zagęszczania. Wpływ W/B na wytrzymałość na ściskanie pozostał nierozstrzygnięty.

- 4) Uziarnienie paździerzy wykazało ograniczony, lecz mierzalny wpływ na przewodność cieplną. Zastosowanie grubszych frakcji zredukowało współczynnik przewodzenia ciepła o ok. 7,6% względem frakcji drobnej przy B/S = 2:1. Nie zidentyfikowano natomiast systematycznego wpływu uziarnienia na wytrzymałość na ściskanie. Uziarnienie wywierało natomiast istotny wpływ na urabialność mieszanki. Grubsze frakcje paździerzy utrudniały jednorodne wymieszanie składników i zagęszczanie kompozytu podczas formowania.
- 5) Gęstość objętościowa stanowi wiarygodny parametr pośredni łączący zmienne technologiczne z właściwościami kompozytu wapienno-konopnego w szerokim zakresie składów mieszanki. Przewodność cieplna wykazuje silną liniową zależność od gęstości objętościowej niezależnie od kombinacji zmiennych, które tę gęstość ukształtowały ($R^2 = 0,94$), natomiast wytrzymałość na ściskanie wykazuje zależność umiarkowaną ($R^2 = 0,68$), co odzwierciedla większą wrażliwość tej właściwości na charakter mechaniczny kompozytu determinowany proporcją B/S.

W odniesieniu do celu drugiego, dotyczącego propozycji nowego kryterium wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego, sformułowano następujące wnioski:

- 6) Żadna z zastosowanych w programie badawczym metod wyznaczania wytrzymałości na ściskanie nie jest w pełni uniwersalna. Zakres stosowalności każdej z nich zależy przede wszystkim od proporcji składników mieszanki i wynikającego z nich charakteru mechanicznego kompozytu.
- 7) Zaproponowane kryterium oparte na 1% trwałym odkształceniu, wzorowane na normie EN 408, daje wiarygodne i powtarzalne wyniki dla mieszanek o B/S $\geq 2:1$ lub o wysokim stopniu zagęszczenia (CD = 190%). Dla mieszanek o niskiej zawartości spoiwa (B/S = 1:1), bardziej odpowiednie jest kryterium naprężenia przy 5% odkształceniu.

8.2. Kierunki dalszych badań

Program badawczy zrealizowany w ramach niniejszej rozprawy otwiera kilka

kierunków dalszych badań. Wpływ stosunku wody do spoiwa na właściwości mechaniczne kompozytu powinien zostać zbadany przy wyższych proporcjach B/S, gdzie zmiany ilości wody stanowią bardziej znaczący element całkowitej masy spoiwa, a różnice w stopniu hydratacji są spodziewane jako bardziej uchwytne. Przeprowadzone badania miały ponadto charakter jakościowy w odniesieniu do wzajemnych oddziaływań między zmiennymi technologicznymi. Statystyczna analiza tych interakcji z zastosowaniem pełnego układu czynnikowego umożliwiłaby bardziej rygorystyczną kwantyfikację ich względnego wkładu w kształtowanie właściwości kompozytu.

Odrębnym zagadnieniem wartym systematycznego zbadania jest długoterminowy przyrost wytrzymałości kompozytów na bazie spoiw wapiennych, wykraczający poza przyjęty w programie 28-dniowy punkt odniesienia. Wyniki takich badań, uzupełnione o ustalenie minimalnych wymagań wytrzymałościowych dla różnych zastosowań budowlanych, stanowiłyby praktyczne ramy dla przełożenia wyników programu badawczego na wytyczne projektowe. Wreszcie, analiza mikrostruktury kompozytu w oparciu o precyzyjną charakteryzację geometryczną cząstek kruszywa, obejmująca modelowanie połączeń między paździerzami i rozkładu porowatości, stanowi obiecujący kierunek badań pozwalający lepiej zrozumieć mechanizmy leżące u podstaw obserwowanych zależności między składem i technologią wytworzenia a właściwościami materiału.

8.3. Rekomendacje praktyczne

Na podstawie wyników programu badawczego sformułowano następujące rekomendacje dla projektantów, wykonawców oraz badaczy zajmujących się kompozytem wapienno-konopnym:

- 1) W zakresie doboru uziarnienia paździerzy wyniki badań wskazują, że frakcje o gęstości nasypowej nie mniejszej niż 100 kg/m^3 zapewniają korzystny kompromis między właściwościami termicznymi a urabialnością mieszanki. Zastosowanie frakcji drobniejszych nie wykazuje istotnej poprawy przewodności cieplnej ani wytrzymałości na ściskanie, natomiast frakcje o większych cząstkach mogą prowadzić do trudności z jednorodnym

wymieszaniem składników i zagęszczaniem kompozytu podczas formowania.

- 2) W zakresie zagęszczania mieszanki wyniki programu badawczego wskazują, że największy przyrost wytrzymałości i gęstości uzyskuje się przy przejściu z $CD = 150\%$ do $CD = 170\%$, natomiast dalsze zagęszczanie do $CD = 190\%$ przynosi wyraźnie malejące korzyści mechaniczne przy jednoczesnym wzroście przewodności cieplnej. $CD = 170\%$ może zatem stanowić efektywny cel zagęszczania w typowych zastosowaniach ściennych, choć optymalny poziom zagęszczenia zależy od przeznaczenia materiału i pożądanych właściwości przegrody. Opracowana metoda CD, definiująca zagęszczenie jako stosunek gęstości zagęszczonej mieszanki do gęstości luźnego zasypu, umożliwia obiektywną kontrolę i porównywanie zagęszczenia między badaniami.
- 3) Do charakterystyki uziarnienia paździerzy konopnych analiza obrazowa dostarcza dokładniejszych i bardziej szczegółowych danych o geometrii cząstek niż tradycyjna analiza sitowa. Przy wyznaczaniu rozkładu uziarnienia warto dążyć do uzyskania minimum 2000 cząstek w próbce, co zapewnia reprezentatywny wynik analizy. Wyniki programu badawczego wskazują, że w przypadku paździerzy o charakterystyce zbliżonej do stosowanych w niniejszej pracy próbka o masie 15 g może być wystarczająca do spełnienia tego kryterium.
- 4) W zakresie wyznaczania wytrzymałości na ściskanie wyniki programu badawczego wskazują, że kryterium naprężenia przy 5% odkształceniu jest odpowiednie dla mieszanek o $B/S = 1:1$, natomiast zaproponowana metoda oparta na 1% trwałym odkształceniu daje wiarygodne wyniki dla mieszanek o $B/S \geq 2:1$. Dla pośrednich wartości proporcji B/S wybór metody warto uzależnić od stopnia zagęszczenia kompozytu i charakteru krzywej naprężenie-odkształcenie. W przypadku słabo zaznaczonej strefy sprężystej bardziej odpowiednie może być kryterium stałego odkształcenia.

9. Bibliografia

- Abdellatef, Y., Khan, M. A., Khan, A., Alam, M. I., & Kavgic, M. (2020). Mechanical, thermal, and moisture buffering properties of novel insulating hemp-lime composite building materials. *Materials*, 13(21), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma13215000>
- Ahlberg, J., Ahlberg, J., Georges, E., & Norlén, M. (2014). *The potential of hemp buildings in different climates*.
- Allin, S. (2012). *Building with Hemp* (2nd ed.). Seed Press.
- Amziane, S., & Collet, F. (2017). *Bio-aggregates Based Building Materials*. Dordrecht: Springer Netherlands. <http://www.springer.com/series/8780>
- Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., & Sonebi, M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM : characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content , water absorption , dry density , particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures*, 50(3), 1–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>
- Arizzi, A., Viles, H., Martín-Sánchez, I., & Cultrone, G. (2016). Predicting the long-term durability of hemp-lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations. *Science of the Total Environment*, 542, 757–770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.141>
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Barbhuiya, S., & Bhusan Das, B. (2022). A comprehensive review on the use of hemp in concrete. *Construction and Building Materials*, 341(April), 127857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127857>
- Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., & Marceau, S. (2024). Mechanical behavior of bio-based concrete under various loadings and factors affecting its mechanical properties at the composite scale: A state-of-the-art review. *Cleaner Engineering and Technology*, 23(September), 100819. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100819>
- Bartosz, D., & Kowalski, W. (2022). *Szacowanie śladu węglowego budynków, Mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do roku 2050*. <https://plgbc.org.pl/wp-content/uploads/2022/11/Szacowanie-sladu-weglowego-budynkow.pdf>
- Bedlivá, H., & Isaacs, N. (2014). Hempcrete – An Environmentally Friendly Material? *Advanced Materials Research*, December. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83>
- Bošković, I., & Radivojević, A. (2023). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia: The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission. *Journal of*

- Bourdout, A., Magniont, C., Lagouin, M., Niyigena, C., Evon, P., & Amziane, S. (2019). Impact of bio-aggregates properties on the chemical interactions with mineral binder, application to vegetal concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(9), 542–558. <https://doi.org/10.3151/jact.17.542>
- BRE Construction Division. (2002). *Final Report on the Construction of the Hemp Houses at Haverhill, Suffolk* (Vol. 2002, Issue 209).
- Brzyski, P. (2018). *Kompozyt wapienno – konopny jako materiał ścienny spełniający zasady zrównoważonego rozwoju w budownictwie*. Politechnika Lubelska.
- Brzyski, P., & Gąska-Jędruch, U. (2024). Water Absorption and Microbial Corrosion Resistance of Hemp Concrete Modified with the Acid Casein Admixture. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(6), 432–448. <https://doi.org/10.12913/22998624/191695>
- Brzyski, P., Gładecki, M., Rumińska, M., Pietrak, K., Kubiś, M., & Łapka, P. (2020). Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials*, 13(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13235383>
- Brzyski, P., & Suchorab, Z. (2020). Capillary uptake monitoring in lime-hemp-perlite composite using the time domain reflectometry sensing technique for moisture detection in building composites. *Materials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ma13071677>
- Chanvribat shives*. (n.d.). www.fr.weber/en/facades-neuves/projet-de-renovation/chanvribat
- Cierpucha, W. (2013). *Technologia uprawy i przetwórstwa konopi włóknistych*. Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich.
- Colinart, T., Glouannec, P., & Chauvelon, P. (2012). Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030>
- Collet, F., Chamoin, J., Pretot, S., & Lanos, C. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy & Buildings*, 62, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>
- Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes : Variation with formulation , density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>
- Cortés, J. G., Ryu, B. R., Pauli, C., Royano, L., & Park, S. (2024). Industrial Applications of Hemp Fiber in Europe and Evolving Regulatory Landscape Industrial Applications of Hemp Fiber in Europe and Evolving Regulatory Landscape

- de Bruijn, P. B., Jeppsson, K.-H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103(4), 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
- de Bruijn, P., & Johansson, P. (2013). Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1235–1242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006>
- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-minerbe, M., Diafi, D., Nour, I., & Amziane, S. (2018). Influence of binder on the multiscale properties of hemp concretes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 8189, 1–17. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1457571>
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655–3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>
- Dinh, T. M., Magniont, C., & Coutand, M. (2015). Hemp concrete using innovative pozzolanic binder. *First International Conference on Bio-Based Building Materials*, June.
- Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., & Kurek, B. (2015). Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites*, 55, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>
- E. Haustein. (2018). Właściwości termoizolacyjne kompozytu wapienno-cementowego z udziałem paździerzy konopnych. 19(4), 72–78.
- Elfordy, S., Lucas, F., & Tancrét, F. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“ hempcrete ”) manufactured by a projection process. 22, 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>
- Eurostat. (2026). Crop production in EU standard humidity. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/APRO_CPSH1__custom_12689755/default/table?lang=en
- Evrard, A., & Herde, A. De. (2006). Dynamical interactions between heat and mass flows in Lime-Hemp Concrete. 2001, 69–76.
- Fic, S., Brzyski, P., Szewczyk, A., & Jarosz-Hadam, M. (2017). Wybrane właściwości lekkich kompozytów na bazie wypełniaczy celulozowych do zastosowania w budownictwie ekologicznym. *Kwartalnik Tom XXXIV Czasopismo Inżynierii Lądowej , Środowiska i Architektury Jest Kontynuacją Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej - Budownictwo i Inżynieria Środowiska .*, 64(1).

- Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency, & The United Nations Environment Programme (2019). (2019). *2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*.
- Gołębiewski, M. (2020). *Aspekty zastosowania kompozytów wapienno-konopnych w budownictwie indywidualnym domów mieszkalnych w architekturze proekologicznej*. Warsaw University of Technology.
- Grudzińska, M., & Brzyski, P. (2019). The occurrence of thermal bridges in hemp-lime construction junctions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(2), 377–387. <https://doi.org/10.3311/PPci.13377>
- Haustein, E. (2018). Thermal insulation properties of the lime-cement composite with hemp shives. *Ecological Engineering*, 19(4), 72–78.
- Hempcrete facade of a town hall*. (n.d.). <https://archello.com/news/detail-hempcrete-facade-of-town-hall-voorst>
- Hirst, E., Walker, P., Paine, K., & Yates, T. (2010). *Characterisation of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading*. June 2018, 25–26.
- Horszczaruk, E., Strzałkowski, J., Głowacka, A., Paszkiewicz, O., & Markowska-Szczupak, A. (2023). Investigation of Durability Properties for Lightweight Structural Concrete with Hemp Shives Instead of Aggregate. *Applied Sciences*, 13(14), 8447. <https://doi.org/10.3390/app13148447>
- Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M., & Jiang, Y. (2019a). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, 212, 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>
- Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M., & Jiang, Y. (2019b). Resilient hemp shiv aggregates with engineered hygroscopic properties for the building industry. *Construction and Building Materials*, 212, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.327>
- Ip, K., & Miller, A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>
- Jiang, Y., Lawrence, M., Ansell, M. P., & Hussain, A. (2018). Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv. *Royal Society Open Science*, 5(4). <https://doi.org/10.1098/rsos.171945>
- Kaur, G., & Kander, R. (2023). The Sustainability of Industrial Hemp: A Literature Review of Its Economic, Environmental, and Social Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086457>
- Khan, B. A., Wang, J., Warner, P., & Wang, H. (2015). Antibacterial properties of hemp

- hurd powder against E. coli. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(10). <https://doi.org/10.1002/app.41588>
- Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., & Walker, R. (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*, 122, 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- Laborel-Préneron, A., Magniont, C., & Aubert, J. (2018). Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 9(7), 1095–1112. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>
- Le, A. D. T., Maalouf, C., Mai, T. H., Wurtz, E., & Collet, F. (2010). Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy & Buildings*, 42(10), 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016>
- Lhoist Southern Europe. (2017). *Natural Hempcrete Insulation*.
- Łukowski, P. (2010). Możliwości modyfikacji spoiwa wapiennego domieszkami i dodatkami. *Materiały Budowlane*, 458(10), 31–32.
- Marceau, S., Glé, P., Guéguen-Minerbe, M., Gourlay, E., Moscardelli, S., Nour, I., & Amziane, S. (2017). Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 139, 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129>
- Narloch, P., Piątkiewicz, W., Anysz, H., Wólczyńska, Z., & Mańczak, J. (2025). *Digital Image-Based Characterization of Particle Size and Shape Distribution in Industrial Hemp Shives*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15664512>
- Nguyen, T., Picandet, V., Amziane, S., Baley, C., Vincent, T. N., Sofiane, P., & Baley, C. (2011). *Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete*. 8189. <https://doi.org/10.3166/EJECE.13.1039-1050>
- Nguyen, T. T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Amziane, S., Baley, C., Thu, T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Thu, T., Vincent, N., & Patrick, P. (2011). *Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete*. 8189. <https://doi.org/10.3166/EJECE.14.545-560>
- Niyigena, C. (2016). *Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne*. Université Blaise Pascal-Clermont II.
- Niyigena, C., Amziane, S., & Chateauneuf, A. (2018). Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 160, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., & Baynast, H. De. (2012). Design of

- green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice – lime binder. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- OSBN. (2024). *Budownictwo Naturalne. Poradnik Inwestora*. www.eeagrants.pl
- Osiecka, E. (2002). *Materiały budowlane właściwości techniczne i zdrowotne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Page, J., Sonebi, M., & Amziane, S. (2017). Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material. *Construction and Building Materials*, 139, 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037>
- Parlament Europejski i Rada UE. (2021). Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. w sprawie ustanowienia ram na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmiany rozporządzeń (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie). *Dz. Urz. UE* 2021, L 243/1, 2, 1–17. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>
- Parlament Europejski i Rada UE. (2024). *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*. 1–68.
- Pierre, T., Colinart, T., & Glouannec, P. (2014). Measurement of Thermal Properties of Biosourced Building Materials. *International Journal of Thermophysics*, 35(9), 1832–1852. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1477-0>
- Piotrowski, B. S., & Carus, M. (2011). Ecological benefits of hemp and flax cultivation and products. *Nova Institut*, 68(73), 1–6. <http://eiha.org/media/2014/10/Ecological-benefits-of-hemp-and-flax-cultivation-and-products-2011.pdf>
- PKN. (n.d.). *PN-B-02151-3:2015 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych*.
- PLGBC, P. S. B. E. (2024). *GWP - Współczynnik globalnego ocieplenia w Dyrektywie w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD 2024)*. <https://plgbc.org.pl/wirtualna-biblioteka/gwp-w-epbd-2024>
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D., & Langlet, T. (2016). Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Construction and Building Materials*, 111, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061>
- Ruggieri, G., Arrigoni, A., Pelosato, R., Meli, P., Sabbadini, S., & Dotelli, G. (2017). *Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks*. 149, 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>

- Sáez-Pérez, M. P., Brümmer, M., & Durán-Suárez, J. A. (2020). A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering*, 31(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>
- Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., & Canti, M. (2014). Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 77, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>
- Scrucca, F., Ingrao, C., Maalouf, C., Moussa, T., Polidori, G., Messineo, A., Arcidiacono, C., & Asdrubali, F. (2020). Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings. *Environmental Impact Assessment Review*, 84(October 2019), 106417. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417>
- Seng, B., Magniont, C., & Lorente, S. (2018). Characterization of a precast hemp concrete . Part I : Physical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, July, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.016>
- Sheridan, J., Sonebi, M., Taylor, S., & Amziane, S. (2020). The effect of a polyacrylic acid viscosity modifying agent on the mechanical, thermal and transport properties of hemp and rapeseed straw concrete. *Construction and Building Materials*, 235, 117536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117536>
- Sinka, M., Heede, P. Van Den, Belie, N. De, Bajare, D., & Sahmenko, G. (2018). Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 133(February), 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.024>
- Sofiane, A., & Laurent, A. (2013). *Bio-aggregate-based building materials : applications to hemp concretes* (1st ed.). John Wiley & Sons, Incorporated.
- Sokołowska, J. J. (2025). Utilizing Sakurajima Volcanic Ash as a Sustainable Partial Replacement for Portland Cement in Cementitious Mortars. *Sustainability (Switzerland)*, 17(17), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su17177576>
- Stevulova, N., Cigasova, J., Purcz, P., Schwarzova, I., Kacik, F., & Geffert, A. (2015). Water absorption behavior of hemp hurds composites. *Materials*, 8(5), 2243–2257. <https://doi.org/10.3390/ma8052243>
- Stevulova, N., Cigasova, J., Schwarzova, I., Sicakova, A., & Junak, J. (2018). Sustainable bio-aggregate-based composites containing hemp hurds and alternative binder. *Buildings*, 8(25), 1–14. <https://doi.org/10.3390/buildings8020025>
- Stevulova, N., Kidalova, L., Cigasova, J., Junak, J., Sicakova, A., & Terpakova, E. (2013). Lightweight Composites Containing Hemp Hurds. *Procedia Engineering*, 65, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.013>
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., & Baley, C. (2016). Study of lime hemp concrete (LHC) - Mix design, casting process and mechanical behaviour. *Cement and*

- Concrete Composites*, 67, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Building materials and the climate: Constructing a new future*.
- Véronique, C. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de 503 particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Walker, R., & Pavía, S. (2014). Moisture transfer and thermal properties of hemp – lime concretes. *Construction and Building Materials*, 64, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>
- Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>
- Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2016). A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 116, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.088>
- Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2017). The influence of the casting process on the internal structure and physical properties of hemp-lime. *Materials and Structures*, 50(2), 1–10. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0976-4>
- Williams, J., Lawrence, M., & Walker, P. (2018). The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime. *Construction and Building Materials*, 159, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109>
- Zerrouki, R., Benazzouk, A., Courty, M., & Ben Hamed, H. (2022). Potential use of matakaolin as a partial replacement of preformulated lime binder to improve durability of hemp concrete under cyclic wetting/drying aging. *Construction and Building Materials*, 333(December 2021), 127389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127389>

10. Spis tabel i rysunków

Spis tabel:

Tabela 7. Chemiczny skład paździerzy konopnych w zależności od terminu zbiorów i metody dekortykacji.....	26
Tabela 2. Zmienne badawcze w głównym programie badawczym.....	51
Tabela 8. Zmienne badawcze w badaniach dodatkowych.....	51
Tabela 4. Skład chemiczny (wyrażony przez tlenki) spoiw zastosowanych w badaniach według deklaracji producentów.....	54

Tabela 9. Charakterystyka grup paździerz użytych w programie badawczym.....	57
Tabela 6. Metody wyznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego stosowane w literaturze.....	75
Spis rysunków:	
Rysunek 1. Ratusz miejski (Voorst, Holandia) którego fasada jest wykonana z kompozytu wapienno-konopnego.....	22
Rysunek 2. Proces uprawy, koszenia i zbioru konopi.....	23
Rysunek 9. Przekrój poprzeczny przez łodygę konopi w powiększeniu.....	24
Rysunek 4. Nieregularność kształtu paździerz konopnych zastosowanych w programie badawczym.....	27
Rysunek 5. Wpływ zawartości spoiwa na zachowanie mechaniczne kompozytu wapienno-konopnego.....	31
Rysunek 6. Dwa reprezentatywne wykresy dla typowego zachowania kompozytu wapienno-konopnego pod wpływem obciążenia ściskającego.....	32
Rysunek 7. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego w zależności od wieku.....	34
Rysunek 8. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego w funkcji gęstości objętościowej, zestawiona na podstawie publikacji stosujących porównywalne spoiwa i proporcje B/S.....	35
Rysunek 9. Wpływ orientacji formowania i stosunku paździerz do spoiwa na przewodność cieplną kompozytu.....	38
Rysunek 10. Badanie reakcji na ogień.....	41
Rysunek 11. Absorpcja dźwięku przez ścianę z betonu konopnego dla różnych spoiw w zakresie 500-2000 Hz.....	43
Rysunek 12. Utrata masy (a) oraz zmiana wytrzymałości na ściskanie (b) kompozytu wapienno-konopnego po cyklach nasycania wodą i suszenia.....	45
Rysunek 13. Proces wznoszenia ściany z kompozytu wapienno-konopnego metodą	

szalunkową.....	47
Rysunek 14. Natryskiwanie kompozytu wapienno-konopnego.....	48
Rysunek 15. Schemat programu badawczego z zaznaczeniem powiązań między etapami badań a poszczególnymi publikacjami.....	52
Rysunek 16. Proces przygotowywania obrazu uziarnienia do analizy przy pomocy programu ImageJ.....	55
Rysunek 17. Rozkład uziarnienia poszczególnych grup paździerzy konopnych.....	58
Rysunek 18. Schemat procedury wyznaczania wytrzymałości na ściskanie metodą zaproponowaną w publikacji [6].....	64
Rysunek 19. Przewodność cieplna kompozytu wapienno-konopnego w funkcji gęstości objętościowej. Zestawienie wyników z programu badawczego.....	66
Rysunek 20. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno-konopnego wyznaczona zaproponowaną metodą (1% trwałego odkształcenia) w funkcji gęstości objętościowej. Zestawienie wyników z programu badawczego (publikacja [7]).....	67
Rysunek 21. Średnia przewodność cieplna dla poszczególnych serii w zależności od stosunku wody do spoiwa (W/B), z podziałem według stopnia zagęszczenia.....	68
Rysunek 22. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stosunku wody do spoiwa (W/B) przy stopniu zagęszczenia 190%: (a) metoda 1% trwałego odkształcenia; (b) kryterium 5% odkształcenia.....	69
Rysunek 23. Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytu wapienno-konopnego w funkcji uziarnienia paździerzy i stosunku spoiwa do paździerzy (B/S).....	70
Rysunek 24. Progresja zniszczenia próbek kompozytu wapienno-konopnego podczas próby ściskania w odstępach co 2% odkształcenia (0–18%).....	71
Rysunek 25. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stopnia zagęszczenia dla W/B = 1,75 i W/B = 2,15 według metody 1% trwałego odkształcenia.....	72
Rysunek 26. Średnia wytrzymałość na ściskanie w funkcji stopnia zagęszczenia dla W/B = 1,75 i W/B = 2,15 według kryterium 5% odkształcenia.....	72

Rysunek 27. Współczynnik oporu dyfuzyjnego (μ) w funkcji gęstości objętościowej dla serii dachowej (R), ściennej (W) i podłogowej (F).....	73
Rysunek 28. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji gęstości objętościowej: (a) metoda 1% trwałego odkształcenia; (b) kryterium 5% odkształcenia.....	77

10. Załączniki

10.1. Oświadczenia o udziale autorskim

Dr inż. arch. Piotr Narloch

30.05.2026

Wydział Inżynierii Lądowej

Politechnika Warszawska

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Piątkiewicz, W., **Narloch, P.**, & Pietruszka, B. (2020). Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Archives of Civil Engineering*, 66(3), 485–503, doi:10.24425/ace.2020.134409.
Mój wkład liczył 40% całej pracy.
- Gołębiewski, M., **Narloch, P.**, Piątkiewicz, W., Wasilewski, I. (2023). Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Materiały Budowlane*, 613, 2–8, doi:10.15199/33.2023.09.
Mój wkład liczył 30% całej pracy.
- Piątkiewicz, W., **Narloch, P.**, Wólczyńska, Z., Mańczak, J. (2025). Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp-Lime Composites. *Materials (Basel)*, 18(3458), doi:10.3390/ma18153458.
Mój wkład liczył 40% całej pracy.
- Piątkiewicz, W.; Piotrowski, A.; **Narloch, P.** (2025). Determination of Compressive Strength in Hemp-Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach. *Appl. Sci.* 16(306), doi:10.3390/app16010306.
Mój wkład liczył 10% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w opracowaniu planu eksperymentu, przygotowaniu i przeprowadzeniu badań, dyskusjach dotyczących wyników, przygotowaniu manuskryptu, procesie recenzji oraz pozyskaniu środków na badania i publikacje.



Dr inż. arch. Michał Gołębiewski

2.06.2026

Wydział Architektury

Politechnika Warszawska

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- **Gołębiewski, M.**, Narloch, P., Piątkiewicz, W., Wasilewski, I. (2023). Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Materiały Budowlane*, 613, 2–8, doi:10.15199/33.2023.09.
Mój wkład liczył 30% całej pracy.
- **Gołębiewski, M.**; Pietruszka, B.; Piątkiewicz, W.; Kubiś, M.; Oleksienko, O. Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. *Materials (Basel)*. 2025, 18, 1–20, doi:10.3390/ma18214958.
Mój wkład liczył 35% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w opracowaniu planu eksperymentu, przygotowaniu i przeprowadzeniu badań, dyskusjach dotyczących wyników, przygotowaniu manuskryptu, procesie recenzji oraz pozyskaniu środków na badania i publikacje.

.....*M. Gołębiewski*.....

Dr inż. Andrzej Piotrowski
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

29.05.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Piątkiewicz, W.; **Piotrowski, A.**; Narloch, P. (2025). Determination of Compressive Strength in Hemp–Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach. *Appl. Sci.* 16(306), doi:10.3390/app16010306.
Mój wkład liczył 20% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w przygotowaniu testów, opracowaniu wyników, dyskusjach dotyczących wyników oraz przyczyniłem się do przeglądu i edycji manuskryptu.


.....

Dr inż. Barbara Pietruszka
Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa

4.02.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Piątkiewicz, W., Narloch, P., **Pietruszka, B.** (2020). Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Archives of Civil Engineering*, 66(3), 485–503, doi:10.24425/ace.2020.134409.
Mój wkład liczył 10% całej pracy.
- Gołębiewski, M.; **Pietruszka, B.**; Piątkiewicz, W.; Kubiś, M.; Oleksienko, O.
Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. *Materials (Basel)*. 2025, 18, 1–20, doi:10.3390/ma18214958.
Mój wkład liczył 25% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłam w zaprojektowaniu i opracowaniu metodologii, przeprowadzeniu badań, analizie wyników oraz zapewnieniu zasobów niezbędnych do realizacji projektu, a także brałam udział w dyskusjach dotyczących uzyskanych rezultatów.



Dr inż. Michał Kubiś
Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Warszawska

4.02.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Gołębiowski, M.; Pietruszka, B.; Piątkiewicz, W.; **Kubiś, M.**; Oleksienko, O. Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. *Materials (Basel)*. 2025, 18, 1–20, doi:10.3390/ma18214958.
Mój wkład liczył 10% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłem w zaprojektowaniu i opracowaniu metodologii, przeprowadzeniu badań oraz analizie wyników, a także zapewnieniu zasobów niezbędnych do realizacji projektu oraz przygotowaniu manuskryptu.



Dr inż. Olena Oleksiienko
Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Warszawska

4.02.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Gołębiewski, M.; Pietruszka, B.; Piątkiewicz, W.; Kubiś, M.; **Oleksiienko, O.**
Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of
Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications.
Materials (Basel). 2025, *18*, 1–20, doi:10.3390/ma18214958.
Mój wkład liczył 5% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłam w przeprowadzeniu badań oraz w pracach
związanych z pozyskiwaniem danych do niniejszego opracowania.


.....

Inż. Joanna Mańczak

4.08.2025

Wydział Inżynierii Lądowej

Politechnika Warszawska

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Piątkiewicz, W., Narloch, P., Wólczyńska, Z., **Mańczak, J.** (2025). Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp-Lime Composites. *Materials (Basel)*, 18(3458), doi:10.3390/ma18153458.
Mój wkład liczył 5% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłam w przygotowaniu testów.

Joanna Mańczak

Zuzanna Wólczyńska
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

9.05.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Piątkiewicz, W., Narloch, P., **Wólczyńska, Z.**, Mańczak, J. (2025). Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp-Lime Composites. *Materials (Basel)*, 18(3458), doi:10.3390/ma18153458.
Mój wkład liczył 5% całej pracy.

Ponadto oświadczam, że aktywnie uczestniczyłam w przygotowaniu testów.

Zuzanna Wólczyńska

Inż. Igor Wasilewski
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

2.06.2026

Deklaracja o współpracy

Niniejszym potwierdzam moje współautorstwo w następujących pracach:

- Gołębiewski, M., Narloch, P., Piątkiewicz, W., **Wasilewski, I.** (2023). Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Materiały Budowlane*, 613, 13–19, doi:10.15199/33.2023.09.
Mój wkład liczył 10% całej pracy.

Igor Wasilewski

10.2. Publikacja [1]

www.zamopisma.pan.pl		www.journals.pan.pl	
			
WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Index 351733		DOI: 10.24425/ace.2020.134409	
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING		ARCHIVES OF CIVIL ENGINEERING	
COMMITTEE FOR CIVIL AND WATER ENGINEERING			
POLISH ACADEMY OF SCIENCES	ISSN 1230-2045	Vol. LXVI	ISSUE 3
© 2020. W. Piątkiewicz, P. Narloch, B. Pietruszka.		2020	

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (CC BY-NC-ND 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the Article is properly cited, the use is non-commercial, and no modifications or adaptations are made.



INFLUENCE OF HEMP-LIME COMPOSITE COMPOSITION ON ITS MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES

W. Piątkiewicz¹, P. Narloch², B. Pietruszka³

The following work analyzes the effect of the composition of a hemp-lime composite on key mechanical and physical properties. The article contains results from testing the compressive strength, vapor permeability, and thermal conductivity of the composite, depending on the composition of the mix. The mixes differed from each other in binder composition and in the proportion of binder to hemp shives. The obtained results were compared with the results from other scientific literature. Based on this, conclusions were drawn that the binder composition is of secondary importance for the analyzed physical and mechanical properties of the hemp-lime composite. The main property that determines the values of the thermal conductivity coefficient as well as the compression strength is the density of the material, which depends on the proportion of binder to aggregate and the level of compaction of the mix. The value of the diffusion resistance coefficient of the analyzed material was very low regardless of the composition of the composite.

Key words:

Keywords: hemp-lime composite, hempcrete, compressive strength, thermal conductivity, vapour diffusion resistance factor, sustainable building material

¹ MSc., Eng., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland, e-mail: wojtek.piat@gmail.com

² PhD., Eng., Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland, e-mail: p.narloch@il.pw.edu.pl

³ PhD., Building Research Institute, Department of Thermal Physics, Acoustics and Environment, Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, Poland, e-mail: b.pietruszka@itb.pl

1. INTRODUCTION

1.1. HEMP-LIME COMPOSITE AS A SUSTAINABLE BUILDING MATERIAL

According to the United Nations Environment Programme, the construction industry is responsible for 36% of global energy consumption and almost 40% of total carbon dioxide emissions [1]. Embodied carbon dioxide emissions account for as much as 15% of the total calculated emissions for a building's entire lifetime [1]. Embodied emissions are a measure of the cumulative greenhouse gas emissions caused by the production, transport, and use of a specific product. As the energy efficiency of buildings increases, the percentage of embodied emissions out of the total greenhouse gas emissions released during a building's life cycle will increase. For a 100-year lifespan, embodied energy increases from 8% to 60% of the total energy consumption for buildings with a heating demand of 200 kWh/m²/year and 15 kWh/m²/year, respectively [2]. Accordingly, material and technological solutions with the lowest energy demand and the lowest possible carbon footprint should be sought.

A hemp-lime composite is a material that has a negative carbon footprint [3]. Due to the fact that this material is primarily composed of plants that absorb carbon dioxide during their lifetime, and the main binder component is hydrated lime, which needs carbon dioxide to be able to react, a lime-hemp composite is a great opportunity to reducing greenhouse gas emissions in construction [3], [4]. Hemp-lime composite is mainly used as a thermal insulating material that fills the skeletal structure of a building [3]. A commonly used method is to place fresh composite mix in a formwork between a wooden structure [5]. Hemp-lime composite is produced on the construction site [5].

An analysis was made in [3], in which five different external partitions were compared [Fig. 1]. Each had the same heat transfer coefficient value $U=0.125$ W/m²k, each was load bearing, and each had a lifespan of 60 years considering appropriate maintenance for each material. A wall of pressed straw blocks within a timber structure (Fig. 1, STRAW), a wall made of hemp-lime composite with a timber structure (Fig. 1, HEMPCRETE), a wall with a timber frame with glass wool (Fig. 1, TIMBER), a wall of ceramic blocks with EPS insulation (Fig. 1, BRICK), and a wall of reinforced concrete with EPS insulation (Fig. 1, CONCRETE) were compared. The authors used the Dynamic Life Cycle Assessment method, which takes into account, inter alia, carbon dioxide storage and the delay of its emission by plants [3]. The method also considers carbon dioxide absorption and greenhouse gas emissions distributed over time [3]. The authors analyzed various options for recycling and

reutilization of materials, as well as the time needed to renew resources. In Fig. 1 is shown a variant that assumes all non-biogenic materials are landfilled, while bio-based materials are temporarily transferred to a sanitary landfill [3]. The hemp-lime wall consisted partly of prefabricated blocks 30 cm thick joined with lime mortar and a 20 cm thick composite with a ratio of shive to binder 1:1 sprayed on. The binder was a mix of hydrated dolomite lime (80%) and cement (20%). The analysis showed that fast-growing plant materials such as straw or hemp significantly reduce a building's carbon footprint. It is worth noting that the timber frame wall with glass wool (Fig. 1, TIMBER), did not turn out to be much better than the wall made of ceramic blocks (Fig. 1, BRICK) due to the long time needed for forests to regrow and renew biomass, of which the partition was largely composed of [3].

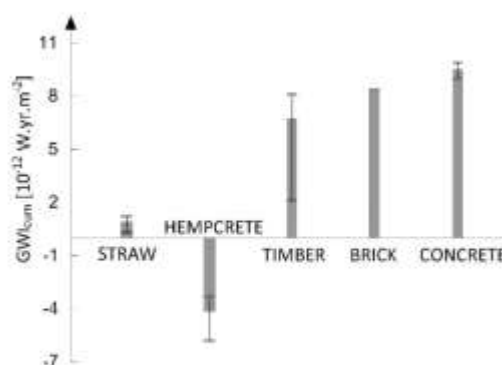


Fig. 1. Comparison of the cumulated Global Warming Impact (GWI_{cum}) for a 100 year period for partitions composed of various materials. The error bars represent the maximum and minimum deviations discussed in [3].

1.2. HEMP-LIME COMPOSITE COMPONENTS

The wooden part of a hemp plant is known as hemp shive. It accounts for 70% of the stem volume and is obtained in the process of decortication [6]. The structure of hemp shive is very porous with as much as 43% of its volume composed of air (total porosity of 57%) [6]. A network of closed pores with a size of 5 to 50 μm makes it a good heat-insulating material [6].

The main component of the binder is hydrated lime, accounting for 70-80% of the binder [6]–[15]. Other components include hydraulic lime, Portland cement and pozzolanic additives such as silica dust, fly ash or metakaolin [6]–[15]. These additives increase the compressive strength of the composite [12], [16].

Metakaolin is a pozzolana with a high degree of reactivity, which is formed by burning ground kaolin at a temperature of 650–800 °C [17]. A major advantage of this additive is an improvement in the durability of the material [2], [18], [19]. The metakaolin causes a reduction in the size of pores of the paste and the formation of denser and more stable hydrates. Hemp-lime composites where part of the binder is replaced with metakaolin are more resistant to sulphates, chlorides, freezing and thawing cycles, and alkaline reactions [2].

The main advantage of using metakaolin is its low environmental impact compared to other binder components. The energy consumption of the production process lower than for the production of Portland cement, hydrated lime, and hydraulic lime [2], [20]. Metakaolin may also be a by-product of the production process of porous glass granulate [7].

1.3. PROPERTIES OF HEMP-LIME COMPOSITE

1.3.1. MECHANICAL PROPERTIES

Hemp shives are flexible and porous, causing them to yield without breaking or tearing under applied loads. The material also exhibits high deformability under pressure [16]. Hemp-lime composite is not a structural material; depending on the density, the material can achieve a compressive strength from 0.05 MPa to 3.5 MPa [21]. Most often the value falls within the range of 0.18 to 0.85 MPa [22].

Based on the mode of failure, the compressive strength is determined in two ways. The first is the continuous loading of the sample until a change in the dependence of stress on deformation occurs, which appears at about 10% deformation [9]. In some tests, the maximum compressive strength is assumed to be at 20% deformation of the lime-hemp composite samples [12]. The ratio of binder to shives is crucial for keeping the composite together under loading [6], [7], [11], [14], [16]. As the material's density increases, so does its compressive strength [6], [7], [16], [8]–[15].

1.3.2. PHYSICAL PROPERTIES

The thermal conductivity coefficient of dry hemp-lime composite ranges from 0.06 (for a density of 250 kg/m³) to 0.138 W/mK (for a density of 627 kg/m³) [21]. The density of the composite has a major influence on its thermal conductivity [6]. According to [5], the value of the thermal conductivity coefficient of hemp-lime composite is also dependent on the type of binder. A higher content of hydraulic components increases the value of the thermal conductivity coefficient [5], [23].

On the other hand, according to [7], the binder composition has little effect on the thermal conductivity of hemp-lime composite.

The diffusion resistance coefficient for hemp-lime composite, depending on the density of the mix and the composition of the binder, ranges from 3.59 to 7.68 [21]. The main factor that affects the vapor permeability of a hemp-lime composite is the porous structure of hemp shive. Binders that have a smaller content of hydraulic components have a lower diffusion resistance coefficient [9]. Macropores between hemp particles have a greater influence on vapor permeability than micropores in the binder structure [9].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. MATERIALS

The study used a French strain of hemp "Futura 75". The hemp shive, which was partially separated from fiber, had a length of 5-25 mm. Binder components are shown in Table 1. The main ingredient of the binder was hydrated lime CL 90s according to EN 459-1:2003. In addition, hydraulic trass lime NHL 3.5 according to EN 459-1:2003 was also used. Metakaolin was used as a pozzolanic additive. To obtain different densities of composite, two proportions of aggregate to binder were used (Table 2). The amount of water used in the mixes as shown based on [6], [9], [14].

Table 1. Binder compositions used in referenced studies.

Binder Composition	Hydrated lime CL 90S	Hydrated lime NHL 3.5	Metakaolin „Astra MK 40"
I, II	80%	-	20%
III, IV	70%	15%	15%

Table 2. Proportions of ingredients for each series used in this study.

Proportion of ingredients in each series	Binder	Hemp Shive	Water
I	1.5	1	2.5
II	2	1	3.3
III	1.5	1	2.4
IV	2	1	2.8

The dry binder components were mixed first. Then $\frac{1}{4}$ by weight of water was added and mixed until a homogeneous suspension was obtained. Then hemp shives and the remaining water were added while stirring. All components were then combined in a mixer for 5-8 minutes until a homogeneous consistency was obtained. Before being placement into the mold, the mix was weighed in order to obtain the same density for all samples in a given series. The sample molds had been previously treated with an anti-adhesive agent. The lime-hemp composite was placed in layers of 5 cm and vigorously compacted with a 5x5 cm beater with a weight of 0.5 kg. Compaction of the mix was done to evenly distribute the material and eliminate irregular air voids. Cubic samples with dimensions of 10x10x10 cm, cylindrical samples with a diameter of 12.8 cm and height of 6 cm, as well as plate samples with dimensions of 30x30x6 cm were made. All samples were equally compacted. Samples were cured for 28 days at a temperature of $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ with a relative humidity of $65\pm 5\%$. After 24 hours the samples were demolded. Sample density was measured at ambient conditions.

2.2. METHODS

2.2.1. THERMAL CONDUCTIVITY TEST

The test was conducted in accordance with standard EN 12667 [24]. Immediately before testing, the samples were stored in a space with a temperature of $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of $50\pm 5\%$ until the mass stabilized. Thermal conductivity measurements were done in a stabilized state using the "hot plate" method in a FOX 314 plate apparatus (Fig. 2.). The temperature difference between the upper and lower plates was 20 K, with the sample temperature being 10°C . Heat flowed in a direction perpendicular to the molding direction, from the bottom to the top. The samples each had a dimension of 30x30 cm with a thickness of 6 cm. Tests were carried out on 10 samples of each series.



Fig. 2. Thermal conductivity test.

2.2.2. VAPOR PERMEABILITY TEST

The test was conducted in accordance with standard EN 12086 [25]. Immediately before testing, the samples were stored in a space with a temperature of $23 \pm 5^\circ\text{C}$ and relative humidity of $50 \pm 5\%$ until the mass stabilized with a 5% tolerance. Next, cylindrical samples with a diameter of 12.8 cm and a height of 6 cm were placed in metal dishes on the bottom of which was a drying agent (CaCl_2). Changes in mass were measured for a 24-hour period. The study was terminated when five consecutive changes in the mass per unit time are constant and housed within a tolerance of $\pm 5\%$ of the average for each sample tested. The tolerance for each test was 5% relative to the average of each sample. Tests were carried out on 10 samples of each series.

2.2.3. COMPRESSIVE STRENGTH TEST

The compressive strength test was carried out in a compression testing press. The machine allowed for a gradual application of loading, which was especially advantageous. A constant load increase of 1.5 kN/min was assumed. The test samples were cubes with sides of 10 cm. The samples were compressed in the direction of the layering of the mix, which is how hemp concrete works when made using the formwork method. Tests were carried out on 10 samples of each series.

3. RESULTS

3.1. COMPRESSIVE STRENGTH

Median values for the compressive strength results of all series are shown in Fig. 3. The compressive strength of Series II relative to Series I at 20% deformation increased by 78.12%. The increase in compressive strength between Series III and IV at 20% deformation was 50.86%.

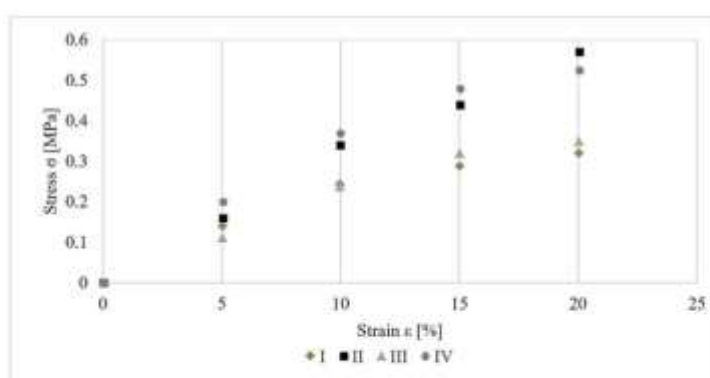


Fig. 3. Compressive strength (median) for each sample series.

3.2. THERMAL CONDUCTIVITY

The increase in the proportion of binder to aggregate caused a 22.71% increase in density between series I and series II, and 21.6% when comparing series III and series IV. Thermal conductivity coefficient results are shown in Fig 4. Thermal conductivity increased along with the density of the material. The type of binder had a secondary influence on sample density. Thermal conductivity increased along with the binder content in the composite mix. The average thermal conductivity coefficient of composite samples of series II was 3.47% higher than that of series I, while the average of series IV was 9.37% higher than that of series III. Series I had a worse thermal conductivity coefficient compared to series III by 5.92%. The smallest difference in thermal conductivity occurred between series II and IV, with a difference of 0.56%. The ratio of shives to binder had a significant impact on thermal conductivity.

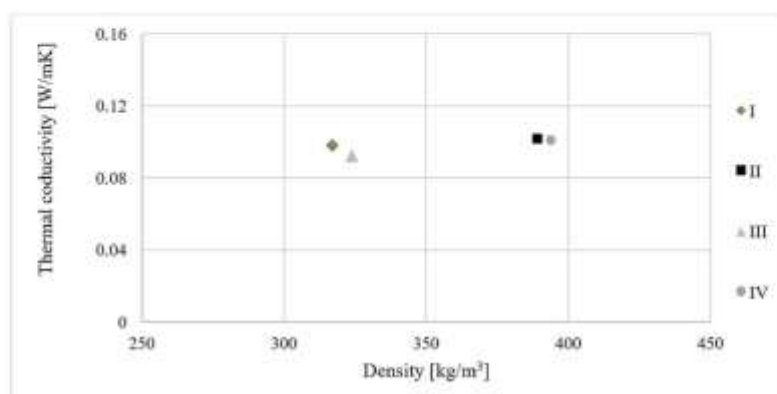


Fig. 4. Average thermal conductivity coefficient for each sample series.

3.3. VAPOR PERMEABILITY

The diffusion resistance coefficient of tested samples ranged from 4.2 to 6.45 (Fig. 5). The smaller the density was, the higher the value of thermal conductivity became. There was no significant difference between series I and III or series II and IV. Series II had a poorer vapor permeability than Series I by 13.4%, however, series IV differed from series III by 6.25%.

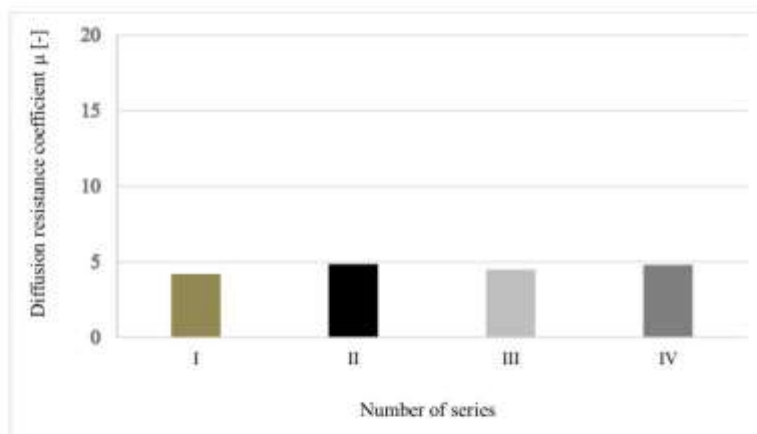


Fig. 5. Diffusion resistance coefficient for each series.

4. DISCUSSION

4.1. HEMP-LIME COMPOSITE THERMAL CONDUCTIVITY

Thermal conductivity values obtained by the authors or located in [6], [11], [15], [21], [26], [27] are shown in Fig. 6 and Table 3. All results were obtained through the same thermal conductivity testing method, in a plate apparatus. Test results are displayed with the various articles denoted by color, while compositions are marked by different shapes. An analysis of the results leads to the conclusion that the main factor affecting thermal conductivity is the density of the material. It was noted that thermal conductivity changes approximately linearly with increasing density, regardless of the composition of the mix. Changing the binder does not significantly change the density of the material. The material density is primarily determined by the ratio of binder to shives and the degree of compression. This implies that it is possible to design a material with thermal conductivity based on its density. A high ratio of shives to binder leads to the formation of a sizable amount of macropores in hemp-lime composites, in which the level of heat exchange is higher (Fig. 7). Therefore, although the density was lower, the thermal conductivity did not decrease significantly.

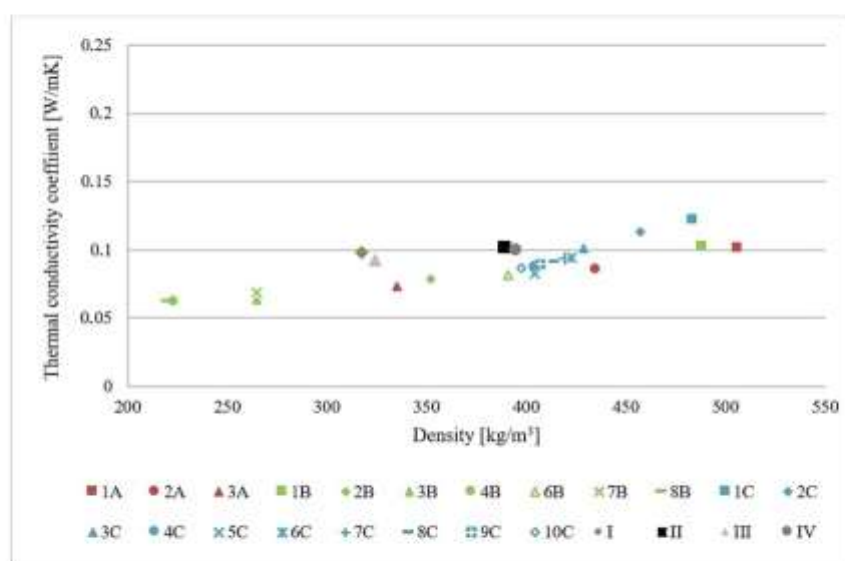


Fig. 6. Thermal conductivity coefficients of hemp-lime composite depending on the density of the material.

The author's results are named I, II, III and IV. Symbol descriptions are given in Table 3.



Fig. 7. The structure of hemp-lime composites with a hemp-lime ratio of 1:2 (right) and 1:1,5 (left).

Table 3. Detailed summary of hemp-lime composite mix components and their properties. Results obtained from this study have a gray background.

Source	Composite symbol	Density	Binder [%]								Proportions			Results					
			Hydrated lime		CEM II/B-V 32,5 R		Metakaolin	Fireclay mortar ZZSz 0-2	Loam	Gypsum	Hydraulic lime	Ground Granulated Blastfurnace Slag	Roman cement	Binder	Hemp shives	Water	Thermal conductivity coefficient [W/mK]	Compressive strength at 10% deformation [Mpa]	Compressive strength at 20% deformation [Mpa]
[27]	1A	506	28	24	24	24							1.4	1	0.93	0.102	-	-	3.6
	2A	435	27	24	24	25							1.37	1	0.97	0.085	-	-	3.8
	3A	335	25	25	25	25							1.33	1	1	0.073	-	-	4
[7]	1B	488	60		40								2.5	1	nd	0.103	0.435 ^a	-	-
	2B	352											2	1	nd	0.079	0.111 ^a	-	-
	3B	265											1	1	nd	0.064	0.071 ^a	-	-
	4B	223											0.75	1	nd	0.062	0.062 ^a	-	-
	5B	459	70		10					20			2.5	1	nd	0.101	0.570 ^a	-	-
	6B	391										2	1	nd	0.081	0.204 ^a	-	-	
	7B	265										1	1	nd	0.069	0.105 ^a	-	-	
	8B	220											0.75	1	nd	0.063	0.071 ^a	-	-
[6]	1C	483.5	70	15	15								2	1	2.8	0.122	-	0.32 ^b	-
	2C	457.1										1.83	1	2.65	0.113	-	0.29 ^b	-	
	3C	428.6										1.67	1	2.5	0.101	-	0.26 ^b	5.94	
	4C	404.4										1.5	1	2.35	0.088	-	0.23 ^b	-	
	5C	404.6	70	23		7						1.43	1	2.86	0.082	-	0.51 ^b	5.52	
	6C	423.1	75		10	15							1.8	1	2.79	0.094	-	0.44 ^b	5.82
	7C	419.5											1.7	1	2.67	0.093	-	0.37 ^b	-
	8C	414.6											1.6	1	2.56	0.091	-	0.32 ^b	-
	9C	407.1											1.5	1	2.45	0.089	-	0.28 ^b	-
	10C	397.7											1.4	1	2.31	0.086	-	0.22 ^b	-
Authors	I	317	80		20								1.5	1	2.5	0.098	0.244	0.32	-
	II	389											2	1	3.3	0.102	0.34	0.57	-
	III	324	70		15					15			1.5	1	2.4	0.093	0.24	0.348	-
	IV	394											2	1	2.8	0.101	0.37	0.525	-
[10]	2F	350										100	2	1	2	0.104	-	0.18 ^c	-

Legend:

^a 28 days curing (20±2 °C and 40±10% RH), samples 100x100x(80-93)mm, 10% relative deformations

^b 28 days curing (20±2 °C and 55±5% RH), samples 150x150x150mm, 20% relative deformations

^c 90 days curing (20 °C and 65% RH), cylindrical samples with diameter 100mm and height 200mm, 20% relative deformations

^d 28 days curing, samples 50x50x50mm, 20% relative deformations

^e 365 days curing (16±3 °C and 55±10% RH), samples 100x100x100mm, 10% relative deformations

^f 28 days-6months curing (20 °C and 50% RH), cylindrical samples diameter 160mm and height 320mm, 10% relative deformations

nd – no data

Table 4. (continued)

Source	Composite symbol	Density	Binder [%]								Proportions			Results			
			Hydrated lime	CEM II/B-V 32,5 R	Metakaolin	Fireclay mortar ZZSz 0-2	Loam	Gypsum	Hydraulic lime	Ground Granulated Blastfurnace Slag	Roman cement	Binder	Hemp shives	Water	Thermal conductivity coefficient [W/mK]	Compressive strength at 10% deformation [Mpa]	Compressive strength at 20% deformation [Mpa]
[12]	1G	515	100								2	1	3	-	-	0.69 ^d	-
	2G	510	80	20						2	1	3	-		0.73 ^d	-	
	3G	454							100	2	1	3	-		0.48 ^d	-	
	4G	435		20					80	2	1	3	-		0.35 ^d	-	
[9], [23]	1H	627	70	10			20			2	1	3.1	0.138	0.37 ^b	-	5.51	
	3H	564	70					30		2	1	3.1	0.126	0.41 ^c	-	5.56	
	4H	569					2		1	3.1	0.129	0.39 ^c	-	5.71			
	5H	508	80	20					2	1	3.3	0.117	0.34 ^c	-	5.42		
	6H	531						2	1	3.1	0.123	0.32 ^c	-	5.71			
[14]	1I	460						100		2.43	1	3.56	-	0.15 ^f	-	-	
	2I	480							2.45	1	3.04	-	0.27 ^f	-	-		
	3I	480							2.45	1	2.84	-	0.22 ^f	-	-		
	4I	390							1.99	1	3.18	-	0.31 ^f	-	-		
	5I	500							2.58	1	3.56	-	0.64 ^f	-	-		
	6I	460							2.43	1	3.56	-	0.44 ^f	-	-		
	7I	390	75	10				15		2.04	1	3.02	-	0.4 ^f	-	-	
	8I	250							0.98	1	2	-	0.2 ^f	-	-		
	9I	400							1.99	1	3.18	-	0.34 ^f	-	-		
	10I	430							1.99	1	3.18	-	0.22 ^f	-	-		

Legend:

^a 28 days (20±2 deg C i 40±10% RH), samples 100x100x(80-93)mm, to 10% relative deformations

^b 28 days (20±2 deg C i 55±5% RH), samples 150x150x150mm, deformation 20%

^c 90 days (20 deg C i 65% RH), cylindrical samples with diameter 100mm and height 200mm, at 20% deformation

^d 28 days, samples 50x50x50mm, 20% deformation

^e 365 days (16±3 deg C and rel. humidity 55±10%), samples 100x100x100mm, „10% deformation“

^f 28 days-6months (20 degC i 50% RH), cylindrical samples diameter 160mm and height 320mm, at 10% deformation

nd – no data

4.2. HEMP-LIME COMPOSITE COMPRESSIVE STRENGTH

As mentioned earlier, the compressive strength of the hemp-lime composite is determined for different levels of deformation (Table 3). A comparison of results, however, is difficult due to the authors' use of separate articles containing samples of different shapes, humidity and curing times, and different methods for determining compressive strength. The highest compressive strength was achieved by the "2G" series [12], whose value was 0.73 MPa. Linseed oil was used in this study, which reduced aggregate water content and thus increased compressive strength. As can be seen, despite many variables, the compressive strength of the hemp lime composite is low, ranging from 0.062 to 0.73 MPa.

The results of compressive strength at 10% deformation, conducted on 100x100x100 mm cubic samples, are compared with each other in Fig. 8. The results obtained by the authors do not differ significantly from the results from [7], and are less than 0.6 MPa. This means that hemp-lime composite should not be used structurally. Analysis of the graph in Fig. 8 suggests that the compressive strength depends primarily on the density of the material, which in turn depends on the ratio of shives to binder and the method of compacting the mix. The level of compression in the analyzed results was the same. Binder composition has a secondary effect on the density of the material.

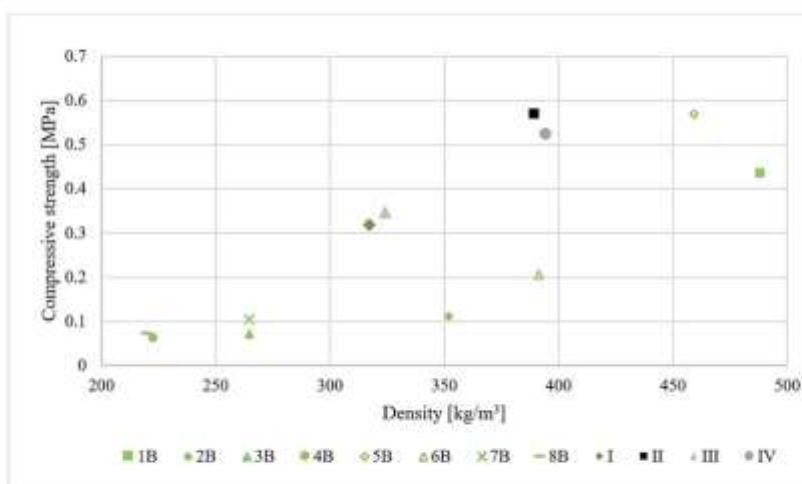


Fig. 8. Summary of compressive strength results as determined at 10% deformation. Symbol descriptions are given in Table 3.

4.3. HEMP-LIME COMPOSITE VAPOR PERMEABILITY

The vapor permeability of hemp-lime composite is described in [6], [23], [27]. The results obtained by the authors are very similar (Table 3, Fig. 5). It can be seen in Fig. 9 that the vapor permeability of hemp lime composite is slightly affected by the density and composition of the binder. The diffusion resistance coefficient of hemp-lime composite is small, ranging from about 4-6. This is valuable information that allows you to design the flow of vapor through partitions containing a layer of hemp-lime composite thermal insulation.

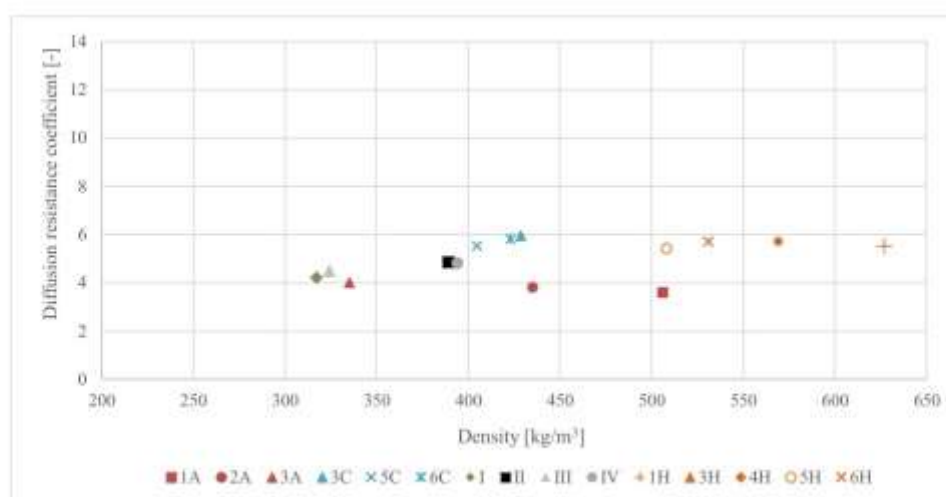


Fig. 9. Comparison of diffusion resistance coefficient results. Symbol description are given in Table 3.

5. CONCLUSIONS

Throughout the course of this study, it has been shown that density has a significant impact on the properties of hemp-lime composite. Also demonstrated is that density is dependent on the ratio of binder to aggregate. The type of binder used has a minor influence on the material's properties. For this reason, it is recommended to use the most ecological binders, such as metakaolin, so that the environmental impact of the material is minimized.

Analysis of the results concludes that the material should be expected to have a density of about 380 kg/m³. This density is obtained for a binder to shive ratio of 2. At higher shive contents, a sizable

amount of macropores is created, which reduces the thermal conductivity, while also decreasing the compressive strength.

The compressive strength of lime-hemp composite after 28 days of curing does not depend on the composition of the binder used in the mix. This property is primarily associated with the ratio of binder to shive. For the composites tested, the compressive strength ranged from 0.32 to 0.57 MPa at 20% deformation. A material with such a compressive strength is not recommended to be used structurally. When designing a hemp-lime composite, the key task should be to achieve such a compressive strength as to allow it to perform a self-supporting function while having the lowest possible thermal conductivity coefficient.

The composition of the hemp-lime composite does not have a significant influence on diffusion resistance, which in this study resulted in a value of 4-5. High vapor permeability can be both an advantage and a disadvantage, due to the possibility of condensation in the outer partition, among other effects. Therefore, a low value of diffusion resistance should be considered when designing the building envelope of hemp-lime composite buildings.

A major advantage of hemp-lime composite is its negative carbon footprint. Directing attention to the environmental cost of the material when planning an investment appears to play a key role in the dissemination of hemp-lime composite.

REFERENCES

- [1] Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency, i The United Nations Environment Programme (2019), „2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.”, 2019.
- [2] A. Sofiane i A. Laurent, *Bio-aggregate-based building materials : applications to hemp concretes*, 1. wyd. John Wiley & Sons, Incorporated, 2013.
- [3] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia, i G. Habert, „Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls”, *Build. Environ.*, t. 129, nr August 2017, ss. 117–129, 2018.
- [4] M. Sinka, A. Korjakins, i D. Bajare, „Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies”, nr June, 2015.
- [5] F. Collet i S. Pretot, „Thermal conductivity of hemp concretes : Variation with formulation , density and water content”, *Constr. Build. Mater.*, t. 65, ss. 612–619, 2014.
- [6] P. Brzyski, „Hemp-lime composite as wall material meeting the requirements for sustainable development in construction industry”, Lublin University of Technology, 2018.
- [7] M. Sinka, P. Van Den Heede, N. De Belie, D. Bajare, i G. Sahmenko, „Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete”, *Resour. Conserv. Recycl.*, t. 133, nr February, ss. 288–299, 2018.
- [8] W. Stanwix i A. Sparrow, *The Hempcrete Book*. Cohabitat Foundation, 2016.
- [9] R. Walker, S. Pavia, i R. Mitchell, „Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes”, *Constr. Build. Mater.*, t. 61, ss. 340–348, 2014.
- [10] G. Delannoy i in., „Influence of binder on the multiscale properties of hemp concretes”, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, t. 8189, ss. 1–17, 2018.
- [11] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, i G. Sorrentino, „Thermal and structural properties of a hemp – lime biocomposite”, *Constr. Build. Mater.*, t. 48, ss. 745–754, 2013.
- [12] J. Sheridan i in., „Effect of linseed oil and metakaolin on the mechanical, thermal and transport properties of

- hemp-lime concrete", 2017.
- [13] S. Elfordy, F. Lucas, i F. Tancrét, „Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (‘‘ hempcrete ’’) manufactured by a projection process”, t. 22, ss. 2116–2123, 2008.
- [14] L. Arnaud i E. Gourlay, „Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes”, *Constr. Build. Mater.*, t. 28, nr 1, ss. 50–56, 2012.
- [15] J. Williams, M. Lawrence, i P. Walker, „The influence of the casting process on the internal structure and physical properties of hemp-lime”, *Mater. Struct.*, t. 50, nr 2, ss. 1–10, 2017.
- [16] K. Sandin, C. Nilsson, P. Brigitte, i D. Bruijn, „Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres”, t. 103, ss. 474–479, 2009.
- [17] P. L. Narloch, P. Woyciechowski, i P. Jęda, „The Influence of Loam Type and Cement Content on the Compressive Strength of Rammed Earth”, *Arch. Civ. Eng.*, t. 61, nr 1, ss. 73–88, 2015.
- [18] P. L. Narloch, P. Woyciechowski, E. Dmowska, i K. Halemba, „Durability Assessment of Monolithic Rammed Earth Walls”, *Arch. Civ. Eng.*, t. 61, nr 2, ss. 73–88, 2015.
- [19] P. Narloch i P. Woyciechowski, „Assessing Cement Stabilized Rammed Earth Durability in A Humid Continental Climate”, *Buildings*, t. 10 (26), ss. 1–20, 2020.
- [20] P. Narloch, P. Woyciechowski, J. Kotowski, I. Gawruchowicz, i W. Emilia, „The Effect of Soil Mineral Composition on the Compressive Strength of Cement Stabilized Rammed Earth”, *Materials (Basel)*, t. 13 (324), ss. 1–21, 2020.
- [21] U. Dhakal, U. Berardi, M. Gorgolewski, i R. Richman, „Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings”, *J. Clean. Prod.*, t. 142, ss. 3655–3664, 2017.
- [22] P. Brzyski i S. Fic, „Characteristics of lime-hemp composite and its use in construction industry”, *Bud. i Arch.*, t. 14, nr 2, ss. 11–19, 2015.
- [23] R. Walker i S. Pavia, „Moisture transfer and thermal properties of hemp – lime concretes”, *Constr. Build. Mater.*, t. 64, ss. 270–276, 2014.
- [24] „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”.
- [25] „EN 12086:2013 Thermal insulating products for building applications. Determination of water vapour transmission properties”.
- [26] M. Sinka, A. Pina, P. Ferrão, J. Fournier, B. Lacarrière, i O. Le Corre, „In-situ measurements of hemp-lime insulation materials for energy efficiency improvement”, *Energy Procedia*, t. 147, ss. 242–248, 2018.
- [27] E. Hausteijn, „Thermal insulation properties of the lime-cement composite with hemp shives”, *Ecol. Eng.*, t. 19, nr 4, ss. 72–78, 2018.

LIST OF FIGURES AND TABLES:

Fig. 1. Comparison of the cumulated Global Warming Impact (GWI_{cum}) for a 100 year period for partitions composed of various materials. [3]. The error bars represent the maximum and minimum deviations discussed in [3].

Rys. 1. Porównanie skumulowanego wpływu na globalne ocieplenie (GWI_{cum}) na okres 100 lat dla przegród wykonanych z różnych materiałów [3]. Paski dokładności wyników przedstawiają maksymalne i minimalne odchyłki dyskutowane w [3].

Fig. 2. Thermal conductivity test.

Rys. 2. Badanie współczynnika przewodności cieplnej.

Fig 3. Compressive strength (median) for each sample series.

Rys. 3. Wyniki wytrzymałości na ściskanie (mediana) dla poszczególnych serii próbek.

Fig. 4. Average thermal conductivity coefficient for each sample series.

Rys. 4. Średni współczynnik przewodzenia ciepła poszczególnych serii próbek.

Fig 5. Diffusion resistance coefficient for each series.

Rys. 5. Współczynnik oporu dyfuzyjnego dla poszczególnych serii.

Fig 6. Thermal conductivity coefficients of hemp-lime composite depending on the density of the material.

The author's results are shown in black. Symbol descriptions are given in Table 3.

Rys. 6. Współczynniki przewodzenia ciepła kompozytu wapienno-konopnego w zależności od gęstości materiału. Wyniki autorów pokazano kolorem czarnym. Objasnienie symboli z wykresu podano w Tabeli 3.

Fig. 7. The structure of hemp-lime composites with a hemp-lime ratio of 1:2 (right) and 1:1,5 (left).

Rys. 7. Struktury kompozytu wapienno-konopnego z proporcją paździerza do spoiwa 1:2 (po prawej) oraz 1:1,5 (po lewej).

Fig. 8. Summary of compressive strength results as determined at 10% deformation. Symbol descriptions are given in Table 3.

Rys. 8. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie określonej dla 10% odkształcenia. Objasnienie symboli z wykresu podano w Tabeli 3.

Fig. 9. Comparison of diffusion resistance coefficient results. Symbol description are given in Table 3.

Rys. 9. Zestawienie wyników współczynnika oporu dyfuzyjnego. Objasnienie symboli z wykresu podano w Tabeli 3.

Tab. 1. Binder compositions used in referenced studies.

Tab. 1. Składy spoiw zastosowane w badaniach.

Tab. 2. Proportions of ingredients for each series used in this study.

Tab. 2. Proporcje składników dla poszczególnych serii we własnych badaniach.

Tab. 3. Detailed summary of hemp-lime composite mix components and their properties. Results obtained from this study have a gray background.

Tab. 3. Szczegółowe zestawienie składów mieszanek kompozytów wapienno-konopnych i ich właściwości. Wyniki otrzymane w badaniach własnych wyszczególniono na szarym tle.

WPLYW SKŁADU KOMPOZYTU WAPIENNO KONOPNEGO NA JEGO WŁAŚCIWOŚCI

MECHANICZNE I FIZYCZNE

Słowa kluczowe: hempcrete, kompozyt wapienno konopny, konopie przemysłowe, wytrzymałość na ściskanie, przewodność cieplna, współczynnik oporu dyfuzyjnego, zrównoważony materiał budowlany

STRESZCZENIE

W pracy przeanalizowano wpływ składu kompozytu wapienno konopnego na kluczowe właściwości mechaniczne i fizyczne. Artykuł zawiera wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, paroprzepuszczalności oraz przewodności cieplnej kompozytu w zależności od składu mieszanek. Mieszanki różniły się między sobą składem spoiwa oraz proporcjami spoiwa do paździerza konopnych. Uzyskane wyniki porównano z wynikami z innej literatury naukowej. Na tej podstawie sformułowano wnioski, że skład spoiwa ma drugorzędne znaczenie na analizowane właściwości fizyczne i mechaniczne kompozytu wapienno konopnego.

W toku badań i analiz wyników wykazano, że kluczowy wpływ na właściwości kompozytu wapienno konopnego ma jego gęstość. Wykazano również, że zależy ona od proporcji spoiwa do kruszywa. Rodzaj zastosowanego spoiwa ma drugorzędne znaczenie dla właściwości materiału. Z tego powodu zaleca się stosować spoiwa jak najbardziej ekologiczne, takie jak metakaolin, aby wpływ materiału na środowisko był jak najniższy.

Analiza wyników, prowadzi do wniosku, że materiał powinien charakteryzować się gęstością wynoszącą około 380 kg/m³. Taką gęstość uzyskuje się dla proporcji spoiwa do paździerza wynoszącej 2. Przy większej ilości paździerza powstaje duża ilość makroporów, przez co przewodność cieplna nie zmniejsza się, natomiast wytrzymałość na ściskanie tak.

Wytrzymałość na ściskanie kompozytu wapienno konopnego po 28 dniach sezonowania nie zależy od składu spoiwa użytego w mieszance. Cecha ta związana jest przede wszystkim z proporcją spoiwa do paździerza. Dla zbadanych kompozytów wytrzymałość na ściskanie wynosiła od 0.32 do 0.57 MPa przy 20% odkształceniu. Materiał o takiej wytrzymałości na ściskanie nie jest rekomendowany by pełnić funkcję konstrukcyjną. Przy projektowaniu kompozytu wapienno konopnego kluczowym zadaniem jest uzyskanie wytrzymałości na ściskanie pozwalającej na pełnienie funkcji samonośnej przy możliwie niskim współczynniku przewodności cieplnej.

Skład kompozytu wapienno konopnego nie ma większego wpływu na współczynnik oporu dyfuzyjnego, który w przeprowadzonych badaniach wyniósł zaledwie od 4-6. Wysoka paroprzepuszczalność może być zarówno zaletą jak i wadą m.in. ze względu na możliwość kondensacji pary wodnej w przegrodzie zewnętrznej. Dlatego też należy uwzględnić niską wartość oporu dyfuzyjnego przy projektowaniu przegród zewnętrznych budynków z kompozytu wapienno konopnego.

Dużą zaletą kompozytu wapienno konopnego jest jego ujemny ślad węglowy. Zwrócenie uwagi na koszt środowiskowy materiału przy planowaniu inwestycji wydaje się być kluczowy dla rozwoju kompozytu wapienno konopnego.

Received: 10.03.2020 Revised: 09.04.2020

10.3. Publikacja [2]

mb0904

NAUKA W BUDOWNICTWIE – WYBRANE PROBLEMY

Artykuł przeglądowy (Review paper)

MATERIALY BUDOWLANE SCIENCE

materiałybudowlane.info.pl/science

2

dr inż. arch. Michał Golebiewski^{1)*}

ORCID: 0000-0001-7206-0369

dr inż. Piotr Narloch²⁾

ORCID: 0000-0002-5112-4498

mgr inż. Wojciech Piątkiewicz²⁾

ORCID: 0000-0001-6986-8041

inż. Igor Wasilewski²⁾

Trwałość kompozytów wapienno-konopnych w świetle różnych metod badawczych

Durability of hemp-lime composites in the light of various research methods

DOI: 10.15199/33.2023.09.

Streszczenie. Kompozyt wapienno-konopny (hempcrete) stosowany jest w budownictwie od ponad 30 lat. Głównymi jego zaletami są właściwości cieplno-wilgotnościowe oraz niewielki wpływ na środowisko. Artykuł przedstawia literaturowy przegląd metod badawczych i wyników badań w celu opisanego trwałości kompozytu. Materiał wykazuje odporność na zmienne warunki wilgotnościowe oraz korozję biologiczną i chemiczną, ale w kontakcie z wodą traci wytrzymałość mechaniczną. Przegląd literatury wskazuje na złożoność problematyki oraz liczne ograniczenia techniczne i metodologiczne skutkujące brakiem jednoznacznych wniosków.

Słowa kluczowe: kompozyt wapienno-konopny; trwałość; zrównoważone budownictwo.

Abstract. Hemp-lime composite (hempcrete) has been used in construction for over 30 years. The main advantages of the material are thermal and hygric properties and low environmental impact. The article presents a literature review of research methods and experimental results in order to describe the durability of the composite. The material is resistant to changing humidity conditions as well as biological and chemical corrosion, and at the same time loses its mechanical strength in contact with water. The literature review indicates the complexity of the issues and numerous technical and methodological limitations resulting in the lack of clear conclusions.

Keywords: hemp-lime composite; durability; sustainable construction.

Poszukiwanie ekologicznych rozwiązań stosowanych w budownictwie jest istotne z uwagi na znaczne oddziaływanie tego sektora na środowisko naturalne [1]. Coraz szerzej wykorzystuje się więc nowe materiały budowlane zawierające komponenty pochodzenia roślinnego [2]. Pozwala to na zminimalizowanie: zużycia surowców nieodnawialnych; emitowanych gazów cieplarnianych oraz produkowanych odpadów.

Surowcem, który znalazł zastosowanie w budownictwie, jest paździerz konopny produkowany z rozdrobnionych rdzeni łodyg konopi przemysłowych. Roślina ta wzrasta szybko, absorbując dużą ilość CO₂, wymaga niewielkiego nawożenia i środków ochrony roślin oraz ma korzystny wpływ na glebę [3]. Surowiec konopny wykazuje dużą odporność na korozję biologiczną – konopie produkują liczne związki chemicz-

ne o działaniu przeciwdrobnoustrojowym [4]. Mieszanina paździerza, wapna hydratyzowanego (najczęściej modyfikowanego cementem, wapnem hydraulicznym i pucolanami) oraz wody tworzy kompozyt wapienno-konopny (hempcrete), który w zależności od składu i technologii wytwarzania może mieć różne właściwości [5, 6]. Najczęściej wykorzystuje się kompozyt o przeznaczeniu termoizolacyjnym, w którym wagowy udział spoiwa jest ok. dwukrotnie większy niż kruszywa. Charakteryzuje się on gęstością objętościową w stanie suchym 300 ÷ 600 kg/m³, małą wytrzymałością mechaniczną < 1 MPa [7, 8], małym współczynnikiem przewodzenia ciepła 0,07 ÷ 0,14 W/mK [9, 10] oraz małym współczynnikiem oporu dyfuzyjnego ok. 5 [8, 11]. Porowatość kompozytu wynosi 75 ÷ 82% [12]. Zaletą materiału jest jego niewielkie oddziaływanie na środowisko, co wyraża się m.in. niewielkim śladem węglowym [13].

Wapno łączone z różnymi materiałami pochodzenia organicznego stosowano w budownictwie od wieków m.in. ze

względem na sprawdzoną trwałość. Kompozyt wapienno-konopny stworzono pod koniec lat osiemdziesiątych XX w. w związku z pracami renowacyjnymi zabytkowych konstrukcji drewnianych, gdzie przydatność materiału została udowodniona empirycznie [14]. W nowych budynkach materiał ten stosowany jest do wykonywania pionowych przegród monolitycznych i murowanych (najczęściej wraz z drewnianą konstrukcją szkieletową), pionowych i poziomych warstw izolacyjnych, a także tynków i wypełnień prefabrykatów wielkoformatowych [15]. W Polsce pierwszy budynek w tej technologii powstał w 2011 r., a w ciągu dziesięciu lat materiał wykorzystano w co najmniej pięćdziesięciu realizacjach i ich liczba dynamicznie się zwiększa [16].

Paździerz konopny poddany cyklowi nawilżania i suszenia lub oddziaływaniu zewnętrznych warunków atmosferycznych wykazuje ubytek masy, fluktuacje objętości cząstek i zmianę porowatości oraz struktury porów [17]. Kompozyt wapienno-konopny bardzo łatwo wchłania wilgoć. Jego nasiąkliwość wagowa

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii

Lądowej

* Adres do korespondencji: michal.golebiewski@pw.edu.pl



wynosi $89 \pm 148\%$ [18]. W warunkach nasycenia powietrza parą wodną materiał absorbuje parę w ilości 20% swojej masy [19]. Ponadto, dojrzewa nawet do kilku miesięcy, w zależności od warunków środowiskowych oraz składu mieszanki [13], co zwiększa ryzyko korozji biologicznej. Istnieją więc obawy o możliwość utraty właściwości materiału w dłuższym okresie.

Artykuł porusza wybrane aspekty trwałości kompozytu wapienno-konopnego, istotne ze względu na jego coraz powszechniejsze wykorzystanie w budownictwie.

Metody oceny właściwości kompozytu wapienno-konopnego

W zależności od warunków środowiskowych, materiały budowlane mogą ulegać zmianom mikrostruktury. Można je oceniać in situ (wystawiając na działanie naturalnych warunków klimatycznych) lub w laboratorium za pomocą testów przyspieszonego starzenia. Zwykle określa się wpływ cykli nasycania wodą i suszenia lub działania środowiska o różnej wilgotności względnej powietrza na właściwości mechaniczne materiału. Innym badaniem, które odzwierciedla naturalne warunki pogodowe, jest test mrozoodporności, polegający na cyklicznym zamrażaniu i rozmrażaniu nasyconych próbek.

W związku z tym, że hempcrete jest materiałem pochodzenia roślinnego, testy trwałości uwzględniają również ryzyko biodegradacji. Badanie współczynnika pH może pomóc zdiagnozować problemy związane z korozją, erozją lub innymi uszkodzeniami, które wynikają z reakcji chemicznych między materiałem a jego otoczeniem. Odporność kompozytu na sole (chlorek sodu) jest istotna ze względu na potencjalną degradację materiału w środowisku narażonym na ich działanie. Zakres badań trwałości kompozytu wapienno-konopnego przedstawiono w tabeli 1.

Cykliczne nasycanie wodą i suszenie. Jedną z metod oceny trwałości polega na cyklicznym całkowitym nasyceniu wodą próbek materiału, a następnie suszeniu ich do stałej masy oraz określeniu spadku ich wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami

Tabela 1. Metody oceny trwałości kompozytu wapienno-konopnego w publikacjach naukowych
Table 1. Methods of evaluating the durability of the hemp-lime composite in scientific publications

Źródło	Cykliczne nasycanie wodą i suszenie	Cykliczne zmiany wilgotności względnej otoczenia	Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie	Ekspozycja na NaCl	Korozja chemiczna	Pomiar pH
[20]	x					x
[21]	x					x
[22]	x	x				
[23]		x			x	x
[24]		x				
[25]				x	x	
[26]			x	x	x	
[27]			x			
[28]			x			
[29]					x	x

referencyjnymi. Badania tego typu opisano w [20 – 22]. Ze względu na brak wytycznych normowych, autorzy przyjmowali różne parametry do badań oraz poddawali badaniom serie próbek kompozytów o różnej proporcji składników mieszanki. Wszystkie testy wykazały istotny spadek wytrzymałości na ściskanie (tabela 2).

W artykule [20] próbki poddano 15, 25 i 50 cyklom. Każdy cykl trwał 5 dni i obejmował zanurzenie próbki w wodzie na 45 h i suszenie przez 75 h. Wraz ze wzrostem liczby cykli próbki traciły masę (rysunek 1) i zwiększały swoją porowatość otwartą [20]. Ubytek masy był

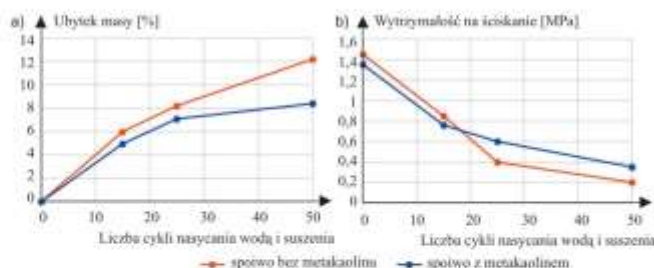
największy w przypadku serii niezawierającej metakaolinu. Ochronny efekt reakcji pucolanowej, zwiększając spójność matrycy, prowadził do mniejszej degradacji próbek, co z kolei wiązało się z mniejszym, choć nadal znacznym, spadkiem wytrzymałości na ściskanie (rysunek 1). Przed testem przyspieszonego starzenia próbki z metakaolinem wykazywały o 0,1 MPa mniejszą wytrzymałość na ściskanie, gdyż reakcja pucolanowa ma wolniejsze tempo utwardzania w porównaniu z reakcją spoiwa wapiennego [30]. Inne cechy mechaniczne: zmiana sprężystości i wytrzymałości na zginanie potwierdziły większą trwałość próbek z metakaolinem, które były mniej kruche i bardziej plastyczne.

Podobna ocena trwałości została zastosowana w pracy [21]. Badanie obejmowało cykle składające się z nasycania próbek wodą przez 48 h, a następnie suszenia w temperaturze 50°C przez 72 h. Zaobserwowano zmiany mikrostrukturalne, spowodowane zjawiskami pęcznienia i skurczu oraz słabą przyczepnością paździerz do spoiwa. Zmierzony współczynnik rozszerzalności materiału wyniósł 0,95 (‰‰w), czyli znacznie więcej niż współczynnik rozszerzalności drewna (ok. $0,4 \text{ ‰‰w}$).

Tabela 2. Zmiana wytrzymałości na ściskanie pod wpływem cyklicznego nasycania wodą i suszenia próbek kompozytu wapienno-konopnego w badaniach [20 – 22]
Table 2. Change in compressive strength under the influence of cyclic saturation and drying of the hemp-lime composite samples in tests [20 – 22]

Źródło	Spoiwo	Proporcje masowe: spoiwo, paździerz, woda	Gęstość w stanie suchym [kg/m^3]	Opis cykli nasycania wodą i suszenia		Wytrzymałość na ściskanie		
				czas dojrzewania próbek [dni]	czas suszenia [dni]	liczba cykli	średnia wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych [MPa]	średnia wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych cyklicznemu [MPa]
[20]	Tradical PF70*	37% 11% 52%	530 (po 28 dniach)	28	250	50	1,45	0,20
	80% Tradical PF70*, 20% Metakaolin	35% 11% 54%	520 (po 28 dniach)				1,35	0,35
[21]	Tradical PF70*	34% 16% 50%	nie podano	–	40	8	0,94	0,46
[22]	Naturalny cement Vicat Prompt	17% 33% 50%	nie podano	–	220	20	ok. 0,5	ok. 0,3
		16% 32% 47%**	nie podano	–	240		ok. 1,25	ok. 0,95

* spoiwo handlowe o składzie ogólnym: wapno hydratyzowane 75%, wapno hydrauliczne 15%, cement 10%; dodatki; ** mieszanka zawiera 5% środka modyfikującego lepkość – kwas poliakrylowy.



Rys. 1. Utrata masy (a) oraz zmiana wytrzymałości na ściskanie (b) próbek hempcrete po cyklach nasycania wodą i suszenia w badaniu [20]
Fig. 1. Weight loss (a) and change in compressive strength (b) of hempcrete samples after water saturation and drying cycles in the test [20]

Wskazuje to na dużą wrażliwość paździerz konopnych na działanie wody. Zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie między próbkami poddanymi badaniu a próbkami referencyjnymi (tabela 2).

W pracy [22] próbki zanurzano w wodzie na 5 lub 7 dni oraz suszono przez 6 dni. Zauważono, że w kolejnych cyklach próbki absorbowały większą ilość wody. Analiza SEM uwidoczniła, że mikrostruktura kompozytu została uszkodzona, a duża część spoiwa wypłukana, zwiększając porowatość i umożliwiając większą absorpcję wody przez paździerz. Próbkę z dodatkiem kwasu poliakrylowego wykazywały mniejszą absorpcję wody, ponieważ substancja ta powoduje zwiększenie gęstości i zmniejszenie porowatości kompozytu [31]. W miarę postępu badań próbki te zwiększały nasiąkliwość. Odnotowano też propagację pęknięć i rozszerzanie porów. Dodatek kwasu poliakrylowego poprawił początkowe właściwości materiału, co umożliwiło jego bardziej widoczną degradację podczas cykli postarzenia. Powierzchnia próbek uległa zmniejszeniu, co wskazuje na możliwe problemy w przypadku aplikacji materiału w budynku.

Cykliczna zmiana wilgotności względnej otoczenia. Inna metoda przyspieszonego starzenia została opisana w [22 – 24]. W pracy [23] badano kompozyt o proporcjach wagowych: spoiwo 33,5%; paździerz 17%; woda 49,5%, wytworzony z zastosowaniem cementu naturalnego oraz dwóch rodzajów paździerza. Próbkę sezonowano 7 dni w formach, 83 dni w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej

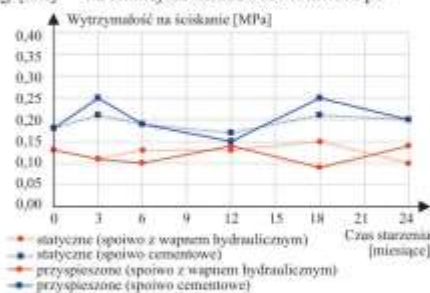
$50 \pm 10\%$ oraz przez 10 dni suszono w temperaturze 40°C . Następnie poddano je ośmiu cyklom zmiany wilgotności otoczenia pomiędzy 40 a 90/98% przy stałej temperaturze 30°C . Po 75 dniach testu gęstość próbek nieznacznie zwiększyła się, a porowatość zmniejszyła, co wytłumaczono postępującą hydratacją spoiwa, karbonatyzacją oraz spęsznieniem paździerza. Analiza mikroskopowa wykazała dobrą kohezję składników i potwierdziła brak pełnej hydratacji. Nie zaobserwowano istotnych zmian w przewodności cieplnej ani właściwościach akustycznych kompozytu [23].

W badaniu opisanym w [24] po okresie utwardzania (7 dni w formach, 81 dni w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 65%) i suszenia (2 dni w temperaturze 40°C) próbki poddano dwóm różnym warunkom starzenia przez 2 lata. Pierwszym było sezonowanie w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 50% (starzenie statyczne), a drugim w stałej temperaturze 30°C i przy cyklicznej zmianie wilgotności względnej (starzenie przyspieszone). Jeden cykl obejmował 5 dni o wilgotności 98% i 2 dni o wilgotności 40%. Próbkę badano po utwardzeniu oraz po 3, 6, 12, 18 i 24 miesiącach starzenia. Badaniom poddano dwie serie o proporcjach: spoiwo 40%; paździerz 20%; woda 40%, różniące się spoiwem – pierwsze składały się w 70% z naturalnego wapna hydraulicznego i w 30% ze spoiw hydraulicznych, pucolanów i adiuwantów, a drugie w 100% z cementu naturalnego. W przypadku różnych warunków

kondycjonowania próbek nie zaobserwowano istotnej zmiany wytrzymałości na ściskanie w długim okresie (rysunek 2). Próbkę zawierającą spoiwo cementowe uzyskały większą wytrzymałość w porównaniu z pozostałymi analizowanymi. Prawdopodobnie wynikało to z niepełnego uwodnienia spoiw [24].

W badaniu opisanym w [22], próbki kompozytu (tabela 2) poddano oddziaływaniu zewnętrznych warunków atmosferycznych (Belfast, Irlandia Płn.) przez ok. 1 rok, a następnie przeprowadzono test wytrzymałości na ściskanie. Zarówno próbki zawierające, jak i niezawierające kwasu akrylowego zwiększyły wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z próbkami testowanymi 28 dni po wytworzeniu – odpowiednio z ok. 1,25 do ok. 2,25 MPa oraz z 0,5 do ok. 0,8 MPa, prawdopodobnie na skutek dodatkowej karbonatyzacji, która zaszła w okresie sezonowania.

Pomiar współczynnika pH. Roztwór o wysokim pH powoduje rozpuszczanie składników ligniny, hemicelulozy i celulozy [32] i dlatego zbyt duża zasadowość ($\text{pH} > 13$) w porach negatywnie wpływa na trwałość paździerza konopnych. W badaniu [20] przy długim czasie sezonowania/wielu cyklach nasycania, próbki bez metakaolinu (tabela 2) wykazały niebezpiecznie wysoki współczynnik $\text{pH} = 13,0$ w porównaniu z pH próbek referencyjnych równym 13,6. Płyn bogaty w wolne jony Ca^{2+} z rozpuszczalnych składników wodorotlenku wapnia, infiltrując cząstki konopi, odpowiada za degradację celulozy [33]. Zaobserwowano, że dodatek metakaolinu zmniejsza zasadowość roztworu po-



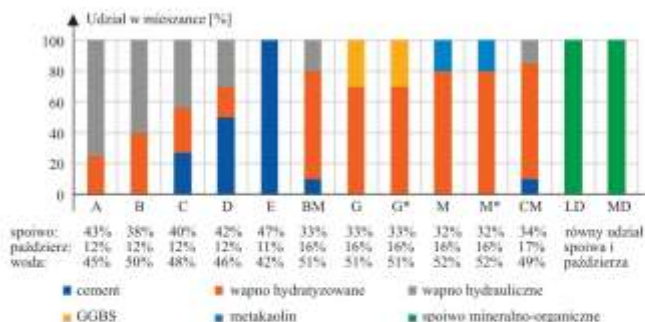
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie próbek hempcrete w funkcji czasu badania [24]
Fig. 2. Compressive strength of hempcrete samples as a function of test time [24]

rowego: w wyniku cyklu nasycania wodą pH próbek zmniejszyło się do wartości 11,4 w stosunku do pH próbek referencyjnych o wartości 13,4. Analizy mikrostruktury cząstek konopi wyekstrahowanych z próbek wykazały mniejszy stopień ataku alkalicznego w kompozycji z metakaolinem [20]. Inne wyniki prezentuje praca [21], gdzie próbki poddane i niepoddane cyklom postarzania (tabela 2) wykazały podobną wartość pH, odpowiednio 11,64 i 11,84.

W pracy [29] wykonano pomiary pH kompozytów niepoddawanych cyklom postarzania. W przypadku materiałów o zróżnicowanych proporcjach komponentów, spoiwie i gęstości otrzymano zbliżone wyniki w zakresie $11,74 \pm 12,32$. Natomiast w badaniu [23] w kompozytach, w których zastosowano spoiwo z cementu naturalnego, zauważono spadek współczynnika pH z $10,4 \pm 10,5$ do $9,2 \pm 8,7$ w okresie 4 miesięcy od wytworzenia. Tak małe wartości autorzy uznali za niewystarczające do ochrony przed korozją biologiczną.

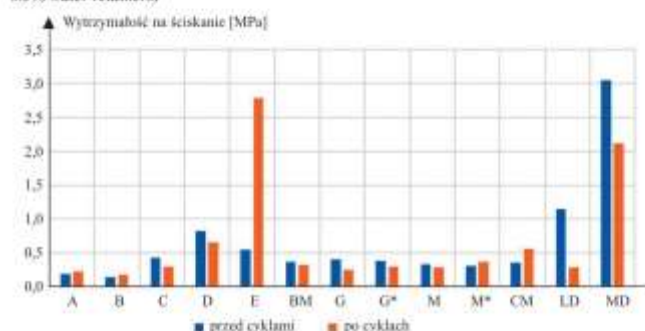
Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Dostępne badania literaturowe mrozoodporności kompozytu wapienno-konopnego określają tę cechę na różne sposoby. Próbkę w analizowanych badaniach różniły się składem spoiwa, gęstością, proporcjami komponentów (rysunek 3), sposobem przygotowania i sezonowania oraz wiekiem, co umożliwiła jedynie porównanie procentowej zmiany wytrzymałości między różnymi mieszankami (rysunek 4).

W badaniu [26] wykorzystano normę EN 15304:2010 dotyczącą autoklawizowanego betonu komórkowego. Pomiar wytrzymałości na ściskanie próbek wykonano po poddaniu ich dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania w temperaturze od -15 do 20°C , z jednoczesnym nasyceniem wodą (początkowo przez 48 h do uzyskania nasycenia 90% i dodatkowo przez 12 h po 4 i 8 cyklu). W badaniu [27] mrozoodporność zdefiniowano jako wytrzymałość na ściskanie po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania w temperaturze od -20 do 20°C ; próbki zanurzano w wodzie na 24 h przed zamrażaniem. Wykorzystywano próbki 4,5-miesięczne (w tym 40 dni w warunkach $4,5\% \text{CO}_2$) [27] i dziewięciomiesięczne [26].



Rys. 3. Skład spoiwa oraz proporcje wagowe składników kompozytów w badaniach: [27] (A-E); [26] (BM, G, G*, M, M*) i [28] (LD, MD) (* zawierają dodatkowo 0,5% substancji zatrzymującej wodę)

Fig. 3. The composition of the binder and the weight proportions of the composite components in the tests: [27] (A-E); [26] (BM, G, G*, M, M*) and [28] (LD, MD) (* additionally contain 0.5% water retainer)



Rys. 4. Zmiana wytrzymałości na ściskanie po cyklach zamrażania i rozmrażania: [27] (A-E); [26] (BM, G, G*, M, M*) i [28] (LD, MD) – skład próbek jak na rysunku 3

Fig. 4. Change in compressive strength after freezing and thawing cycles: [27] (A-E); [26] (BM, G, G*, M, M*) and [28] (LD, MD) – composition of samples as in Figure 3

W porównaniu z próbkami referencyjnymi odnotowano zarówno spadek, jak i wzrost wytrzymałości na ściskanie próbek poddanych testom (rysunek 4). Wyniki nie wydają się odzwierciedlać rzeczywistej odporności materiału na efekty zamrażania, lecz dowodzą jedynie, że proces wiązania spoiwa w materiale nie został zakończony.

W pracy [26] próbki referencyjne poddane jedynie nasycaniu wodą wykazały wyraźny wzrost wytrzymałości. Cykle zamrażania i rozmrażania miały większy wpływ na betony ze spoiwami wapienno-pulcowanymi (G, G*, M, M*) niż z dodatkami hydraulicznymi (BM). Większa wytrzymałość oraz mniejsza nasiąkliwość spoiw hydraulicznych (z powodu mniejszych porów)

okazała się istotniejsza niż zdolność absorpcji naprężeń przez duże pory [26], w przeciwieństwie do zapraw, gdzie większa zawartość spoiw hydraulicznych negatywnie wpływa na mrozoodporność [34]. Stwierdzono również, że dodatek środków zatrzymujących wodę zmniejsza utratę wytrzymałości [26].

W badaniu [27] kompozyty, w których spoiwami były mieszanki wapienno-hydraulicznego i hydraulicznego (A, B) lub sam cement (E), wykazały zwiększenie wytrzymałości, natomiast te, w których spoiwa zawierały wszystkie trzy substancje (C, D) – nieznaczny spadek. Duży wzrost wytrzymałości kompozytu cementowego (E) sugeruje, że musiało nastąpić dodatkowe uwod-

nienie spoiwa podczas namaczania próbek. Ogólną dobrą odporność na cykle zamrażania i rozmrażania wy tłumaczono dużą porowatością i „pseudoplastycznością” materiału [27].

Artykuł [28] przedstawia badania innowacyjnego kompozytu zawierającego spoiwo na bazie tlenku magnezu i białka roślinnego. Metoda wytwarzania materiału obejmowała zróżnicowaną kompresję w temperaturze 80°C [35]. Testom poddano m.in. kompozyty o gęstości objętościowej $330 \pm 640 \text{ kg/m}^3$. Procedura badania wg normy EN 321 dotyczącej płyt drewnopochodnych składała się z 3 cykli obejmujących: zanurzenie w wodzie o temperaturze $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ na 70 h, zamrożenie w temperaturze $-20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ przez 24 h, wysuszenie w temperaturze $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ przez 70 h, kondycjonowanie w temperaturze $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $50 \pm 5\%$ przez 4 h. 28 dni po zakończeniu cyklu próbki poddano badaniom m.in. wytrzymałości na ściskanie. Kompozyt o mniejszej gęstości wykazał większą utratę wytrzymałości, ale ubytek był znaczny w obu przypadkach (rysunek 4). Analizy mikroskopowe uwiarydliły zwiększone spękania i ubytki na styku spoiwa – paździerz, a także wzrost porowatości, prawdopodobnie z powodu rozpuszczenia fazy wiążącej. Autorzy zaznaczają, że test zakładał skrajnie niekorzystne warunki, jakim materiał nie będzie poddany w rzeczywistości [28]. Testy wytrzymałości na rozciąganie i zginanie kompozytu o gęstości 1210 kg/m^3 do zastosowania jako warstwa zewnętrzna przegrody wykazały bardzo nieznaczny spadek właściwości mechanicznych na skutek cykli zamrażania.

Korozja biologiczna. Odporność materiału na korozję biologiczną analizuje się w literaturze przez określenie wartości pH lub wprowadzenie mikroorganizmów do struktury materiału, ponieważ niektóre mogą żyć również w środowisku alkalicznym. Ich przetrwanie i możliwy rozwój obserwowany jest przez określony czas. Ta metoda została użyta w pracy [26], w której przebadano kompozyty zróżnicowane pod względem składu (rysunek 3 – BM, G, G*, M, M*, CM). Probki przechowywano przez 7 miesięcy w temperaturze 30°C , wilgotności względnej 80%

i okresowo nawilżano. Wielokrotnie wprowadzano do materiału wysokie stężenia mieszanek kultur mikroorganizmów powszechnie występujących w glebie i powietrzu o dużym stężeniu, np. *Aspergillus*, *Penicillium*, *Bacillus*. Mikroorganizmy szybko obumierały, a materiał nie wykazał oznak degradacji, co zostało wytłumaczone niewystarczającą dostępnością składników odżywczych lub specyficznymi warunkami środowiskowymi.

W badaniu [23] analizowano próbki o wagowych proporcjach: spoiwo 33% (cement naturalny), paździerz 17%, woda 50%. Seria próbek poddana cyklom zmiennej wilgotności w okresie 75 dni nie wykazała samoistnego rozwoju pleśni. Serie utrzymywane w stałych warunkach temperatury 30°C , wilgotności względnej 98% i poddane inokulacji pleśni przez 14 lub 120 dni od wytworzenia wykazały przetrwanie mikroorganizmów tylko w drugim przypadku, co wytłumaczono niewielkim współczynnikiem pH ($9,2 - 8,7$) starszego kompozytu na skutek większego stopnia karbonatyzacji.

W badaniu [25] analizie poddano kompozyty o proporcjach objętościowych spoiwa, paździerza i wody wynoszących 3 : 5 : 2,5 i dwóch rodzajach spoiwa wapiennego: powietrznym i hydraulicznym. W próbkach, które poddano symulacji klimatycznej przez 12 dni odzwierciedlających 12 miesięcy w klimacie śródziemnomorskim, tropikalnym i półpustynnym, zidentyfikowano m.in. powszechnie występujące zarodnikujące bakterie Gram-dodatnie (*Staphylococcus* i *Micrococcus*), a także różne grzyby nitkowate z rodzaju *Ascomycota* i drożdże podstawczaki. W gorącym i wilgotnym klimacie wystąpiła bardziej intensywna i zróżnicowana kolonizacja, ale nie zaobserwowano przewagi jednego rodzaju mikroorganizmów w zależności od warunków klimatycznych, chociaż są one głównym czynnikiem wpływającym na kolonizację [36]. Wyizolowane mikroorganizmy nie spowodowały zmian estetycznych ani uszkodzeń fizycznych podczas testów, ale autorzy podkreślają, że w rzeczywistych warunkach ich aktywność może być silniejsza i pociągać za sobą długoterminowe negatywne konsekwencje. Przyczyną roz-

kładu może być wykryty biofilm tworzony przez bakterie, który zamyka pory, zmniejszając kapilarne wchłanianie wody i paroprzepuszczalność kompozytu. Zwrócono uwagę, że na wyniki badań wpłynął niewielki potencjał wapna do kolonizacji biologicznej, ale można rozważyć zastosowanie zabiegów biocydowych (np. promieniowanie gamma, dodanie produktów przeciwdrobnoustrojowych lub nanocząstek) w celu lepszej ochrony materiału [25].

W pracy [29] badano kompozyty o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej. Wytworzono kompozyt referencyjny HC0 o proporcjach wagowych: spoiwo 53% (100% cementu), paździerz 10% oraz woda 37% i gęstości objętościowej ok. 382 kg/m^3 oraz 3 kompozyty o proporcjach odpowiednio 53; 10; 37%: HC1 – 655 kg/m^3 (100% wapna hydratyzowanego), HC2 – 988 kg/m^3 (60% wapna hydratyzowanego i 40% cementu) oraz HC3 – 1026 kg/m^3 (100% cementu). 1,5% masy spoiwa w kompozytach zawierających cement stanowił superplastifikator. Ponadto w przypadku kompozytów HC0 i HC3 dodano szkło wodne w ilości 2% masy wody. W materiał wprowadzono bakterie Gram-ujemne *Escherichia coli* i Gram-dodatnie *Staphylococcus epidermidis* oraz grzyby pleśniowe *Aspergillus niger*. Najlepsze właściwości przeciwdrobnoustrojowe wykazał materiał zawierający spoiwo wapienne (HC1).

Ekspozycja na działanie soli. Wpływ szkodliwego dla materiałów chlorku sodu sprawdzono w badaniu [26] przez 4-tygodniową ekspozycję 9-miesięcznych kompozytów (rysunek 3 – BM, G, G*, M, M*, CM) na działanie 5% roztworu NaCl w następujących cyklach: 12 h namaczania; 12 h suszenia, po czym próbki suszono przez 2 miesiące. Jednoroczne próbki poddano próbom wytrzymałości na ściskanie, które wykazały brak negatywnego wpływu ekspozycji materiału na sól. Małe pory sprzyjały krystalizacji soli – największy przyrost masy odnotowano w przypadku kompozytów zawierających spoiwa hydrauliczne. Sól krystalizowała głównie w warstwach wierzchnich. W opinii autorów brak uszkodzeń może być spowodowany krótkim czasem ekspozycji, dużą plastycznością

kompozytu umożliwiającą absorbowanie naprężeń oraz organicznym charakterem kruszywa, które może wykazywać mniejsze powinowactwo do soli [26].

W badaniu [25] próbki moczone w półnasyconym roztworze NaCl przez 1,5 h, suszono i poddawano symulacji opadów atmosferycznych. Mimo że analiza mineralogiczna wykazała większą absorpcję NaCl w przypadku kompozytu na bazie wapna powietrznego, to podobnie jak w [26] sól utworzyła warstwę powierzchniową, która była łatwo wmywana podczas opadów deszczu. Nie zaobserwowano istotnych zmian masy i barwy, ani rozpadu próbek. Zdaniem autorów [25], dzięki higroskopijności konopi, wilgoć na dłużej zostaje zatrzymana w kompozycie, co skutkuje mniej agresywnym działaniem soli w naturalnych cyklach namaczania i suszenia [25].

Wnioski

W omawianych badaniach stosowano różną długość i liczbę cykli starzenia oraz różne warunki sezonowania i przechowywania próbek, a także badano kompozyty różniące się m.in. sposobem wytwarzania i składem, co uniemożliwia proste porównywanie wyników, ale daje szerszy obraz zachowania się materiału w różnych warunkach. Istotnym problemem jest brak standardów badania wytrzymałości na ściskanie kompozytu, które są integralną częścią badania trwałości.

Określenie trwałości kompozytu wapienno-konopnego na podstawie badań uwzględniających nasycenie próbek wodą utrudnia problem nieukończonego procesu wiązania, szczególnie w ich głębszych warstwach. W pracy [37] oszacowano stopień karbonatyzacji spoiwa w hempcrete po roku na poziomie $44,2 \pm 76,8\%$. Różny wiek próbek poddawanych badaniom ma więc duży wpływ na otrzymywane wyniki. Innymi parametrami wpływającymi na karbonatyzację są: gęstość; proporcje komponentów; rodzaj spoiwa; sposób wytwarzania i warunki dojrzewania materiału, a także wielkość próbek. Obserwowane zjawisko może wynikać z faktu, że październik konopny pochłania dużo wody zarobowej, której brakuje do procesu wiązania (po 10-minutowym zanurzeniu osiąga nasycenie ok. 95%, pochłaniając ilość wody równą

ok. 250% swojej masy [38]). W badaniu [26] próbki referencyjne (poddane jedynie namaczaniu) zwiększyły swoją wytrzymałość, przy czym te, które zawierały największą ilość spoiwa hydraulicznego (CM), niemal dwukrotnie. W badaniu [27] próbki ze spoiwem cementowym (E) wykazały jeszcze większy przyrost wytrzymałości, co wyjaśniono dodatkową hydratacją na skutek dodania wody.

Jak wskazano w [39], na proces wiązania spoiw cementowych może mieć wpływ pektyna, która występuje w paździerz konopnym. Wykazuje ona powinowactwo z jonami wapnia i reaguje z nimi, a w efekcie są one niedostępne w procesie hydratacji. Prowadzi to do opóźnienia rozwoju wytrzymałości kompozytu. Badania [40] wykazały, że stosowanie paździerzy o dużej zawartości substancji ekstrakcyjnych, przede wszystkim cukrów, bardziej opóźnia wiązanie cementu, niemniej inne wyekstrahowane cząsteczki, takie jak związki fenolowe (pochodne ligniny), również odgrywają rolę w hydratacji cementu. Wyniki te znajdują potwierdzenie w badaniach [29], gdzie beton zawierający tylko spoiwo cementowe wykazał mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż beton zawierający cement i wapno hydratyzowane. W badaniach obejmujących nasycenie materiału wodą [22] zaobserwowano wypukiwanie zarówno nieorganicznych, jak i organicznych składników kompozytu, przy czym w pierwszym przypadku dodatek kwasu poliakrylowego zmniejszył ten efekt. Podczas zanurzenia w wodzie polisacharydy ulegały częściowemu rozpuszczeniu [22].

Hipotezę wskazującą na wpływ mikroorganizmów na niedostateczne wiązanie przedstawiono w [25]. Po trzech miesiącach dojrzewania wykryto duże ilości portlandytu, krzemianów wapnia oraz waleritu – szczególnie w próbkach narażonych na bardziej wilgotne warunki, co sugeruje, że niewystarczająca ilość wody nie jest jedyną przyczyną dużego występowania waleritu. Biorąc pod uwagę fakt, że obserwowane mikroorganizmy mogą wpływać na różne reakcje chemiczne wapna oraz wyniki badań mineralogicznych i morfologicznych, przyjęto, że bakterie pośredniczą w procesie powstawania węgla wapnia w hempcrete [25].

Omawiane badania w dużej części zawierają niewystarczającą charakterystykę zastosowanego komponentu roślinnego, choć cechy kruszywa mają również wpływ m.in. na właściwości mechaniczne materiału, jego wodochłonność czy strukturę porów [41]. W świetle badań [25, 40] różny skład chemiczny rośliny, czy też obecność mikroorganizmów może mieć kluczowe znaczenie dla trwałości kompozytu wapienno-konopnego.

Opisane w artykule badania wskazują, że **hempcrete jest bardzo podatny na uszkodzenia spowodowane przez działanie wody**. Metoda przyspieszonego starzenia, polegająca na zanurzeniu próbek w wodzie, jest jednak dyskusyjna w przypadku materiałów stosowanych jako termoizolacja przegród budowlanych. Bardziej adekwatnym podejściem wydaje się cykliczne nasycanie próbek parą wodną. Wyniki przeprowadzonych w taki sposób badań nie wykazały istotnych zmian wytrzymałości mechanicznej kompozytu.

Przedstawione badania mrozoodporności nie dały jednoznacznych wyników, co można przypisać kolejnym reakcjom wiązania spoiw, które następują w wyniku nasycania próbek wodą. W związku z tym, że materiał ma zastosowanie termoizolacyjne i jest w budowywany w strefie przemarzania, test mrozoodporności ma szczególne znaczenie przy określaniu trwałości materiału. Zaleca się, aby przeprowadzić badania mrozoodporności, które uwzględnią stopień zawilgocenia próbek odpowiadający występowaniu tego zjawiska w warunkach rzeczywistego użytkowania przegród budowlanych.

Kompozyt wapienno-konopny może charakteryzować się dużą wartością współczynnika pH, co sprzyja rozkładowi cząsteczek paździerzy konopnych. Zastosowanie spoiwa z dodatkiem metakaolinu zmniejsza współczynnik pH do bezpiecznego poziomu, a ponadto skutkuje mniejszym spadkiem wytrzymałości na ściskanie materiału podczas testów przyspieszonego starzenia. Wyniki badań opisanych w literaturze nie wykazały negatywnego wpływu chloru sodu na trwałość materiału. Hempcrete charakteryzuje się odpornością na działanie czynników biologicznych,

niemniej bioreceptywność materiału nie może być pomijana.

W świetle analizowanych badań kompozyt wapienno-konopny stosowany jako materiał termoizolacyjny w przegrodach budowlanych powinien być bezwzględnie zabezpieczony przed bezpośrednim działaniem wody kapilarnej, atmosferycznej i kondensacyjnej. Kompozyty zawierające spoiwo wapienne modyfikowane pucolanami są mniej narażone na czynniki prowadzące do ich degradacji, niemniej dalsze badania nad interakcją chemiczną i biologiczną surowca roślinnego i spoiwa są konieczne w celu pełnego zrozumienia mechanizmów starzenia się materiału. Wykonanie badań in situ na istniejących budynkach może przyczynić się do bardziej precyzyjnej oceny trwałości kompozytu w warunkach rzeczywistych.

Literatura

- [1] International Energy Agency and the United Nations Environment Programme Global Status Report: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. 2018.
- [2] Amziane S. Overview on Biobased Building Material Made with Plant Aggregate. RILEM Technical Letters. 2016; DOI: 10.21809/rilemtech.v1.9.
- [3] Ciepiucha W (red.) Technologia uprawy i przetworstwa konopi włóknistej. Poznań: PWN&RZ, 2013.
- [4] Khan BA, Wang J, Wames P, Wang H. Antibacterial Properties of Hemp Hard Powder against E. Coli. Journal of Applied Polymer Science. 2015; DOI:10.1002/app.41588.
- [5] Gołbiewski M. Kompozyty konopno-wapienne (Hempcrete). Materiały Budowlane. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.07.29.
- [6] Barthuijs S, Bhuvan Das B. A Comprehensive Review on the Use of Hemp in Concrete. Construction and Building Materials. 2022; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127857.
- [7] Gołbiewski M, Adamczewski G. Wytrzymałość na ściskanie kompozytów konopno-wapiennych wytworzonych metodą ubijania. Materiały Budowlane. 2018; DOI: 10.15199/33.2018.09.24.
- [8] Piątkiewicz W, Narkoch P, Pietruszka B. Influence of Hemp-Lime Composite Composition on its Mechanical and Physical Properties. Archives of Civil Engineering. 2020; DOI: 10.24425/ace.2020.134409.
- [9] Seng B, Magniont C, Lorente S. Characterization of a Precast Hemp Concrete. Part I: Physical and Thermal Properties. Journal of Building Engineering. 2018; DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.016.
- [10] Gołbiewski M, Pietruszka B. Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytów konopno-wapiennych wytworzonych metodą ubijania. Materiały Budowlane. 2019; DOI: 10.15199/33.2019.08.09.
- [11] Walker R, Pavia S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp – Lime Concretes. Construction and Building Materials. 2014; DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081.
- [12] Collet F, Pretot S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. Construction and Building Materials. 2014; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [13] Areehan JH, Nelson WS, Strubor WV. On the Theoretical Carbon Storage and Carbon Sequestration Potential of Hempcrete. Journal of Cleaner Production. 2020; DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121846.
- [14] Allin S. Building with Hemp. 2nd ed. Seed Press; 2012.
- [15] Stanow W, Sparnow A. The Hempcrete Book: Designing and Building with Hemp-Lime. Green Books; 2014.
- [16] Gołbiewski M. Aspekty zastosowania kompozytów wapienno-konopnych w budownictwie indywidualnych domów mieszkalnych w architekturze proekologicznej. Praca doktorska. Politechnika Warszawska; 2020.
- [17] Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Daif D, Nour I, Amziane S, Farcas F. Aging of Hemp Shive Used for Concrete. Materials & Design. 2018; DOI: 10.1016/j.matdes.2018.10.016.
- [18] Brzyski P. Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający zasady zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Praca doktorska. Politechnika Lubelska; 2018.
- [19] Collet F, Chamois J, Pretot S, Lanos C. Comparison of the Hygric Behaviour of Three Hemp Concretes. Energy and Buildings. 2013; DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.03.010.
- [20] Ziemski R, Beneszouk A, Courty M, Ben Hamed H. Potential Use of Metakaolin as a Partial Replacement of Preliminary Lime Binder to Improve Durability of Hemp Concrete under Cyclic Wetting-Drying Aging. Construction and Building Materials. 2022; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127389.
- [21] Benmouhiddine F, Benmouh F, Cherif R, Belarbi R, Tahakourt A, Abahn K. Experimental Investigation on the Influence of Immersion-Drying Cycles on the Hygrothermal and Mechanical Properties of Hemp Concrete. Journal of Building Engineering. 2020; DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101758.
- [22] Sheridan J, Sonebi M, Taylor S, Amziane S. The Effect of Long Term Weathering on Hemp and Rapeseed Concrete. Cement and Concrete Research. 2020; DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106014.
- [23] Marceau S, Glé P, Guéguen-Minerbe M, Gourlay E, Moscardelli S, Nour I, Amziane S. Influence of Accelerated Aging on the Properties of Hemp Concretes. Construction and Building Materials. 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129.
- [24] Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Amziane S, Farcas F. Durability of Hemp Concretes Exposed to Accelerated Environmental Aging. Construction and Building Materials. 2020; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119043.
- [25] Arizzi A, Viles H, Martín-Sánchez J, Cullum G. Producing the Long-Term Durability of Hemp-Lime Renders in Inland and Coastal Areas Using Mediterranean, Tropical and Semi-Arid Climatic Simulations. Science of the Total Environment. 2016; DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.141.
- [26] Walker R, Pavia S, Mitchell R. Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes. Construction and Building Materials. 2014; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065.
- [27] De Bruijn PB, Jeppsson KH, Sautin K, Nilsson C. Mechanical Properties of Lime-Hemp Concrete Containing Shives and Fibres. Biosystem Engineering. 2009; DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005.
- [28] Sassoni E, Manz S, Motori A, Montecchi M, Canti M. Experimental Study on the Physical-Mechanical Durability of Innovative Hemp-Based Composites for the Building Industry. Energy and Buildings. 2015; DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.022.
- [29] Horoczczak E, Strzałkowski J, Glowacka A, Paszkiewicz O, Markowska-Szczapak A. Investigation of Durability Properties for Lightweight Structural Concrete with Hemp Shives Instead of Aggregate. Applied Sciences. 2023; DOI: 10.3390/app13148447.
- [30] Sabir B, Wild S, Bai J. Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review. Cement and Concrete Composites. 2001; DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00692-5.
- [31] Sheridan J, Sonebi M, Taylor S, Amziane S. The Effect of a Polyacrylic Acid Viscosity Modifying Agent on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp and Rapeseed Straw Concrete. Construction and Building Materials. 2020; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117536.
- [32] Mohr BJ, Nanko H, Kurtis KE. Durability of Kraft Pulp Fiber-Cement Composites to Wet-Dry Cycling. Cement and Concrete Composites. 2005; DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006.
- [33] Wei J, Meyer C. Degradation Mechanisms of Natural Fiber in the Matrix of Cement Composites. Cement and Concrete Research. 2015; DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.02.019.
- [34] Botas SMS, Rato VM, Faria P. Testing the Freeze/Thaw Cycles in Lime Mortar. RILEM Proceedings Pro 078: HMC2010, 2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. 2010; 417 – 425.
- [35] Sassoni E, Manz S, Motori A, Montecchi M, Canti M. Novel Sustainable Hemp-Based Composites for Application in the Building Industry: Physical, Thermal and Mechanical Characterization. Energy and Buildings. 2014; DOI:10.1016/j.enbuild.2014.03.033.
- [36] Shinkawa MA, Twiss RG, Gaylarde CC, Taqued MEE, Loh K, John VM. Climate as the Most Important Factor Determining Anti-Fungal Biocide Performance in Paint Films. Science of the Total Environment. 2010; DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.084.
- [37] Hirst E. Characterisation of Hemp-Lime as a Composite Building Material. PhD thesis. University of Bath; 2013.
- [38] Arnaud L, Gourlay E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. Construction and Building Materials. 2012; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
- [39] Sedat D, Pagnoux C, Chotard T, Smith A, Lejoly D, Gloaguen V, Kestur P. Effect of Calcium Rich and Alkaline Solutions on the Chemical Behaviour of Hemp Fibres. Journal of Materials Science. 2007; DOI: 10.1007/s10853-007-1903-4.
- [40] Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Daif D, Amziane S, Farcas F. Impact of Hemp Shive Extractives on Hydration of Portland Cement. Construction and Building Materials. 2020; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118300.
- [41] Brzyski P, Gladecki M, Rumińska M, Pietrak K, Kubisi M, Łapka P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. Materials. 2020; DOI: 10.3390/ma13255383.

Przyjęto do druku: 10.08.2023 r.

Kompozyt wapienno-konopny w Polsce. Wyzwania praktyczne i kierunki badań

Lime-hemp composite in Poland. Practical challenges and research directions

mgr inż. Wojciech Piątkiewicz (ORCID: 0000-0001-6986-8041), Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.6453

Streszczenie: W artykule przedstawiono aktualny stan stosowania kompozytu wapienno-konopnego w Polsce oraz zidentyfikowano główne bariery rozwoju tej technologii, takie jak brak norm technicznych, ograniczona dostępność surowców i niewielka liczba doświadczonych wykonawców. Wskazano pięć kluczowych zmiennych procesu produkcji decydujących o właściwościach materiału oraz podkreślono, że brak standaryzacji utrudnia projektantom wiarygodne określanie parametrów przegród budowlanych, a wykonawcom ich powtarzalną realizację zgodną z założeniami projektowymi. Sformułowano kierunki dalszych badań niezbędnych do opracowania polskich wytycznych technicznych.

Słowa kluczowe: kompozyt wapienno-konopny, konopie, standaryzacja, budownictwo naturalne.

Abstract: This paper presents the current state of hemp-lime composite application in Poland and identifies the main barriers to its development, including the lack of technical standards, limited raw material availability, and a small number of experienced contractors. Five key production variables determining the final material properties were highlighted, and it was emphasized that the absence of standardization makes it difficult for designers to reliably determine envelope parameters and for contractors to consistently achieve the intended design specifications. Directions for further research necessary to develop Polish technical guidelines were outlined.

Keywords: hemp-lime composite, hemp, standardization, natural construction.

1. Wprowadzenie

Sektor budownictwa odpowiada za ponad jedną trzecią wszystkich światowych emisji gazów cieplarnianych. Ograniczanie tych emisji koncentrowało się do tej pory głównie na wymianie źródeł ciepła w budynkach oraz poprawie izolacyjności przegród zewnętrznych. W ostatnich latach Unia Europejska zwraca jednak uwagę także na ślad węglowy powstających budynków, a co za tym idzie – produkowanych materiałów budowlanych. Ma to swoje przełożenie w najnowszej dyrektywie EPBD IV z 2024 roku, która stopniowo wprowadza wymóg obliczania i ujawniania wskaźnika GWP (*Global Warming Potential*). Oznacza to, że będzie trzeba uwzględniać nie tylko emisje gazów cieplarnianych związane z użytkowaniem budynku (ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja), ale także wpływ środowiskowy związany z jego wybudowaniem. Od 1 stycznia 2030 roku wymóg ten ma obowiązywać dla wszystkich nowych budynków. Równoległe z tymi regulacjami rosnąca świadomość ekologiczna inwestorów sprawia, że coraz więcej osób sięga po materiały o niskim śladzie węglowym, określane mianem „naturalnych”. Od około 20 lat w Polsce rozwija się tzw. budownictwo naturalne, które kieruje się przede wszystkim zasadą używania materiałów budowlanych niskoprzetworzonych i naturalnych, takich jak słoma, glina, drewno czy konopie. Jednym z materiałów wywodzących się z tego nurtu jest kompozyt wapienno-konopny. W Polsce powstało już ponad 50 budynków z tego

materiału, a jego rozpoznawalność jest na tyle duża, że każdy zainteresowany budownictwem zrównoważonym słyszał o tej technologii. Jednocześnie istnieje znacząca luka badawcza, legislacyjna i normowa dotycząca stosowania tego materiału w praktyce. Brak standaryzacji rodzi istotne przeszkody w rozwoju technologii w Polsce.

2. Kompozyt wapienno-konopny w Polsce – obecny stan

2.1. Czym jest kompozyt wapienno-konopny?

Kompozyt wapienno-konopny bywa w Polsce niesłusznie nazywany „betonem konopnym” (od angielskiej nazwy *hempcrete*). Coraz częściej pojawiająca się i promowana przez Ogólnopolskie Stowarzyszenie Budownictwa Naturalnego nazwa jest konoplit, która nawiązuje do historycznego polskiego materiału i nie wprowadza niepotrzebnego skojarzenia z betonem konstrukcyjnym. W odróżnieniu od klasycznego betonu kompozyt wapienno-konopny nie jest materiałem konstrukcyjnym, lecz przede wszystkim izolacyjnym. Do jego wytworzenia potrzeba trzech składników: paździerzy konopnych, spoiwa mineralnego oraz wody.

Paździerz konopny to zdrewniała część łodygi konopi siewnych (*Cannabis sativa*), które można legalnie uprawiać w Polsce, pod warunkiem że zawartość substancji psychoaktywnej THC nie przekracza 0,3%. W trakcie przetworstwa rośliny zostają

Rys. 1. Proces wznoszenia ściany z kompozytu wapienno-konopnego metodą szalunkową (archiwum autora)

odwłóknione, pocięte i pokruszone na mniejsze kawałki o długości zazwyczaj 0,5–2,5 cm. Wybór tej rośliny podyktowany jest jej wysoką porowatością – co przekłada się na niski współczynnik przewodzenia ciepła – oraz szybkim tempem wzrostu, które oznacza wysoki współczynnik akumulacji CO₂ [1]. Spoiwo mineralne stanowi drugi kluczowy składnik. Głównym jego komponentem jest wapno hydratyzowane, często wzbogacane dodatkami poprawiającymi wytrzymałość, takimi jak pucolany, cement czy wapno hydrauliczne. W zależności od składu mieszanki, kompozyt wapienno-konopny może przyjmować szeroki zakres właściwości fizycznych i mechanicznych (tab. 1).

Tabela 1. Zakres właściwości kompozytu wapienno-konopnego [2–5]

Cecha	Wartość
Gęstość (kg/m ³)	250–660
Współczynnik przewodzenia ciepła (W/(m·K))	0,06–0,16
Wytrzymałość na ściskanie (MPa)	0,1–1,2
Współczynnik oporu dyfuzyjnego (-)	3–8
Wytrzymałość na zginanie (MPa)	0,08–0,141
Pojemność cieplna (J/(kg·K))	300–1601
Ognioodporność (klasa)	B-s1 d0

2.2. Paździerz konopne – surowiec budowlany

Mimo bogatej tradycji uprawy konopi siewnych w Polsce obecnie niewiele jest producentów konopi przeznaczonych na cele budowlane. Luka technologiczna, spowodowana zdelegalizowaniem upraw konopi w XX wieku, sprawiła, że brakuje na rynku krajowym odpowiedniego zaplecza do wymagającej obróbki tego surowca. Podaż paździerzy konopnych na rynku polskim jest niezadowalająca w stosunku do popytu, a jakość materiału bywa niewystarczająca dla zastosowań budowlanych. Paździerz konopne do celów budowlanych powinny być: dobrze wysuszone, odwłóknione i odpyłone, o właściwej frakcji oraz o stałych, powtarzalnych cechach fizycznych. Uzyskanie takiej jakości wymaga zaawansowanej linii produkcyjnej oraz ścisłej kontroli procesu, na którą niewiele producentów może sobie pozwolić. Prowadzi to do wysokiej ceny surowca dobrej jakości i hamuje rozwój tej technologii w Polsce.

2.3. Technologia budowy w Polsce

Podstawową metodą wznoszenia budynków z kompozytu



wapienno-konopnego w Polsce jest metoda szalunkowa, często systemem gospodarczym. Polega ona na wymieszaniu paździerzy, spoiwa i wody w mieszalniku bezpośrednio na placu budowy. Tak przygotowaną mieszankę układa się ręcznie w przestrzeniach szalunku, który zazwyczaj zdejmuje się już następnego dnia. Najczęściej metodę tę stosuje się do wykonywania ścian zewnętrznych i wewnętrznych, ale można w ten sposób realizować również izolację stropów czy podłóg. Układanie mieszanki w szalunku jest zajęciem stosunkowo prostym i powtarzalnym. Choć metoda szalunkowa jest zdecydowanie najpopularniejsza w Polsce, warto zaznaczyć, że możliwe są również inne technologie, takie jak natryskiwanie materiału czy budowanie z prefabrykatów.

3. Główne wyzwania w praktyce budowlanej

3.1. Trudności w określaniu właściwości materiału

Przez brak norm budowlanych w Polsce kompozyt wapienno-konopny jest stosowany na zasadzie dopuszczenia do jednostkowego zastosowania. Architekt lub wykonawca deklaruje właściwości materiału, często opierając się na danych z literatury lub własnych założeniach. Problem polega na tym, że właściwości końcowe kompozytu zależą od wielu czynników, które na budowie mogą się zmieniać. Trudno jest powtórzyć warunki laboratoryjne w praktyce, a niektóre kluczowe aspekty pozostają niedookreślone.

3.2. Pięć kluczowych zmiennych podczas budowy

Podczas budowy wykonawca ma w swoich rękach cztery główne zmienne, które decydują o właściwościach materiału: skład spoiwa, stosunek spoiwa do paździerzy, stopień kompresji oraz ilość wody. Piątą istotną zmienną jest uziarnienie paździerzy, które zależy od producenta kruszywa. Każda z nich ma istotny wpływ na końcowy rezultat.

Skład spoiwa – podstawa receptury

Najbardziej powszechnym spoiwem wykorzystywanym w kompozytach wapienno-konopnych jest wapno hydratyzowane CL 90-S. Ze względu na swoją porowatą strukturę wapno powietrzne, jak czasem bywa nazywane, dobrze współpracuje ze zdolnością paździerzy konopnych do absorbowania i transportowania

pary wodnej oraz tworzy środowisko wysoce zasadowe, które chroni materiał organiczny przed rozwojem grzybów i pleśni [6]. Aby poprawić właściwości mechaniczne, a zwłaszcza wczesną wytrzymałość na ściskanie, stosuje się dodatek spoiwa hydraulicznego – może to być wapno hydrauliczne lub cement portlandzki. Kolejnym dodatkiem modyfikującym spoiwa wapienne są pucolany, które w reakcji z wodorotlenkiem wapnia i w obecności wody tworzą związki o właściwościach cementujących, zwiększające wytrzymałość i trwałość spoiwa. Na rynkach zagranicznych dostępne są już dedykowane spoiwa do kompozytów wapienno-konopnych.

Ze względu na większą dostępność i bardziej lokalny charakter zasadne wydaje się wykorzystanie cementu portlandzkiego jako dodatku hydraulicznego. Cement stosowany jako dodatek do spoiwa wapiennego zwiększa wytrzymałość i przyspiesza proces wiązania [2]. W literaturze stosuje się go w ilości od 2,7 do 23%. Zbyt duża ilość cementu może jednak wpłynąć na nadmierne uszczelnienie materiału, a w efekcie na obniżenie jego paroprzepuszczalności. Biorąc pod uwagę poziom wytrzymałości i przyspieszone wiązanie, optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R w ilości 15%. Drugim dodatkiem, który warto zastosować, jest metakaolin – pucolana powstająca przez wypalenie kaolinitu w temperaturze 650–800°C. Wzbogacenie nim składu spoiwa obniża jego ślad węglowy oraz poprawia trwałość kompozytu [6]. Dodatek metakaolinu najlepiej zastosować w ilości 5–10%. Zbyt duża ilość dodatków może obniżyć wytrzymałość kompozytu.

Stosunek spoiwa do paździerz – kluczowa decyzja

Główną zmienną decydującą o właściwościach kompozytu jest proporcja spoiwa do paździerz. Ilość wykorzystanego spoiwa w mieszance wpływa bezpośrednio na gęstość i trwałość materiału. W literaturze naukowej można spotkać się z bardzo szerokim zakresem proporcji – od 0,69 do 4,82 (wagowo) [7, 8]. Dla metody szalunkowej wykonywania ścian podawana jest najczęściej proporcja 1,5–2,25 [9, 11] przy czym wartości te są również uzależnione od składu spoiwa. Badania pokazują wyraźną zależność: wzrost ilości spoiwa pogarsza izolacyjność materiału, ale poprawia jego wytrzymałość [12]. W praktyce oznacza to ciągle kompromis. Im bardziej inwestorowi zależy na właściwościach izolacyjnych – na przykład przy izolacji stropu lub jako luźny zasyp w szalunku traconym – tym mniej spoiwa może zastosować. Ale jest granica: zbyt mała ilość spoiwa oznacza słabą ochronę przed korozją biologiczną i ogniem. Z kolei gdy liczy się wytrzymałość (ściany działowe, warstwa podłogi), trzeba użyć więcej spoiwa. To jednak wiąże się z trzema niekorzystnymi konsekwencjami: wzrostem kosztów finansowych, wzrostem śladu węglowego – co pogarsza ekologiczny aspekt materiału – oraz obniżeniem izolacyjności termicznej. Aby właściwie rozpoznać wpływ proporcji spoiwa na właściwości kompozytu, konieczne jest przyjęcie szerokiego zakresu wartości, takiego jak 1:1, 2:1 oraz 3:1 (spoiwo:paździerz, wagowo). Taki dobór wynika z kilku przesłanek. Proporcja 1:1 reprezentuje minimalną ilość spoiwa pozwalającą na zabezpieczenie

paździerz konopnych i zachowanie charakteru kompozytu. Taka niska zawartość spoiwa odpowiada zastosowaniom izolacyjnym, gdzie priorytetem jest niska gęstość materiału – na przykład jako wypełnienie w szalunku traconym lub izolacja zasypowa w stropie. Proporcja 2:1 stanowi wartość średnią, która pojawia się najczęściej w literaturze jako optymalna dla przegród pionowych. Jest to proporcja reprezentująca typowe zastosowanie konstrukcyjno-izolacyjne i najczęściej stosowana w praktyce budowlanej. Proporcja 3:1, choć rzadziej spotykana w literaturze, jest istotna z punktu widzenia badań, ponieważ pozwala określić granice racjonalności stosowania większej ilości spoiwa. Większa zawartość spoiwa może prowadzić do pozytywnych efektów w zakresie wytrzymałości mechanicznej i znajduje zastosowanie w wylewkach izolacyjnych (proporcja 2,75:1) czy tynkach izolacyjnych (proporcja 4:1).

Kompresja – subiektywna i niedookreślona

Przez swoją niską gęstość i charakterystyczne zachowanie – klinowanie się między sobą cząstek paździerz – technologia wykonywania kompozytu wapienno-konopnego wymaga dodatkowego ubicia. Jest to nieodłączny element zwłaszcza przy wykonywaniu przegród pionowych, gdzie właściwe połączenie materiału gwarantuje odpowiednią wytrzymałość i równą powierzchnię ściany. W warunkach budowy ubijanie odbywa się najczęściej za pomocą drewnianych ubijaków lub samych dłoni w rękawiczkach. W literaturze naukowej oraz poradnikach budowania z tego materiału trudno jednak znaleźć precyzyjne określenie, jak dokładnie kompresować materiał. Można się spotkać z określeniami typu „uklepać lekko ręką w celu pozbycia się dużych pustek powietrznych” [13]. Badania pokazują jednak, że kompresja ma znaczący wpływ na właściwości materiału – zmieniając poziom zagęszczenia, obserwowana jest poprawa właściwości mechanicznych oraz wzrost przewodności cieplnej przez zmniejszenie porowatości [14]. W związku z tym wykonawcy starają się ubijać materiał tylko na tyle, aby osiągnąć zakładaną spistość i wymaganą wytrzymałość na ściskanie. Jest to nie raz trudne do uchwycenia i przy pracy niedoświadczonych członków ekipy może prowadzić do dużych różnic w ubiciu materiału, a co za tym idzie – do zmienności właściwości w obrębie budynku lub nawet pojedynczej przegrody. Dodatkowo ta sama technika „uklepywania ręką” da zupełnie inne rezultaty w zależności od siły fizycznej robotnika. Ta subiektywność sprawia, że kompresja pozostaje jedną z najtrudniejszych zmiennych do kontrolowania. Odpowiedzią na ten problem jest opracowanie metody określania kompresji materiału, którą można byłoby zastosować na budowie. Kompresję należy odnosić do materiału niezagęszczonego i określać jako procentowy wzrost masy w stosunku do luźnego zasypu – czyli mieszanki, która nie jest poddana żadnej kompresji i symuluje „pełne” wypełnienie formy w stanie luźnym. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest porównywanie zagęszczenia różnych mieszank. W praktyce kompresja 150% stanowi minimalne zagęszczenie możliwe do osiągnięcia w technologii szalunkowej ściennej, natomiast 190% jest maksymalnym możliwym do uzyskania przez ręczne ubijanie. Kompresja 170% jest

wartością pośrednią, która pozwala na pełniejszą analizę wpływu zagęszczenia na właściwości materiału. Przyjęcie takiego zakresu wartości w badaniach umożliwia określenie, jak różne poziomy ubicia wpływają na końcowe parametry przegrody.

Ilość wody – trudna do uchwycenia zmienna

O wodę w kompozycie wapienno-konopnym toczy się swista rywalizacja pomiędzy wysoce wodoodpornym kruszywem a spoiwem, które potrzebuje jej do wiązania. Wiadomo natomiast, że gdy jest jej za dużo, może to powodować większą gęstość materiału (przez silniejszą kompresję pod własnym ciężarem), wydłużone schnięcie, a w skrajnych przypadkach spoiwo może spływać w dół formy. Z kolei zbyt mała ilość wody prowadzi do ograniczenia wiązania, pogorszenia wytrzymałości oraz niepełnego pokrycia paździerz warstwą spoiwa – co osłabia zabezpieczenie przed korozją biologiczną i ogniem.

W literaturze brak jest jasnych wytycznych, jak określać konsystencję mieszanki. W badaniach naukowych stosuje się bardzo różne ilości wody dla podobnych składów, co komplikuje zastosowanie tych wyników w praktyce. Sposób określania konsystencji jest często oparty na doświadczeniu badacza lub organoleptycznej ocenie. Można się spotkać na przykład ze wskazówką, że proporcja spoiwo:woda powinna wynosić 0,55–0,6 (wagowo) [15]. Stosowanie takiej proporcji bez uwzględnienia specyfiki materiałów może prowadzić do błędów. Ilość wody jest bowiem zależna od rodzaju stosowanego spoiwa – każdy skład wymaga innej ilości wody do prawidłowego wiązania – oraz od cech kruszywa. Paździerz konopne mogą się różnić wilgotnością początkową i zdolnością absorpcji wody, co utrudnia określenie jednego uniwersalnego wzoru.

W praktyce budowlanej stosuje się metody określania konsystencji mieszanki bezpośrednio w trakcie jej produkcji, pozwalające na bieżące korygowanie ilości wody. Do takich organoleptycznych metod należy popularna metoda „kulki i palca”: kontrolowanie konsystencji polega na uformowaniu kuli ze świeżej mieszanki i próbie jej rozdrobnienia. Gdy próbka rozwarstwia się bez lepkości, oznacza to zbyt małą ilość wody; gdy stawia opór i jest lepka – konsystencja jest właściwa. Choć metody te są praktyczne, potrzeba unormowania określania ilości wody

w mieszance jest oczywista. Musi się to jednak wiązać z odniesieniem do konkretnego spoiwa i kruszywa, gdyż ich właściwości decydują o rzeczywistym zapotrzebowaniu na wodę. W odpowiedzi na tę potrzebę, dla zaproponowanego składu spoiwa (75% wapna hydratyzowanego, 15% cementu portlandzkiego, 10% metakaolinu), na podstawie analizy licznych publikacji dotyczących podobnych spoiw, opracowano wzór pozwalający określić proporcję wody względem ilości spoiwa:

$$W = 1,95 \cdot S^{-0,51}$$

gdzie:

W – stosunek wody do spoiwa (wagowo),

S – stosunek spoiwa do paździerz (wagowo).

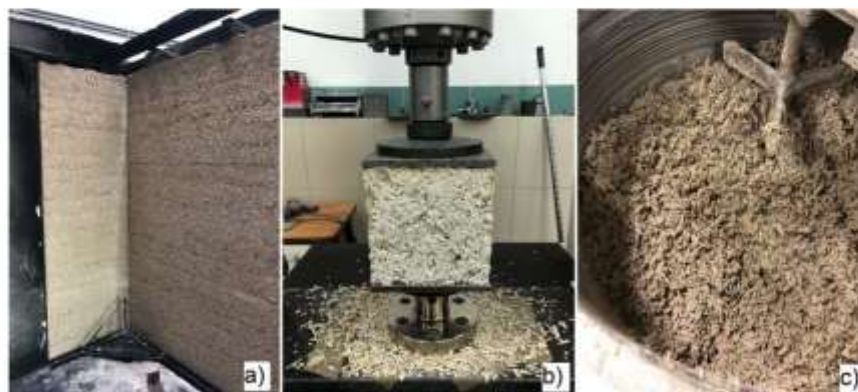
Rozmiar paździerz konopnych – niedoceniana zmienna

Wykonawca lub inwestor mogą mieć do czynienia z różną jakością paździerz konopnych. Poza opisanymi wcześniej wymaganiami jakościowymi dotyczącymi czystości surowca, jest jeszcze jeden czynnik, którym mogą się różnić poszczególne producenci – uziarnienie, czyli rozmiar cząstek.

Badania wskazują, że kompozyt wykonany z paździerz o mniejszej średniej długości daje lepszą wytrzymałość na ściskanie, z kolei cząstki o większej długości poprawiają wytrzymałość na zginanie [16]. Wpływ wielkości paździerz na przewodność cieplną wydaje się być marginalny, choć niektóre badania pokazują, że dłuższe cząstki prowadzą do powstania kompozytu o nieco lepszej izolacyjności termicznej. Uziarnienie ma też bezpośrednie konsekwencje praktyczne – paździerz konopne mogą mieć gęstość nasypową od 90 do 120 kg/m³, co wpływa na końcową gęstość kompozytu. Ponadto przez swój specyficzny kształt przypominający podłużne graniastosłupy cząstki te łatwo się o siebie klinują, co wpływa na urabialność mieszanki i łatwość jej rozprowadzenia w szalunku.

Paździerz konopne pochodzące od różnych dostawców, a przede wszystkim wytworzone różnymi metodami przetworstwa, mogą się różnić nie tylko uziarnieniem, ale również składem chemicznym. Paździerz składają się głównie z celulozy, hemicelulozy i ligniny, ale zawierają też pektyny, lipidy, węglowodany i białka, które mogą wpływać na wiązanie spoiwa

Rys. 2. Badania kompozytu wapienno-konopnego:
a) przygotowanie do badań klasy odporności na ogień,
b) badanie wytrzymałości na ściskanie,
c) mieszanie składników o odpowiedniej konsystencji (archiwum autora)



mineralnego. Proporcje tych składników różnią się w zależności od warunków klimatycznych, terminu zbioru, procesu przetwarzania czy odmiany rośliny. Aby właściwie zbadać wpływ uziarnienia na właściwości kompozytu, należy przede wszystkim zadbać o kontrolę źródła materiału. Paździerz powinny pochodzić od jednego producenta, z jednego zbioru i tej samej odmiany konopli, aby zminimalizować wpływ zmienności składu chemicznego i właściwości fizycznych. Materiał należy przechowywać w jednolitych warunkach. Przed badaniami warto przesieć paździerz w laboratorium, aby usunąć nadmiar pyłu i włókien, które zwiększają wodozgodność mieszanki, pogarszają wiązanie i utrudniają mieszaninę. Zawartość zanieczyszczeń powinna być poniżej 5%.

Do badań wpływu uziarnienia należy przygotować różne frakcje poprzez przesiewanie na odpowiednich sitach, na przykład o wymiarach 2 i 4 mm. Proces przesiewania warto powtórzyć dwukrotnie dla lepszej separacji frakcji. Należy jednak pamiętać, że przez podłużny kształt paździerzy przez sito mogą przechodzić również większe cząstki. Dla dokładnego określenia cech geometrycznych użytego kruszywa warto wesprzeć się analizą obrazu, dzięki której można poznać dokładną powierzchnię cząstek, średnią długość, proporcje wymiarów czy rozkład wielkości. Dzięki temu uzyskuje się precyzyjny obraz kruszywa użytego w badaniach. Dostępne są darmowe programy do analizy obrazu, a kluczowe jest właściwe odmierzenie próbek kruszywa oraz wykonanie odpowiedniego zdjęcia, na którym cząstki nie będą się ze sobą stykać. Takie podejście umożliwia systematyczne zbadanie wpływu uziarnienia przy jednoczesnej kontroli innych zmiennych, co jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników.

4. Podsumowanie

Kompozyty wapienno-konopne stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych materiałów budowlanych, oferując połączenie dobrych właściwości izolacyjnych z niskim śladem węglowym. Jednak ich szersze zastosowanie w Polsce napotyka istotną barierę – brak standaryzacji i wynikającą z niej zmienność właściwości materiału. Jak wykazano w niniejszym artykule, o ostatecznych parametrach kompozytu decyduje pięć kluczowych zmiennych wpływających na proces produkcji: skład spoiwa, stosunek spoiwa do paździerzy, stopień kompresji, ilość wody oraz uziarnienie paździerzy. Każda z tych zmiennych wpływa na właściwości mechaniczne, cieplne i trwałościowe materiału, a ich wzajemne oddziaływanie tworzy złożony system zależności. Kompleksowe badanie wszystkich tych zmiennych i ich kombinacji pozwala określić, które mają najistotniejszy wpływ oraz jak oddziałują ze sobą, stanowiąc podstawę do wypracowania wytycznych praktycznych i polskich norm technicznych. W kontekście nadchodzących wymagań dyrektywy EPBD IV, która od 2030 roku zobowiązuje do obliczania wskaźnika GWP materiałów budowlanych, kompozyty wapienno-konopne zyskują szczególne znaczenie. Ich zdolność do akumulacji CO₂ w procesie karbonatyzacji oraz wykorzystanie

odnawialnego surowca lokalnego pochodzenia wpisują się w kierunek dekarbonizacji sektora budowlanego. Rozwój polskiego rynku paździerzy konopnych oraz rosnące zainteresowanie naturalnymi materiałami budowlanymi tworzą sprzyjające warunki dla technologii. Kluczowe pozostaje jednak przekształcenie wiedzy naukowej w praktyczne narzędzia dostępne dla całego sektora budowlanego – od producentów materiałów, przez projektantów i wykonawców, po organy normalizacyjne. Tylko wtedy kompozyty wapienno-konopne mogą stać się realnym elementem zrównoważonego budownictwa w Polsce.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jiang Y., Lawrence M., Ansell M. P., Hussain A., Cell Wall Microstructure, Pore Size Distribution and Absolute Density of Hemp Shiv, *Royal Society Open Science* 5/2018, doi:10.1098/rsos.171945
- [2] Piątkiewicz W., Piotrowski A., Narloch P., Determination of Compressive Strength in Hemp-Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach, *Applied Sciences* 16, 2026, str. 306, doi:10.3390/app16010306
- [3] Piątkiewicz W., Narloch P., Wołczyńska Z., Mariczak J., Effect of Hemp Shiv Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp-Lime Composites, *Materials (Basel)* 18, 2025, art. 3458, doi:10.3390/ma18153458
- [4] Gołębiowski M., Pietruszka B., Piątkiewicz W., Kubiś M., Oleksienko O., Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications, *Materials (Basel)*, 18, 2025, str. 1–20, doi:10.3390/ma18214958
- [5] Budownictwo Naturalne. Poradnik Inwestora, OSBN, Warszawa, 2024
- [6] Gołębiowski M., Narloch P., Piątkiewicz W., Wasilewski I., Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych, *Materiały Budowlane* 9/2023, 13–19, doi:10.15199/33.2023.09
- [7] Page J., Sonebi M., Amziane S., Design and Multi-Physical Properties of a New Hybrid Hemp-Flax Composite Material, *Construction Building Materials* 139, 2017, str. 502–512, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037
- [8] Arnaud L., Gourlay E., Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes, *Construction Building Materials* 28, 2012, str. 50–56, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052
- [9] Williams J., Lawrence M., Walker P., The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime, *Material Structures* 50, 2017, str. 1–10, doi:10.1617/s11527-016-0976-4
- [10] Amziane S., Arnaud L., 4. Formulation and Implementation. In *Bio-Aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, Vol. Formulation
- [11] Sutton A., Black D., Pete W., Hemp Lime: An Introduction to Low-Impact Building Materials. BRE Inf. Pap. 2011, str. 1–6
- [12] Piątkiewicz W., Narloch P., Pietruszka B., Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties, *Archives of Civil Engineering* 2020, LXVI
- [13] Colinart T., Glouannec P., Chauvelon P., Influence of the Setting Process and the Formulation on the Drying of Hemp Concrete, *Construction Building Materials* 30, 2012, str. 372–380, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030
- [14] Nguyen T. T., Picandet V., Carre P., Lecompte T., Amziane S., Bailey C., Thu T., Picandet V., Carre P., Lecompte T. et al., Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete, 2011, art. 8189, doi:10.3166/EJECE.14.545-560
- [15] Tronet P., Lecompte T., Picandet V., Bailey C., Study of Lime Hemp Concrete (LHC) – Mix Design, Casting Process and Mechanical Behaviour, *Cement Concrete Composites* 67, 2016, str. 60–72, doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004
- [16] Brzyski P., Gladecki M., Rumińska M., Pietrak K., Kubiś M., Łapka P., Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite, *Materials (Basel)*, 13, 2020, str. 1–17, doi:10.3390/ma13235383

10.5. Publikacja [4]



Article

Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp–Lime Composites

Wojciech Piątkiewicz , Piotr Narloch , Zuzanna Wólczyńska and Joanna Mańczak

Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland
* Correspondence: wojciech.piatkiewicz.dokt@pw.edu.pl (W.P.); piotr.narloch@pw.edu.pl (P.N.)

Abstract

This study investigates the effect of hemp shive granulometry on the thermal conductivity and microstructure of hemp–lime composites. Three distinct particle size fractions—fine, medium, and coarse—were characterized using high-resolution image analysis to determine geometric parameters such as Feret diameters, circularity, and elongation. Composite mixtures with varying binder-to-shive and water-to-shive ratios were prepared and compacted at a consistent level to isolate the influence of aggregate granulometry on thermal performance. Results demonstrate a clear inverse relationship between particle size and thermal conductivity, with coarse fractions reducing thermal conductivity by up to 7.6% compared to fine fractions. Composite density was also affected, decreasing with increasing particle size, confirming the impact of granulometry on pore structure and packing density. However, binder content exhibited the most significant effect on thermal conductivity, with a 20% increase observed for higher binder-to-shive ratios irrespective of shive size. The study further establishes that a 15 g sample size (~2400 particles) provides sufficient statistical accuracy for granulometric characterization using image analysis. These findings provide critical insights for optimizing hemp–lime composites for enhanced thermal insulation performance, supporting sustainable construction practices by informing material formulation and processing parameters.

Keywords: hemp–lime composite; hemp shives; granulometry; thermal conductivity; particle size distribution; binder-to-shive ratio; image analysis; sustainable building material



Academic Editors: Caifeng Lu, Guanglin Yuan and Qingsong Zhou

Received: 25 June 2025

Revised: 11 July 2025

Accepted: 21 July 2025

Published: 23 July 2025

Citation: Piątkiewicz, W.; Narloch, P.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp–Lime Composites. *Materials* **2025**, *18*, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma18153458>

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

1.1. Effect of Hemp Shive Size on Thermal Conductivity

Hemp–lime composite is a lightweight construction material obtained by combining an organic aggregate—hemp shives (the woody inner parts of the hemp stalk)—with a lime-based binder. It is characterized by very high porosity, which provides excellent thermal insulation properties [1,2]. Typical thermal conductivity values (λ) for dry hemp–lime composites range from approximately 0.06 to 0.13 W/(m·K), depending on bulk density, mix composition, and measurement orientation [3,4]. Due to its hygroscopic and open-pore structure, the hemp–lime composite also helps regulate indoor humidity and microclimate, offering an attractive and ecological alternative to conventional insulation materials [5].

The size of hemp shives can be adjusted through cultivation methods (e.g., sowing density) and processing technologies (e.g., roller tooth geometry used for decortication). Due to the anatomical structure of hemp, longitudinal particles aligned with the plant's growth direction are formed during crushing and decortication [5]. Their length is typically

several times greater than their width (see Figure 1). An increased proportion of fine shive fractions leads to a denser composite structure. Smaller particles more effectively fill the voids between larger ones, which increases the bulk density and reduces the overall porosity of the material compared to mixtures using coarser aggregate. Experimental research confirms this correlation: Fine fractions increase the composite's density and decrease its porosity. For example, in starch-based hemp composites, the use of short shives (0–5 mm) resulted in significantly higher bulk density and lower porosity compared to composites with coarse shives (0–20 mm) [6]. The bulk density of the fine-fraction sample was approximately 135 kg/m^3 , with a porosity of $\sim 89\%$, whereas the coarse-fraction composite had a density of $\sim 110 \text{ kg/m}^3$ and a porosity of $\sim 91\%$ [6]. Similarly, another study found that reducing the average shive size (from $\sim 9 \text{ mm}$ to $\sim 3 \text{ mm}$) led to a noticeable decrease in the total porosity of the resulting hemp composite [7]. Smaller particles fill more free space in the mix, reducing the volume of air voids. Consequently, composites with higher content of fine fractions exhibit greater packing density and lower porosity, which often translates to changes in other properties (e.g., mechanical or thermal) [7].



Figure 1. Irregularity of the shape of hemp shives used in the study.

Finer hemp shive fractions have a greater specific surface area compared to coarser fractions. This means that for the same filler volume, smaller particles require more binder coverage and absorb more mixing water. Shives smaller than 5 mm increase the demand for both water and binder due to their higher surface area [4].

The same pattern holds for binders other than lime: Larger hemp shives produce more porous mixtures, reduce the material's density, and promote better thermal insulation. Finer shives can fill part of the voids, slightly increasing composite density and thermal conductivity (λ), even when binder content remains constant [8].

In one study [9], a composite made with fine hemp shives (FHS) exhibited a thermal conductivity of $\lambda = 0.1050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, while that made with coarse shives (THS) achieved $\lambda = 0.0992 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ —a difference of around 6%, attributed to the slightly higher bulk density of the fine-shive composite (approximately 382 kg/m^3 vs. 377 kg/m^3). Williams et al. [4] studied thermal conductivity of composites using shives with mean lengths of $\sim 7.5 \text{ mm}$ (medium fraction) and $\sim 15.3 \text{ mm}$ (coarse fraction). A slightly higher λ was observed for the finer fraction, with both values around $0.12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; the differences were minimal. The authors noted that the effect of granulometry was less significant than expected—fine shives increased λ only marginally.

In another study [4], French hemp shives were divided into four fractions: 7 (fine), 14 (coarse), and 2 blended fractions (8 and 12, mixed 50/50 by weight, medium). Particle size was determined via image analysis of 20 g of aggregate in ImageJ, measuring bulk density, median particle length and width, interquartile range, and mean aspect ratio (length/width). The analysis assumed equal particle density and that width equaled thickness, ignoring irregular shapes and varying bulk densities. Results showed minimal influence of shive size on thermal conductivity. For mixtures with a binder-to-shive ratio of 2.2, thermal conductivity measured perpendicular to the casting direction was about 0.121 W/(m·K) for fine aggregate and about 0.118 W/(m·K) for coarse, suggesting only a slight improvement in insulating performance with increased particle size. However, when the casting direction was parallel to heat flow, λ dropped to about 0.1 W/(m·K) for the fine fraction—indicating a 17% reduction. A similar trend was observed for coarse shives, highlighting that composite anisotropy has a more pronounced impact on thermal insulation than particle size. Other studies also confirm that shive granulometry has a minor influence on λ —typically only a few percent—compared to other factors [4,9–11].

Some researchers aim to identify the optimal balance between short and long shive particles. In study [6], composites were tested using either 0–5 mm (fine) or 0–20 mm (coarse) shives. The fine fraction had a higher bulk density ($\sim 135 \text{ kg/m}^3$) and slightly lower porosity (89.3% vs. 91.3%) than the coarse fraction. In single-fraction samples, the composite made entirely of fine shives was denser and exhibited slightly higher thermal conductivity than that made of coarse shives. To achieve an optimal balance of mechanical and hygrothermal properties, a mix containing 30% fine (0–5 mm) and 70% coarse (0–20 mm) shives was developed. This blend achieved the best thermal properties while maintaining minimum strength requirements [6].

There are, however, studies reporting significantly greater impact of shive granulometry on thermal conductivity. A comprehensive study [7] tested 13 different types of hemp shives with bulk densities ranging from 70.8 kg/m^3 to 158 kg/m^3 (Figure 2). When processed using the same production method (compression, casting direction), the same binder, and the same curing conditions, thermal insulation performance varied noticeably. Samples tested at 30 days exhibited differences of up to 34% ($\lambda = 0.092$ to 0.123 W/(m·K)). At 180 days, the difference decreased but remained significant—up to 27%.

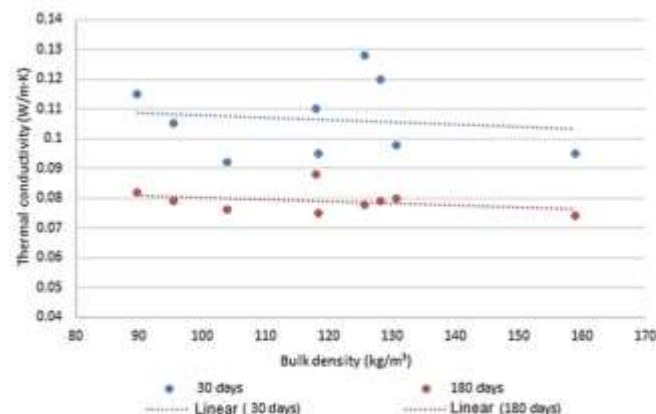


Figure 2. Influence of hemp shives and sample age on thermal conductivity.

In starch- and shive-based insulation boards, the smallest shive fraction (2.5–5 mm) enabled the lowest thermal conductivity, $\lambda \approx 0.061 \text{ W/(m·K)}$ for dry material with a

density of approximately 280 kg/m³. In comparison, samples containing larger particles (fractions of 5–20 mm) exhibited higher λ values in the range of 0.07–0.09 W/(m·K) at similar densities. The finest shives allowed for slightly better insulation performance than mixtures dominated by coarser fractions [12].

Hemp shives primarily consist of three biopolymers: cellulose, hemicellulose, and lignin. Additionally, pectins—mainly present in the plant—along with lipids, carbohydrates, and proteins, play a significant role when using plant aggregates in combination with mineral binders. These compounds interact with cement and lime components, weakening the binding process [5]. The chemical composition of hemp can vary depending on climatic conditions, harvest timing, processing methods, and plant variety. In study [13], hemp shives produced in France, Germany, and the United Kingdom were compared. The plant aggregates from these countries differed in cultivar, harvest date and method, and decortication technique (Table 1). Therefore, assessing the influence of hemp shive granulometry based on materials from different suppliers may be misleading and fail to account for chemical composition differences.

Table 1. Chemical composition of hemp shives by harvest and decortication method (France: mature, dried, no retting; Germany: field-dried before harvest; UK: early harvest with field retting) [13].

Component (% of Dry Mass)	Hemp Shives from France	Hemp Shives from Germany	Hemp Shives from the United Kingdom
Cellulose	47.3	45.6	49.2
Hemicellulose	18.3	17.8	21
Lignin	21.8	23.3	21.9
Extractives	6	5.1	6.2
Others (including ash)	10.3	10.7	5.1

1.2. Influence of Component Proportions on Thermal Conductivity

Hemp shives, which constitute the primary component of hemp–lime composites, exhibit relatively low thermal conductivity due to their porous nature, typically ranging from 0.051 to 0.058 W/m·K [14]. In contrast, the mineral binder forming the composite matrix possesses significantly poorer thermal insulation properties. The principal component of the binder—hydrated lime—has a thermal conductivity in the range of 0.65 to 0.84 W/m·K in its dry mortar form [15]. Therefore, determining the binder-to-shive mass ratio is a critical factor in the design of hemp–lime composites. Reported values in the literature vary widely, from as high as 4.82 [10] to as low as 0.69 [16]. For cast-in-place wall applications (shuttering method), commonly used ratios fall within the range of 1.5 to 2 [17,18]. In a comparative study [19] evaluating four different binder-to-shive ratios from 0.75 to 2.5, a significant increase in both composite density and thermal conductivity—up to 66%—was observed.

Another parameter that significantly affects material density is the water-to-shive ratio. The optimal amount of water is rarely defined precisely in the literature; instead, practitioners often rely on empirical assessments of mix workability or practical experience [20,21]. Nevertheless, it is well established that water content influences the compaction behavior and the resulting density of the mixture. As noted by [22], wet mixes are more readily compacted because the water-absorbed aggregate becomes heavier, more elastic, and more deformable. Study [4] also demonstrated that the binder content in the mix exerts a considerably stronger effect on the composite’s thermal performance than aggregate granulometry. An increase in the binder-to-shive ratio from 1.8 to 2.6 resulted in a 29% rise in thermal conductivity for composites containing medium-sized shives (see Figure 3).

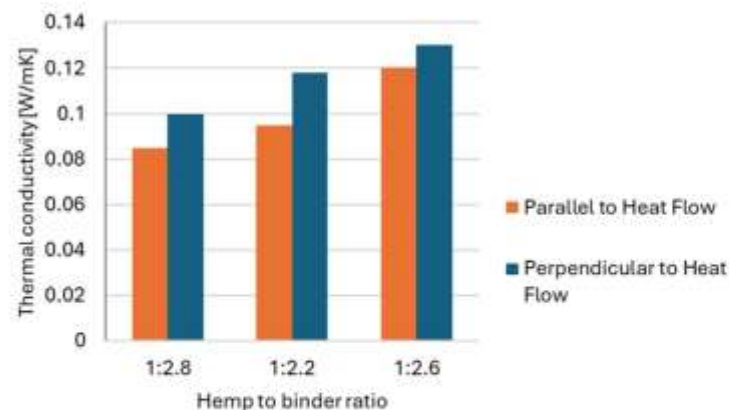


Figure 3. Thermal conductivity of samples with three shive-to-binder ratios, formed in two orientations [4].

1.3. Influence of Material Compression on Thermal Conductivity

In the literature, various descriptions can be found regarding the method and degree of compaction, such as “light tamping” [4], “manual compaction using a wooden mallet” [9], or “ramming to eliminate large air voids” [23]. Studies [24,25] investigated the influence of compaction on the mechanical and thermal properties of hemp–lime composites. In these studies, fresh material was compressed under stress ranging from 0.6 to 1 MPa, reducing its initial volume by a factor of 3. By varying the level of compaction, researchers observed a significant improvement in mechanical properties, accompanied by a moderate reduction in thermal conductivity due to decreased material porosity [24].

In another study [26], three levels of compaction were defined based on the percentage reduction in volume relative to the uncompressed state: 30%, 45%, and 60%. The compaction level directly influenced both compressive strength and thermal conductivity. A similar approach was adopted in study [4], where samples were cast in 50 mm layers, and compaction was quantified as a 45% densification relative to the loose-state density. The loose-state density was determined by weighing a known volume of uncompressed material gently placed by hand.

It is important to note that the 45% value in [26] refers to volume reduction, whereas in [4], it refers to increased density. Thus, the same percentage value does not denote the same physical process. According to the terminology in [26], a 45% volume reduction corresponds to a final volume of approximately 68.97% of the initial volume.

1.4. Methods for Determining Hemp Shive Size

The most commonly reported characteristics of hemp shives used in hemp–lime composites are bulk density and origin (see Table 2). Bulk density provides a general indication of particle size and shape, while the material’s origin may reflect the processing technology, and thus, the quality of the aggregate (e.g., fiber and dust content and granulometric uniformity) [27]. Nevertheless, details regarding the presence of fibers and fines—which can significantly affect composite properties—are often omitted or limited to vague statements.

Another important property that is sometimes reported or investigated is the water absorption capacity of hemp shives. This parameter influences the amount of water required in the mix to ensure proper binder hydration, as well as the drying time of the material and the potential risk of biological degradation [28].

Among the most frequently provided parameters by hemp shive suppliers is the particle size distribution. According to French hemp construction association standards,

this distribution defines the size range within which 95% of the particles fall [29]. However, this range is often very broad and does not provide a precise representation of the actual particle dimensions. Furthermore, hemp shives exhibit an elongated shape, meaning that reporting only a single dimension can be misleading. Occasionally, granulometry is described using a generalized dimension (e.g., $5 \times 5 \times 15$ mm) [30], a broad range of geometric attributes, or a vague reference to particle length [31].

Table 2. Characteristics of hemp shives in scientific literature.

Origin	Bulk Density	Absolute Density	Porosity	Water Absorption	Mean Particle Length	Mean Particle Width	Mean Particle Thickness	Length Range	Width Range	Thickness Range	Major Length	Major Width	Width to Length Ratio	Source	
X	X				X	X								[24]	
X	X				X	X	X							[18]	
X	X							X	X	X				[11]	
	X													[33]	
X	X													[12]	
X	X	X	X	X									X	[13]	
X	X													[14]	
X	X			X										[15]	
X	X			X										[16]	
X	X			X										[10]	
X	X			X										[17]	
X	X			X										[36]	
X	X													[39]	
X					X	X					X	X		[4]	
X	X													[27]	
X	X				X	X								[43]	
X	X				X	X							X	[6]	
X	X			X	X	X								[7]	
X	X			X										[41]	
	X	X	X	X										[28]	
Width to Length Ratio Graph	Particle Size Graph	Equivalent Diameter	Minor and Major Axis	Elongation	Particle Size Range	Grading Curve	Fiber Content	Dust Content	Particle Disposition	Particle Surface area	Mean Particle Surface Area	Mean Particle Mass	Friction	Exhaustive Properties	Reference
															[24]
															[18]
					X		X	X							[11]
									X						[33]
					X		X	X							[12]
X															[10]
	X	X	X												[14]
		X	X	X			X	X		X					[15]
		X	X						X	X					[16]
						X	X								[36]
						X	X								[39]
						X		X					X		[4]
						X	X	X							[27]
						X									[43]
						X									[6]
			X								X	X			[7]
		X	X						X	X				X	[41]
				X											[28]

To precisely describe the shape of hemp shives, researchers most commonly report a set of dimensional parameters: the average particle length and width, the major and minor axes of an ellipse fitted to the aggregate particle, or the maximum and minimum Feret diameters (see Figure 4).

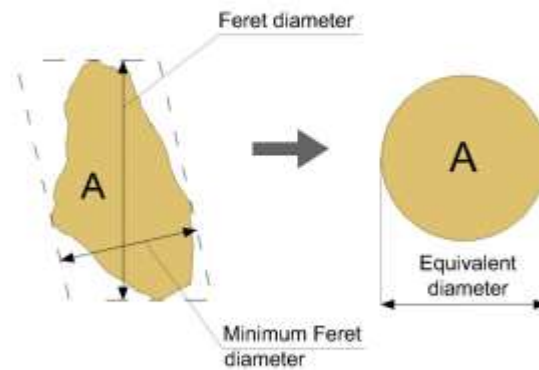


Figure 4. Definition of geometric parameters used to characterize the shape of hemp shives.

There is no clearly defined standard for determining the length and width of irregularly shaped particles such as hemp shives. These dimensions are most commonly obtained through image analysis techniques [16,35,36,41]. Many researchers manually measure a batch of several grams of particles using tools such as calipers, which is a highly time-consuming task due to the small size of the aggregate [39]. Based on these measurements, parameters such as particle elongation—defined as the ratio of the major to minor axis [7,16]—or the width-to-length ratio [4,33] can be calculated.

Image analysis also enables accurate measurement of the surface area of each individual particle. From these data, researchers often derive the equivalent diameter, defined as the diameter of a circle having the same area as the measured particle [16] (see Figure 4).

Another useful parameter for describing particle shape is circularity, where a value of 0 corresponds to an infinitely elongated shape and a value of 1 represents a perfect sphere [16]. Circularity is calculated using the following Equation (1):

$$\text{Circularity} = \frac{4\pi \cdot A}{P^2} \quad (1)$$

where A is the particle surface area and P is the perimeter.

Reporting only the average size of hemp shives is often insufficient due to the high variability in particle surface areas. Therefore, researchers frequently use graphical methods to illustrate the distribution of particle characteristics, such as elongation, circularity, or size (e.g., length, width, or axes) [4]. Rather than referencing particle count, these analyses typically rely on the cumulative area represented by the particles [41]. This approach provides a clearer representation of how specific sizes or shapes are distributed across the total volume (or surface area) of the aggregate.

In recent years, increased focus on sustainable construction has driven research into composite materials derived from renewable resources. The RILEM Technical Committee TC 236-BBM (2010–2016) developed recommendations for characterizing bio-aggregates, with a particular emphasis on hemp shives. The committee highlighted that traditional sieve analysis is less suitable for these materials due to their irregular, elongated, and porous particle structure, which can lead to inaccurate granulometric classification. Instead, it recommends advanced imaging and morphological analysis, such as digital image-based

techniques, for precise determination of particle dimensions and shapes. While sieve analysis may be used as a comparative method with clearly defined testing conditions, the committee advocates adopting modern measurement techniques to enhance result repeatability and reliability [42].

The various available methods for measuring the geometric characteristics of hemp shives differ significantly in terms of data resolution, accuracy, and experimental requirements (see Table 3). Sieve analysis enables the examination of relatively large sample masses—for example, 100 g of hemp shives were sieved in [34], and up to 112 g in [39]. Such quantities contain tens of thousands of particles, providing a statistically stable and representative granulometric distribution. However, the main source of uncertainty in this method is that irregular particles can pass through sieve openings based on their orientation, not actual dimensions. Elongated fragments may be classified into smaller fractions if they pass vertically through the mesh despite their longer dimension. Consequently, sieve analysis primarily reflects particle width rather than true length or shape [32,34,39]. Furthermore, intensive sieving may cause fragile particles to break apart, increasing the proportion of fine fractions (dust).

Table 3. Methods for determining hemp shive characteristics in scientific articles.

Method	Reference
Dried and dedusted hemp shives were sieved into granulometric groups: 0.5–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, and 8–16 mm.	[32]
A 10 g sample of hemp shives was photographed using a digital camera. After applying a threshold filter and creating a binary image, particle length and width were measured using ImageJ. The width/length ratio was reported.	[33]
Dried 100 g of hemp shives were sieved, and the percentage of particles smaller than 2.36 mm (87%) and in the range of 2.36–6.3 mm (10%) was determined according to ASTM C136–06.	[34]
According to the RILEM TC 236-BBM protocol, a 3–6 g sample of oven-dried hemp shives (containing at least 2000 particles) is evenly spread on a scanner to prevent particle overlap. An 8-bit grayscale image with 600 dpi resolution is captured and analyzed using ImageJ software. The equivalent diameter and elongation are reported.	[16,35,36,41]
Sieve analysis and 2D image analysis were performed on a 3 g sample using ImageJ software. The equivalent diameter was reported.	[38]
A 112 g sample was sieved for 20 min using sieves with mesh sizes of 8, 4, 2, 1, and 0.5 mm. Subsequently, a 14.6 g sub-sample was manually sorted using a caliper into the following size fractions: <8 mm, 8–16 mm, 16–32 mm, and >32 mm.	[39]
At least 1000 particles from each sample—10 g for coarse aggregate and 5 g for fine aggregate—were measured using an electronic caliper. Both length and width of the hemp shive fragments were recorded.	[9]
The length and width of the particles were measured using 2D image analysis on a 20 g sample.	[40]
A 20 g sample was scanned in batches against a blue background at a resolution of 1200 dpi. All images were processed using ImageJ software. To estimate the aggregate volume, it was assumed that the average particle thickness is proportional to its width. The width/length ratio was reported.	[4]
Samples of 3 g for each type of hemp shive were scanned and analyzed using ImageJ software. The elongation of the particles was reported.	[7]

A non-invasive method of size determination is manual measurement using calipers. This method is inherently time-consuming and typically includes hundreds of individual particles. For example, in study [9], over 1000 fragments per sample were manually measured for length and width. Such high numbers are rare; more often, researchers

limit the sample to a few hundred or fewer representatively selected particles, which may compromise the accuracy of the size distribution. Additionally, manual caliper measurements are subject to human error. Consistently applying the caliper to each irregular particle is challenging, and selecting what constitutes “length” or “width” may be subjective (e.g., whether to include protruding fibers). Although digital calipers typically have high resolution (0.01 mm), human error and fatigue over time can result in deviations of several tenths of a millimeter.

Two-dimensional (2D) image analysis methods—based on digital processing of scanned or photographed particles—allow for the automated determination of length, width, projected area, and shape parameters for each individual particle. These methods offer a more representative depiction of particle geometry than traditional sieving. Studies have confirmed that granulometric curves obtained via sieve analysis and 2D image analysis differ substantially [25]. Relying solely on sieve methods for plant-based aggregates can result in imprecise observations, whereas image analysis provides a more accurate description of particle morphology [38].

Software such as ImageJ enables automatic measurement of hundreds or thousands of particles from relatively small samples (typically 3–20 g) [4,33,38]. Due to the low density of hemp shives, even small sample masses translate into large particle counts. According to RILEM TC 236-BBM guidelines, image analysis should use 3–6 g of shives, which corresponds to at least 2000 particles—a quantity deemed sufficient to achieve a statistically representative size distribution [42]. Increasing the number of particles enhances statistical reliability but also increases the workload of data preparation and processing.

Proper image preparation and processing are crucial for 2D image analysis. Overlapping or touching particles may be interpreted as a single large particle, inflating the measured dimensions. The RILEM protocol recommends placing hemp shives flat and separated on the scanner surface. Another major source of error is the thresholding (binarization) level used to segment particles. If the threshold is too low, thin particle edges may be lost; if it is too high, adjacent particles may merge or appear oversized due to halo effects. Careful selection of the threshold level is therefore critical [33]. Dust and very fine particles may introduce noise, distorting the distribution by contributing a large number of small objects.

One limitation of 2D image analysis is that it does not capture particle thickness (the third dimension). Estimating volume or 3D shape requires additional assumptions or independent thickness measurements. For example, in [4], particle volume was approximated by assuming that thickness is proportional to particle width. While this assumption allows rough volume estimation, it introduces uncertainty and simplifies the real particle geometry. More accurate 3D characterization of hemp shives can be obtained via X-ray computed tomography (CT) [10]. This method enables 3D reconstruction of particle morphology, providing precise measurements of size, volume, porosity, and shape factors. Despite its accuracy, CT is limited by high equipment costs, the need for specialized personnel, long scan times at high resolutions, sample preparation constraints, and the computational demands of 3D data analysis. As such, it remains impractical for routine use, especially in studies with large sample sizes or limited resources.

Therefore, the aim of this study is to assess the influence of hemp shive granulometry on the thermal conductivity of hemp–lime composites under controlled conditions, using image-based aggregate characterization.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Binder Characteristics

The binder was prepared using hydrated lime (CL 90-S), Portland cement (CEM I 42.5R), and metakaolin. The proportions and composition of the binder were selected to utilize materials widely available in Poland and to allow for a precise characterization of its chemical makeup. Based on previous studies, a composition consisting of 70–75% hydrated lime, 15–20% hydraulic binder, and 10–15% pozzolanic additive is among the most commonly used formulations [3,10,19,31,43–47].

The addition of cement is intended to improve early strength, which is important for practical applications such as rapid formwork removal. The inclusion of a pozzolanic material such as metakaolin serves to reduce thermal conductivity while also having a lower embodied energy compared to cement [33,48,49]. By reacting with calcium hydroxide, metakaolin forms cementitious compounds, which enhance the durability and mechanical strength of the binder system [50].

The specific proportions of additives in the lime-based binder were chosen to optimize binder reactivity and the mechanical performance of the hemp–lime composite material [34].

2.1.2. Hemp Shives

Industrial hemp of the Futura 75 variety, commonly used for construction purposes [27,51,52], was used in this study. The crop was grown during a single vegetation season (2023) and processed by the same manufacturer—Podlaskie Konopie (Dobrzyniówka, Poland)—into fiber and hemp shives. This ensured the uniformity of the raw material and minimized the influence of variables other than particle size distribution. During the production process, the hemp underwent natural retting, a method in which cut hemp stalks are left in the field, where moisture and weather conditions (fog, rain, temperature) promote colonization by microorganisms, primarily fungi. These microorganisms penetrate the stalk and break down the pectins that bind the fiber to the woody core [53]. This process, controlled by the farmer, serves as a form of preliminary decortication, which facilitates the separation of fibers from the woody part used to produce shives. A side effect of retting is the localized discoloration of some hemp shive particles.

The delivered hemp shives were separated into fractions using mechanical sieving with 2 mm and 4 mm mesh screens. This resulted in two size fractions: fine (F), consisting of particles passing through the 4 mm sieve and retained on the 2 mm sieve, and coarse (C), comprising particles retained on the 4 mm sieve. A third fraction, medium (M), was prepared as a 1:1 weight mixture of the fine and coarse fractions. The bulk density of the prepared aggregate groups was determined in accordance with the recommendations of RILEM TC 236-BBM (Table 4) [42].

Table 4. Characteristics of hemp shive groups used in the study.

Hemp Shive Group	Bulk Density [kg/m ³]	Number of Particles	Mean Feret Diameter [mm]	Mean Minimum Feret Diameter [mm]	Mean Equivalent Diameter (ED) [mm]	Mean Area [mm ²]	Mean Circularity [-]	Mean Elongation [-]
Fine	108.6	19,841	9.26	3.15	4.47	21.33	0.48	3.09
Medium	103.8	17,114	10.02	3.42	4.83	25.52	0.49	3.10
Coarse	97.5	10,536	12.34	4.01	5.79	36.49	0.45	3.33

An image analysis method was employed to precisely determine particle shapes and accurately characterize each granulometric fraction. The applied algorithm (see Figure 5), designed for detailed analysis of hemp shive particle sizes in composite mixtures, involved conducting 30 independent scans of 3 g samples. Before each scan, the material was manually spread on a flatbed scanner within an area of approximately 180×180 mm (± 3 mm), ensuring that individual particles did not touch each other. This arrangement was essential to enable unambiguous contour detection and to minimize image analysis errors.

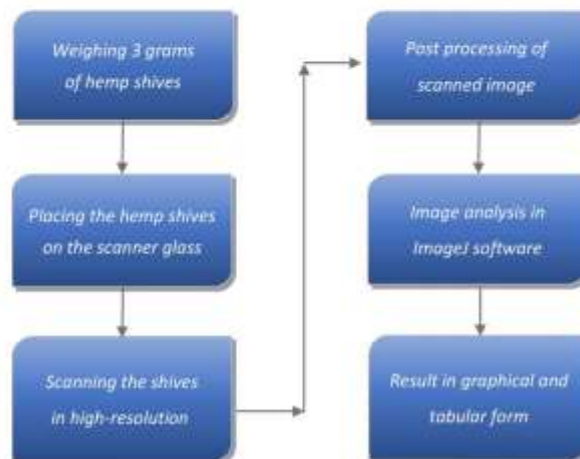


Figure 5. Schematic diagram of hemp shive particle size determination.

Samples were scanned at a 1200×1200 dpi resolution in 24-bit color mode, and the images were saved in lossless PNG format. This configuration ensured high image quality, resolution, and contrast, which are critical for precise segmentation and subsequent data processing in ImageJ software, version 1.54g (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA). Further in the manuscript, the software is referred to simply as *ImageJ*. To reduce segmentation errors caused by particle color variability, a supervised image correction step was implemented, allowing for high-accuracy contour identification.

The final images were imported into the ImageJ environment, calibrated using a reference scale, and analyzed using the “Analyze Particles” function. This process yielded fundamental geometric parameters of the particles, such as area, perimeter, Feret diameter, and minimum Feret diameter. The Feret diameter represents the maximum dimension of a particle and can be interpreted as its maximum length, given the lack of a strict definition for particle length. Conversely, the minimum Feret diameter can be considered equivalent to the maximum particle width.

To ensure transparency and enable reproducibility, all high-resolution scanned images have been made publicly available on Zenodo (DOI: 10.5281/zenodo.15664512, accessed on 22 July 2025) [54]. Due to their large size, these files were not included directly as Supplementary Materials. The Zenodo repository also contains the binary images obtained through thresholding, as well as detailed morphometric analysis results exported from ImageJ in spreadsheet format (*.xlsx), including a comprehensive summary of all scans. Below, selected illustrative examples are presented: a scan of a 3 g hemp shive sample (Figure 6), the corresponding binary image (Figure 7), and the contours of the analyzed particles with individual numbering (Figure 8).

Image analysis provided a comprehensive dataset enabling precise characterization of particle shape and size. Table 4 presents a set of geometric parameters calculated based on the aggregated ImageJ results for each granulometric group. To accurately illustrate the particle size distribution, graphs were generated showing the maximum Feret diameter, minimum Feret diameter, and equivalent diameter (ED) in relation to the percentage contribution of each class to the total particle surface area (see Figure 9).



Figure 6. Sample scan of 3 g of hemp shives arranged on a 180×180 mm surface.

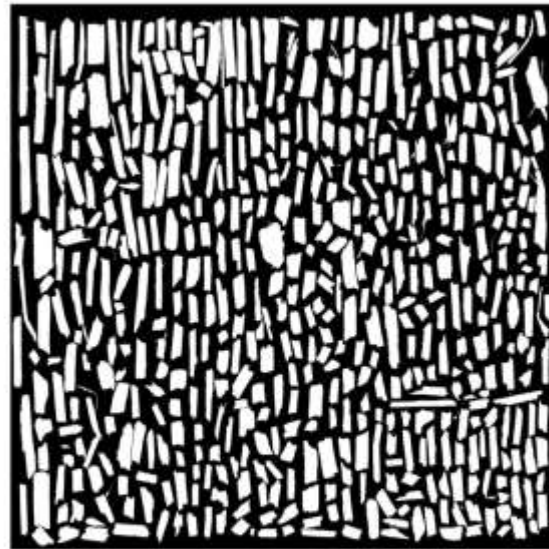


Figure 7. Left: thresholded binary images showing the material structure. Right: detected contours of the analyzed structures in ImageJ.

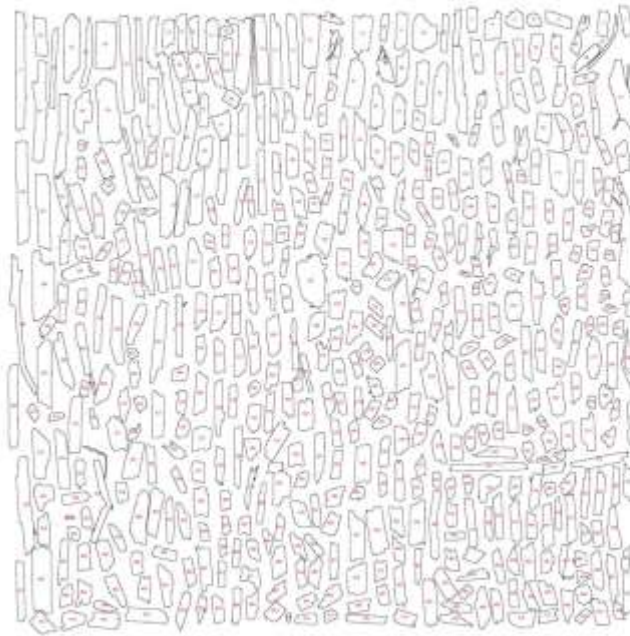


Figure 8. Identification of hemp shive particles using ImageJ (red numbers denote particle IDs).

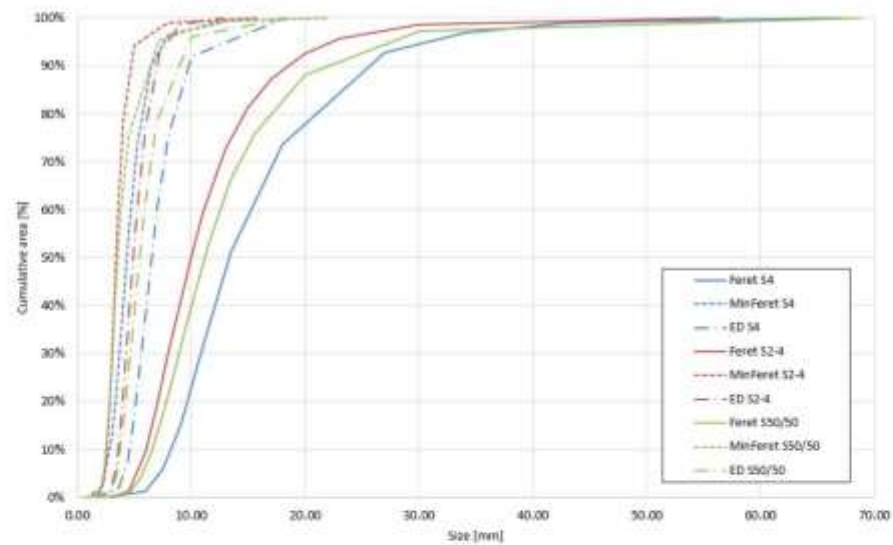


Figure 9. Particle size distribution of hemp shives.

2.2. Experimental Design

To assess the influence of hemp shive granulometry on the thermal conductivity of hemp–lime composites, a series of laboratory mixtures was developed, varying in terms of aggregate particle size distribution and the proportions of hemp shives, water, and binder

(see Table 5). Each mixture was prepared and tested under controlled conditions to enable a detailed analysis of the relationship between material structure and thermal performance.

Table 5. The composite formulation (by mass) defines the weight ratio of binder, hemp shives, and water. The letters F, M, and C in the mixture names indicate the use of fine (F), medium (M), and coarse (C) aggregate, respectively.

Series	Mixtures	Hemp Shives	Binder	Water
HL1	HL1.F	1	2	2.74
	HL1.M			
	HL1.C			
HL2	HL2.F	1	2	3.14
	HL2.M			
	HL2.C			
HL3	HL3.F	1	3	3.96
	HL3.M			
	HL4.C			

The formulation was based on one of the most commonly adopted shive-to-binder mass ratios—2:1—frequently cited in the literature on hemp–lime composites [3,9,19,21,30,31,35,36,43,44,46,47,49,52,55–58].

Given the lack of a universally accepted method for determining the optimal water content in hemp–lime mixtures, the adopted values were derived from a review of previous studies employing similar binder compositions. In studies [31,43,52,55], for mixtures with comparable binder content, the mass ratio of water to shives ranged from 2.75 to 2.9. In a doctoral dissertation [20], where a binder consisting of 70% hydrated lime (CL90-S), 15% Portland cement (CEM II/B-V 32.5 R), and 15% metakaolin was used, the binder–shive–water ratio was set at 2:1:2.8.

Based on literature data as well as preliminary experimental observations, a water-to-shive mass ratio of 2.74 was selected for this study. In the second tested mixture, a higher binder content was introduced to evaluate its impact on the thermal conductivity of the composite. In all cases, the same compaction level of the fresh mix was applied—150% relative to its loose-state volume—to ensure uniform sample preparation conditions.

2.3. Methods

Sample Preparation

In the first stage of sample preparation, appropriate amounts of all composite components—binder constituents, hemp shives, and water—were accurately weighed. The dry binder ingredients were then thoroughly mixed, after which the entire volume of water was added and blended using a planetary mixer with a vertical rotation axis. This preparation method—starting with the premixing of the binder and water—has also been employed in other experimental studies on hemp–lime composites [10,18,59].

After achieving a homogeneous binder consistency (typically within 1–3 min), the hemp shives were gradually added to the mixer. Due to the low bulk density of the shives, this specific sequence of component addition was necessary to prevent overloading the mixer and to avoid the risk of material dispersal beyond the mixing chamber. Once the binder was evenly distributed throughout the shive mass, the mixing process was considered complete, and the mixer was turned off. The total mixing time ranged from 7 to 9 min.

Immediately after preparation, the bulk (loose) density of the mixture—i.e., without compaction—was determined using a box-shaped mold measuring 30 × 30 cm with a height of 8 cm.

After determining the loose bulk density of the mixture in the laboratory and setting the target compaction level to 150%, the required material mass for a single sample was calculated. Samples were formed in molds of the same dimensions as those used for bulk density assessment, but oriented vertically (30 cm in height), using a wooden tamper. The mixture was compacted in four equal layers, each approximately 7.5 cm thick, ensuring uniform densification. The total mixing time did not exceed 5 min. A comparable procedure was applied in [4], where the compaction degree was defined as a 45% densification of the loose-state density, equivalent to 145% according to the present study's methodology.

After 24 h, the samples were demolded and transferred to a climate chamber maintained at 20 ± 2 °C and $60 \pm 10\%$ relative humidity (RH). All material property tests were conducted after a 120-day curing period. Prior to testing, the specimens were further conditioned for 7 days under laboratory conditions at 20 ± 2 °C and $50 \pm 10\%$ RH (see Figure 10). The samples were tested in an air-dry state, with a stabilized moisture content of approximately 12% (by weight), measured after curing and conditioning.



Figure 10. Samples from each series prepared for thermal conductivity testing.

Thermal conductivity was measured using a FOX 314 heat flow meter (manufacturer: TA Instruments, New Castle, DE, USA) with a measurement area of 10×10 cm (Figure 11), based on the principle of unidirectional, homogeneous, and steady-state heat transfer. The operation of the device relies on the one-dimensional Fourier's law, as expressed in Equation (2):

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

where:

q —heat flux (W/m^2),

λ —thermal conductivity ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$),

dT/dx —temperature gradient (K/m).



Figure 11. Thermal conductivity testing using the FOX 314 apparatus.

The samples were placed between two flat plates with controlled temperatures—a heated lower plate and a cooled upper plate—with a temperature difference of 20 K and an average sample temperature of 20 °C, in accordance with EN 12,667 and the procedure described in [19]. Heat flow occurred vertically—from bottom to top—in a direction perpendicular to the compaction direction of the sample, reflecting the actual heat transfer conditions in shuttered wall assemblies, which replicate the construction method used on-site (see Figure 11). Each measurement lasted at least 3 h, and five independent samples were tested for each material series.

3. Results

3.1. Sample Density

In all series, as the aggregate size increased, a noticeable decrease in sample density was observed (Figure 12). The density drop between fine (F) and coarse (C) aggregates ranged from 2.0% to 8.6%. The most significant decrease occurred in the HL1 series (with lower binder content), while the smallest was observed in HL3 (with higher binder content). The density difference between fine (F) and medium (M) aggregates was more pronounced than between medium (M) and coarse (C) ones. In the HL1 series, the density decreased by as much as 7.9%, while in HL2, the reduction was 4.9%. Further density decreases between medium and coarse aggregates were less significant, ranging from 0.8% to 2.4%.

An increase in the water content of the mixture resulted in higher composite density. The most noticeable density increase was observed in the series with medium aggregate, where the difference between HL1.M and HL2.M was 6.4%. The smallest increase occurred in the mixtures with fine aggregate, with a difference of only 3% between HL1.F and HL2.F. On average, increasing the water-to-binder ratio from 1.37 to 1.57 resulted in a density increase of 4.7%.

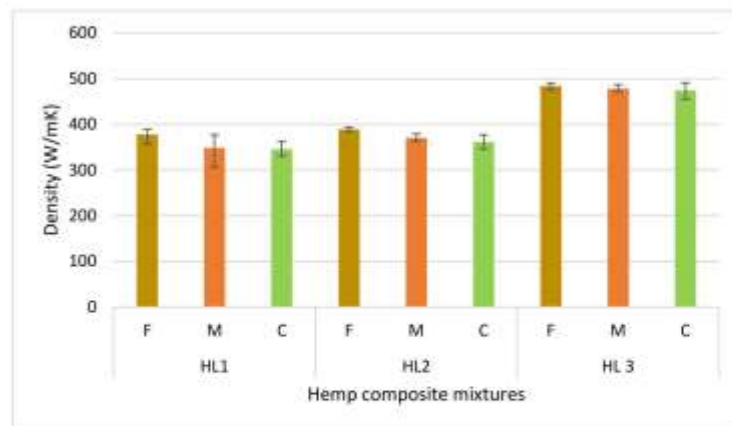


Figure 12. Average density of samples from each mixture.

3.2. Thermal Conductivity

Similar to the trends observed in sample density, an increase in the average particle size of hemp shives resulted in a decrease in thermal conductivity (Figure 13). The most pronounced drop was observed in series HL2, where thermal conductivity decreased by 7.6% between the fine and coarse aggregates. Comparable decreases were recorded in series HL1 and HL3, amounting to 3.3% and 1.5%, respectively.

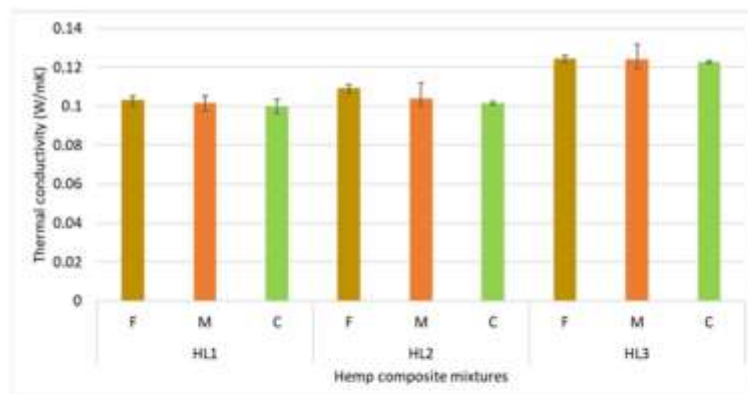


Figure 13. Thermal conductivity (λ) of hemp-lime composite mixtures as a function of shive granulometry and binder-to-shive ratio.

The difference in λ between fine (F), medium (M), and coarse (C) fractions is not consistent across all series. For instance, the drop in thermal conductivity between HL2F and HL2M was 5.2%, whereas between HL3F and HL3M, it was only 0.3%. The most proportional reduction in λ was observed in series HL1, where the stepwise differences between consecutive particle sizes were 1.7% and 1.6%, respectively. The lowest thermal conductivity was achieved in series HL1C at 0.1000 W/m·K, while the highest was observed in HL3F at 0.1246 W/m·K.

An increase in water content in the mixture improved compressibility and resulted in a higher thermal conductivity after curing. This effect was most visible for the fine

aggregate, with a 5.7% increase. For medium and coarse aggregates, the changes were more modest—2.2% and 1.5%, respectively.

The most significant factor influencing thermal conductivity was the binder-to-shive ratio. For each particle size, increasing the binder content resulted in an increase in λ of over 20%. The highest increase was observed in the coarse aggregate series (22.8%) followed closely by the medium aggregate series (22.2%). For fine aggregate mixtures, thermal conductivity increased from 0.1033 W/m·K at a 2:1 binder-to-shive ratio to 0.1246 W/m·K at a 3:1 ratio—an increase of 20.5%.

4. Discussion

In study [55], which employed nearly identical binder composition, mixing ratios, and hemp shives from the same supplier as the present work, the composite density reached 497.9 kg/m³. In contrast, in the present study, the density of samples varied between 346 and 378 kg/m³, depending on the shive granulometry. Although both studies used a tamping method that simulates the shuttering technique applied on construction sites, the resulting densities differed significantly, indicating substantial variation in the degree of compaction during sample formation. Despite the more than 30% higher density achieved in [55], the reported thermal conductivity was only marginally higher—0.108 W/m·K—measured in the dry state.

In contrast, studies [10,31,52], which used binders of similar composition (hydrated lime, hydraulic binder, and pozzolanic additives) and nearly identical shive–binder–water ratios as those used in series HL1, reported composite densities in the range of 388–394 kg/m³. This can be attributed to slightly higher compaction compared to the 150% compaction level adopted in the present work. Notably, none of these studies explicitly stated the degree of compaction, generally limiting the description to a recommendation for careful tamping to minimize air voids and ensure material uniformity. At such densities, thermal conductivity values ranging from 0.098 to 0.106 W/m·K were reported [31,52], which aligns well with the values obtained for HL1 and HL2. This comparison suggests that the hemp shives used in the present study, despite being sourced from different suppliers, exhibit comparable thermal performance characteristics.

In series HL2, for which the water content was consistent with that used in studies [43,49], the reported densities ranged from 508 to 627 kg/m³, underscoring the role of sample compaction during formation. As with density, thermal conductivity was significantly higher than in HL2 of the present study, reaching values between 0.117 and 0.138 W/m·K. Studies [43,49] presented results for samples with identical shive, binder, and water proportions as in HL2. The higher densities (508–627 kg/m³) obtained by the authors indicate that the compaction method notably influenced both density and, consequently, thermal conductivity.

In all series analyzed, the increase in thermal conductivity due to differences in shive granulometry did not exceed 8%, with an average of 4.1%. A clear trend was observed: Finer aggregate fractions led to higher composite density, which in turn resulted in higher thermal conductivity. This trend is consistent with other studies, which show that shive particle size has only a modest impact on the thermal insulation properties of hemp–lime composites [4,6,9–11].

All particle size groups used in the present study (F, M, and C) had mean surface areas between 21 and 36 mm², with average lengths exceeding 9 mm (see Table 4). Most studies in the literature report much smaller particle sizes [4,6,9–11]. Even the finest fraction used in this study (F) was larger than the coarsest fraction reported in [7], which compared 13 types of hemp shives produced in Europe. This suggests that hemp shives used in construction in countries like France are significantly more finely processed. One contributing factor

may be the removal of fine particles and dust during the sieving process, which increased the mean particle size. Nevertheless, this effect was secondary, as the quantity of rejected particles was small.

Elongation and circularity values were similar across all analyzed shive groups, except for the coarsest fraction, which exhibited higher elongation. This can be attributed to longer particles typically having more elongated shapes. However, this is not universally applicable. Some studies have shown that even small particles may have low circularity—around 0.30–0.36 for particles shorter than 7 mm [35]. Similar findings were reported in [16], where approximately 60% of particles had a circularity below 0.27. These observations indicate the wide variability in the shape of hemp shives, which can range from fine and highly elongated to more compact particles with similar length-to-width ratios.

To evaluate the accuracy of image analysis results, a comparative assessment was conducted using one randomly selected scan and five randomly selected scans of medium-sized hemp shives (M), and the results were compared with those obtained from the full dataset of 32 scans for this granulometric group (Figure 14). The smallest analyzed sample—3 g—proved insufficient for accurately representing the particle size distribution. This sample contained approximately 500 particles, which does not meet the RILEM technical committee's recommendation of analyzing a 3–6 g sample containing at least 2000 particles [42]. This requirement was satisfied when five scans of hemp shives were selected.

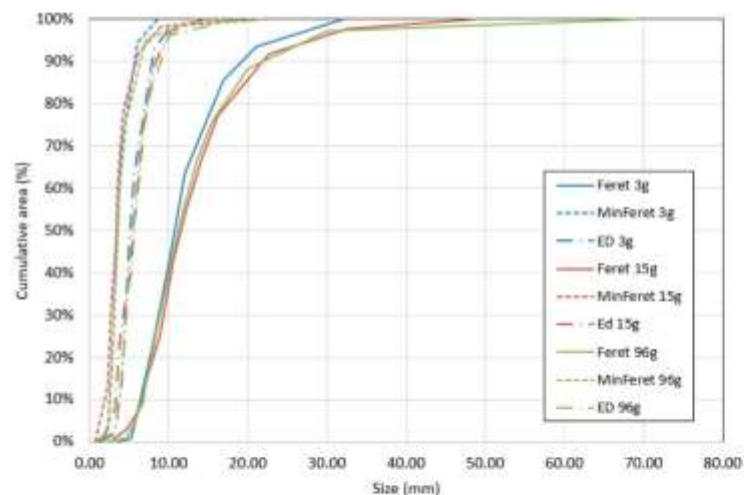


Figure 14. Particle size distribution curves for different sample sizes of medium hemp shives.

The total mass of the sample was 15 g, comprising 2416 particles. The analysis conducted on this number of particles yielded results comparable to those obtained from the complete dataset of 32 scans, covering a total of 96 g of material. This indicates that a 15 g sample is sufficient to provide a fast and accurate representation of the particle size distribution for a given hemp shive fraction. The graph (Figure 14) clearly shows differences in the representation of long particles between the 3 g scan and the 15 g and 96 g samples. In a 3 g sample comprising only 500 particles, large particles may be overrepresented due to their disproportionate contribution to the total mass. Given the average size of the hemp shive particles used in this study, granulometric characterization should be based on a minimum 15 g sample to ensure adequate representation of all particle sizes. Larger

image-analysis samples, such as 20 g, are not necessary if the average particle length does not exceed 10 mm.

In samples containing only 500 particles, overrepresentation of large particles may occur, as their higher mass results in a disproportionate share of the total 3 g sample weight. Based on the average particle size of the hemp shives analyzed in this study, a minimum sample mass of 15 g is recommended for reliable granulometric analysis. Consequently, the 20 g sample size used in other studies [4,40] appears excessive, particularly when the mean particle length is below 10 mm. To facilitate rapid image-based analysis, the authors recommend using 15 g samples.

5. Conclusions and Recommendations

In the conducted study, a clear relationship was observed between the particle size of hemp shives and the thermal conductivity of hemp–lime composites. As the average particle length increased, a systematic decrease in thermal conductivity (λ) was recorded—up to 7.6% between fine and coarse fractions. Simultaneously, the composite density decreased, confirming the influence of granulometry on the material’s microstructure. However, the binder-to-shive ratio had the greatest impact on λ , with an increase in this ratio resulting in over a 20% rise in thermal conductivity, regardless of the shive fraction.

Increasing the water content also led to higher λ values, particularly for fine aggregates (up to 5.7%), which can be attributed to easier compaction of the mixture. All samples in this study were compacted using a constant compaction level of 150% (relative to the loose bulk volume), ensuring consistency and enabling meaningful internal comparison of results.

In contrast, a review of the literature indicates that many published values—even for similar material compositions—can vary significantly due to differences in compaction methods. This suggests that inconsistencies in reported thermal properties across studies are likely influenced more by the sample preparation procedure than by minor variations in mix composition.

Image analysis showed that a 15 g sample (approx. 2400 particles) is sufficient for accurate granulometric characterization. Smaller samples (e.g., 3 g) may lead to statistical bias, particularly the overrepresentation of large particles. Therefore, for hemp shives with an average length below 10 mm, 15 g scans are recommended as the most efficient and reliable method for size distribution analysis.

Author Contributions: Conceptualization, W.P. and P.N.; Methodology, W.P. and P.N.; Validation, W.P., P.N., Z.W. and J.M.; Formal analysis, W.P. and P.N.; Investigation, W.P., P.N., Z.W. and J.M.; Data curation, W.P., P.N., Z.W. and J.M.; Writing—original draft, W.P. and P.N.; Writing—review & editing, W.P. and P.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are openly available in Zenodo at <https://zenodo.org/records/15664512> (accessed on 22 July 2025), reference number 15664512.

Acknowledgments: Generative AI (ChatGPT, version GPT-4o y OpenAI, San Francisco, CA, USA) was used for translating selected fragments of the manuscript from various languages (mainly Polish) into English. All translated content was thoroughly reviewed, edited, and approved by the authors. No scientific content, data interpretation, or citation references were generated using AI tools.

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

References

1. Kaur, G.; Kander, R. The Sustainability of Industrial Hemp: A Literature Review of Its Economic, Environmental, and Social Sustainability. *Sustainability* **2023**, *15*, 6457. [\[CrossRef\]](#)
2. Barbhuiya, S.; Bhusan Das, B. A Comprehensive Review on the Use of Hemp in Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *341*, 127857. [\[CrossRef\]](#)
3. Collet, F.; Pretot, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 612–619. [\[CrossRef\]](#)
4. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of Constituents on the Properties of the Bio-Aggregate Composite Hemp-Lime. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 9–17. [\[CrossRef\]](#)
5. Amziane, S.; Collet, F. *Bio-Aggregates Based Building Materials*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2017; ISBN 9789402410303.
6. Bourdot, A.; Moussa, T.; Gacoin, A.; Maalouf, C.; Vazquez, P.; Thomachot-Schneider, C.; Bliard, C.; Merabtine, A.; Lachi, M.; Douzane, O.; et al. Characterization of a Hemp-Based Agro-Material: Influence of Starch Ratio and Hemp Shive Size on Physical, Mechanical, and Hygrothermal Properties. *Energy Build.* **2017**, *153*, 151–164. [\[CrossRef\]](#)
7. Niyigena, C.; Amziane, S.; Chateauneuf, A. Multicriteria Analysis Demonstrating the Impact of Shive on the Properties of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *160*, 211–222. [\[CrossRef\]](#)
8. Hussain, A.; Calabria-Holley, J.; Lawrence, M.; Jiang, Y. Hygrothermal and Mechanical Characterisation of Novel Hemp Shive Based Thermal Insulation Composites. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *212*, 561–568. [\[CrossRef\]](#)
9. Brzyski, P.; Gladecki, M.; Rumińska, M.; Pietrak, K.; Kubiś, M.; Lapka, P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials* **2020**, *13*, 5383. [\[CrossRef\]](#)
10. Arnaud, L.; Gourlay, E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*, 50–56. [\[CrossRef\]](#)
11. Stevulova, N.; Kidalova, L.; Cigasova, J.; Junak, J.; Sicakova, A.; Terpakova, E. Lightweight Composites Containing Hemp Hurds. *Procedia Eng.* **2013**, *65*, 69–74. [\[CrossRef\]](#)
12. Pundiene, I.; Vitola, L.; Pranckeviciene, J.; Bajare, D. Hemp Shive-Based Bio-Composites Bounded by Potato Starch Binder: The Roles of Aggregate Particle Size and Aspect Ratio. *J. Ecol. Eng.* **2022**, *23*, 220–234. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Diquélou, Y.; Gourlay, E.; Arnaud, L.; Kurek, B. Impact of Hemp Shive on Cement Setting and Hardening: Influence of the Extracted Components from the Aggregates and Study of the Interfaces with the Inorganic Matrix. *Cem. Concr. Compos.* **2015**, *55*, 112–121. [\[CrossRef\]](#)
14. Laborel-Préneron, A.; Magniont, C.; Aubert, J. Characterization of Barley Straw, Hemp Shive and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste Biomass Valorization* **2018**, *9*, 1095–1112. [\[CrossRef\]](#)
15. Sofiane, A.; Laurent, A. *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*; John Wiley & Sons, Incorporated: Hoboken, NJ, USA, 2013.
16. Page, J.; Sonebi, M.; Amziane, S. Design and Multi-Physical Properties of a New Hybrid Hemp-Flax Composite Material. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 502–512. [\[CrossRef\]](#)
17. Sutton, A.; Black, D.; Pete, W. *Hemp Lime: An Introduction to Low-Impact Building Materials*; BRE Information PSaper IP 14/11; IHS BRE Press: Watford, UK, 2011; pp. 1–6.
18. Amziane, S.; Arnaud, L. Formulation and Implementation. In *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013; pp. 59–92.
19. Sinka, M.; Van Den Heede, P.; De Belie, N.; Bajare, D.; Sahmenko, G. Comparative Life Cycle Assessment of Magnesium Binders as an Alternative for Hemp Concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 288–299. [\[CrossRef\]](#)
20. Brzyski, P. *Hemp-Lime Composite as Wall Material Meeting the Requirements for Sustainable Development in Construction Industry*; Lublin University of Technology: Lublin, Poland, 2018.
21. Brzyski, P. *Kompozyt Wapienno-Konopny Jako Materiał Ścienne Spełniający Wymagania Zrównoważonego Rozwoju w Budownictwie*; Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej: Lublin, Poland, 2022.
22. Tronet, P.; Lecompte, T.; Picandet, V.; Baley, C. Study of Lime Hemp Composite Precasting by Compaction of Fresh Mix—An Instrumented Die to Measure Friction and Stress State. *Powder Technol.* **2014**, *258*, 285–296. [\[CrossRef\]](#)
23. Colinart, T.; Glouannec, P.; Chauvelon, P. Influence of the Setting Process and the Formulation on the Drying of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *30*, 372–380. [\[CrossRef\]](#)
24. Nguyen, T.T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; Amziane, S.; Baley, C. Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2010**, *14*, 545–560. [\[CrossRef\]](#)
25. Nguyen, T.T.; Picandet, V.; Amziane, S.; Baley, C.; Vincent, T.N.; Sofiane, P. Influence of Compactness and Hemp Hurd Characteristics on the Mechanical Properties of Lime and Hemp Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2010**, *13*, 1039–1050. [\[CrossRef\]](#)
26. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime. *Mater. Struct.* **2017**, *50*, 108. [\[CrossRef\]](#)

27. De Bruijn, P.B.; Jeppsson, K.H.; Sandin, K.; Nilsson, C. Mechanical Properties of Lime-Hemp Concrete Containing Shives and Fibres. *Biosyst. Eng.* **2009**, *103*, 474–479. [\[CrossRef\]](#)
28. Hussain, A.; Calabria-Holley, J.; Lawrence, M.; Jiang, Y. Resilient Hemp Shiv Aggregates with Engineered Hygroscopic Properties for the Building Industry. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *212*, 247–253. [\[CrossRef\]](#)
29. Construire en Chanvre. *Référentiel Label Qualité “Chanvre Bâtiment”*; Construire en Chanvre: Paris, France, 2017; pp. 1–16. Available online: https://www.construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/ReferentielQualiteChanvreBatimentCenC-ReglesPro_2017.pdf (accessed on 20 July 2025).
30. Rahim, M.; Douzane, O.; Le, A.D.T.; Promis, G.; Langlet, T. Characterization and Comparison of Hygric Properties of Rape Straw Concrete and Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *102*, 679–687. [\[CrossRef\]](#)
31. Dhakal, U.; Berardi, U.; Gorgolewski, M.; Richman, R. Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings. *J. Clean. Prod.* **2017**, *142*, 3655–3664. [\[CrossRef\]](#)
32. Horszczaruk, E.; Strzałkowski, J.; Glowacka, A.; Paszkiewicz, O.; Markowska-Szczupak, A. Investigation of Durability Properties for Lightweight Structural Concrete with Hemp Shives Instead of Aggregate. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 8447. [\[CrossRef\]](#)
33. Zerrouki, R.; Benazzouk, A.; Courty, M.; Ben Hamed, H. Potential Use of Metakaolin as a Partial Replacement of Preformulated Lime Binder to Improve Durability of Hemp Concrete under Cyclic Wetting/Drying Aging. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *333*, 127389. [\[CrossRef\]](#)
34. Abdellatef, Y.; Khan, M.A.; Khan, A.; Alam, M.I.; Kavgić, M. Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials. *Materials* **2020**, *13*, 5000. [\[CrossRef\]](#)
35. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. The Effect of a Polyacrylic Acid Viscosity Modifying Agent on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp and Rapeseed Straw Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *235*, 117536. [\[CrossRef\]](#)
36. Marceau, S.; Glé, P.; Guéguen-Minerbe, M.; Gourlay, E.; Moscardelli, S.; Nour, I.; Amziane, S. Influence of Accelerated Aging on the Properties of Hemp Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 524–530. [\[CrossRef\]](#)
37. Bennai, F.; Issaadi, N.; Abahri, K.; Belarbi, R.; Tahakourt, A. Experimental Characterization of Thermal and Hygric Properties of Hemp Concrete with Consideration of the Material Age Evolution. *Heat Mass Transf.* **2018**, *54*, 1189–1197. [\[CrossRef\]](#)
38. Niyigena, C.; Amziane, S.; Chateaneuf, A.; Arnaud, L.; Besette, L.; Collet, F.; Lanos, C.; Escadeillas, G.; Lawrence, M.; Magniont, C.; et al. Variability of the Mechanical Properties of Hemp Concrete. *Mater. Today Commun.* **2016**, *7*, 122–133. [\[CrossRef\]](#)
39. De Bruijn, P.; Johansson, P. Moisture Fixation and Thermal Properties of Lime-Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 1235–1242. [\[CrossRef\]](#)
40. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. A Method for the Assessment of the Internal Structure of Bio-Aggregate Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *116*, 45–51. [\[CrossRef\]](#)
41. Bourdot, A.; Magniont, C.; Lagouin, M.; Niyigena, C.; Evon, P.; Amziane, S. Impact of Bio-Aggregates Properties on the Chemical Interactions with Mineral Binder, Application to Vegetal Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* **2019**, *17*, 542–558. [\[CrossRef\]](#)
42. Amziane, S.; Collet, F.; Lawrence, M.; Magniont, C.; Picandet, V.; Sonebi, M. Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: Characterisation Testing of Hemp Shiv to Determine the Initial Water Content, Water Absorption, Dry Density, Particle Size Distribution and Thermal Conductivity. *Mater. Struct.* **2017**, *50*, 167. [\[CrossRef\]](#)
43. Walker, R.; Pavia, S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp-Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *64*, 270–276. [\[CrossRef\]](#)
44. Walker, R.; Pavia, S.; Mitchell, R. Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *61*, 340–348. [\[CrossRef\]](#)
45. Elfordy, S.; Lucas, F.; Tancret, F. Mechanical and Thermal Properties of Lime and Hemp Concrete (“Hempcrete”) Manufactured by a Projection Process. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *22*, 2116–2123. [\[CrossRef\]](#)
46. Kinnane, O.; Reilly, A.; Grimes, J.; Pavia, S.; Walker, R. Acoustic Absorption of Hemp-Lime Construction. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 674–682. [\[CrossRef\]](#)
47. Delannoy, G.; Marceau, S.; Glé, P.; Gourlay, E.; Guéguen-Minerbe, M.; Diafi, D.; Nour, I.; Amziane, S. Influence of Binder on the Multiscale Properties of Hemp Concretes. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2018**, *23*, 609–625. [\[CrossRef\]](#)
48. Abdellatef, Y.; Kavgić, M. Thermal, Microstructural and Numerical Analysis of Hempcrete-Microencapsulated Phase Change Material Composites. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *178*, 115520. [\[CrossRef\]](#)
49. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. Effect of Linseed Oil and Metakaolin on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp-Lime Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *145*, 537–548. [\[CrossRef\]](#)
50. Cassagnabère, F.; Diederich, P.; Mouret, M.; Escadeillas, G.; Lachemi, M. Impact of Metakaolin Characteristics on the Rheological Properties of Mortar in the Fresh State. *Cem. Concr. Compos.* **2013**, *37*, 95–107. [\[CrossRef\]](#)
51. De Bruijn, P.; Jeppsson, K.-H.; Sandin, K.; Nilsson, C. Mechanical Properties, Water Sorption and Frost Resistance of Lime-Hemp Cementitious Composites. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 1689–1699. [\[CrossRef\]](#)
52. Piatkiewicz, W.; Narloch, P.; Pietruszka, B. Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Arch. Civ. Eng.* **2020**, *66*, 485–503. [\[CrossRef\]](#)

53. Khan, B.A.; Wang, J.; Warner, P.; Wang, H. Antibacterial Properties of Hemp Hurd Powder against *Escherichia coli*. *J. Appl. Polym. Sci.* **2015**, *132*, 41588. [\[CrossRef\]](#)
54. Narloch, P.; Piatkiewicz, W.; Anysz, H.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Digital Image-Based Characterization of Particle Size and Shape Distribution in Industrial Hemp Shives. *Zenodo* **2025**. [\[CrossRef\]](#)
55. Brzyski, P.; Suchorab, Z. Capillary Uptake Monitoring in Lime-Hemp-Perlite Composite Using the Time Domain Reflectometry Sensing Technique for Moisture Detection in Building Composites. *Materials* **2020**, *13*, 1677. [\[CrossRef\]](#)
56. Rahim, M.; Douzane, O.; Tran Le, A.D.; Promis, G.; Langlet, T. Experimental Investigation of Hygrothermal Behavior of Two Bio-Based Building Envelopes. *Energy Build.* **2017**, *139*, 608–615. [\[CrossRef\]](#)
57. Rahim, M.; Douzane, O.; Le, A.D.T.; Promis, G.; Laidoudi, B.; Crigny, A.; Dupre, B.; Langlet, T. Characterization of Flax Lime and Hemp Lime Concretes: Hygric Properties and Moisture Buffer Capacity. *Energy Build.* **2015**, *88*, 91–99. [\[CrossRef\]](#)
58. Rahim, M.; Douzane, O.; Tran Le, A.D.; Langlet, T. Effect of Moisture and Temperature on Thermal Properties of Three Bio-Based Materials. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*, 119–127. [\[CrossRef\]](#)
59. Hirst, E. *Characterisation of Hemp-Lime as a Composite Building Material*; University of Bath: Bath, UK, 2013.

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.

10.6. Publikacja [5]



materials



Article

Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Walls, Roof and Floor Applications

Michał Gołębiewski ¹*, Barbara Pietruszka ², Wojciech Piątkiewicz ³, Michał Kubiś ⁴, Olena Oleksienko ⁵

¹ Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology, Koszykowa 55 st., 00-659 Warsaw, Poland; michal.golebiewski@pw.edu.pl

² Department of Thermal Physics, Acoustics and Environment, Building Research Institute, Ksawerów 21 st., 00-656 Warsaw, Poland; b.pietruszka@itb.pl

³ Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Armii Ludowej 16 av., 00-637 Warsaw, Poland; wojciech.piatkiewicz.dokt@pw.edu.pl

⁴ Institute of Heat Engineering, Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology, Nowowiejska 21/25 st., 00-665 Warsaw, Poland; michal.kubis@pw.edu.pl

⁵ UKRCERTIFICATION LLC, Volodymyr Stelmakh 62D St., 33018 Rivne, Ukraine; mb-elena@ukr.net

* Correspondence: michal.golebiewski@pw.edu.pl

Abstract

Hemp-lime composites, characterized by pro-environmental features, offer an interesting alternative to traditional building materials. The properties of these materials depend on many factors, which cause uncertainty as to the results obtained when designing building envelopes. A key factor - volumetric density - depends, among others, on the manufacturing technique adopted and can be controlled. Materials for use in partitions constituting the building envelope were produced at various densities through varying degrees of compression and subjected to tests to determine their compressive strength, thermal conductivity and water vapor permeability. The values obtained were in the wide ranges of 0.05–1.50 MPa; 0.0671–0.1339 W/(m·K), 3.61–10.10, respectively. The specific heat was determined to be 1178–1260 at 60 °C and 773–863 J/(kg·K) at 30 °C. The test results clearly indicate the dependence of the tested properties on the mixture composition, volumetric density and composite structure. The study demonstrated the suitability of the material for construction applications and the significant variability of its properties. The lineup of the relationships between the properties of different composites and their degree of compaction can facilitate the design process and help to model the mechanical and thermal behavior of partitions and entire buildings.

Keywords: hemp-lime composite; compressive strength; thermal conductivity; water vapor permeability; specific heat; sustainable materials; sustainable construction

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date

Citation: To be added by editorial staff during production.

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

1.1. Context and purpose

Protection of natural resources that determine the conditions of life on Earth requires innovation in the field of architecture and construction due to the significant impact of this sector on the state of the natural environment [1] and the expected intensive environmental transformation processes caused by progressive urbanization [2]. In conventional

buildings, the greatest energy consumption (therefore usually greatest environmental impact) occurs during the use phase [3], so energy efficiency is of key importance. Dominating thermal insulation materials (EPS, mineral wool) are generally characterized by relatively high embodied energy and carbon footprint [4]. Growing demand for materials as well as the need to reduce the consumption of non-renewable resources and harmful technological processes led to search for alternative materials, mainly those of organic and recycled origin [5]. Nevertheless, some technical aspects limit their wider use in construction, including issues of fire resistance and durability, still high cost, or the problem of repeatability of products' properties.

This study aims to broaden and update knowledge on the properties of one of the fastest developing (nevertheless still niche) alternative material solutions, hemp-lime composite, commonly referred to as hempcrete. The hemp-lime composite consists of hemp shives and a mineral binder, which requires water for setting. Hemp shives are produced through the decortication and fragmentation of hemp stalks into small pieces. They exhibit a porosity of approximately 76% [6], resulting in one of the lowest thermal conductivity coefficients among widely studied plant-based aggregates, measuring 0.051 W/(m·K) [7]. Hemp shives are mixed with a mineral grout, which forms the matrix of the composite, primarily providing cohesion, strength, and protection of the plant-based aggregate against biodegradation [8,9]. The most used binder consists predominantly of hydrated lime, along with hydraulic binders (mainly cement) and pozzolanic binders [10–16]. The subject of research includes new binder compositions that also utilize natural hydraulic lime [11], prompt natural cement [12], metakaolin [13] and magnesium phosphate cement [17]. Due to its good thermal insulation [18] and acoustic properties [19], significant transpirability and hygroscopicity [20] and low carbon footprint [21], hempcrete has gained popularity as an alternative building material [22]. The most widespread application method involves placing the material in formwork and compaction through tamping, but it can also be sprayed or prefabricated in the form of blocks or panels [23–25]. The common application of the hemp-lime composite is as a filling for wooden frame structures in the external walls of buildings. However, it demonstrates a much broader range of applications, including the thermal retrofitting of existing external partitions, the filling of internal partition walls as well as thermal insulation of floors and ceilings [26].

The relationships between volumetric density and compressive strength, thermal conductivity and water vapor permeability are key to the architectonic design process as density of hempcrete may vary to great extent due to proportions of the ingredients or compaction level. Such knowledge, in absence of standards regarding building with hempcrete, has practical aspect. It allows designers to check whether specific legal requirements for building partitions or entire buildings are met (i.e. thermal protection, energy efficiency, or condensation risk) and facilitates design optimization.

1.2. Factors influencing compressive strength

Compressive strength is one of the hemp-lime composites' primary characteristics under investigation [14–16]. It can vary widely, ranging from 0.06 MPa [17] to as high as 4.74 MPa [27], however, it is most reported to be in the range of 0.1–1.2 MPa [17,23,28–31]. The primary factor influencing compressive strength is the material's density, which, in turn, depends on, among others, the proportion of constituents [11,29,30,32]. In [33] authors demonstrated that doubling the binder-to-hemp mass ratio resulted in an approximately 50% increase in density and more than a twofold increase in compressive strength. Similar conclusions were reached in [17], where increasing the binder-to-hemp mass ratio from 1:1 to 2:1 led to a twofold increase in compressive strength. Another significant variable affecting density, and therefore compressive strength, is the degree of material compaction [24]. Due to the relatively low density of hempcrete and the irregular, angular

shape of its aggregate, the material does not self-compact under its own weight and requires manual or mechanical densification [34]. A study [35] investigated the impact of compression, among other factors, on density and compressive strength of hempcrete. A 19% increase in density led to a 67% increase in compressive strength. Similar observations were presented in [36,37]. Compressive strength can also be modified by the appropriate selection of the binder - studies have shown that using prompt natural cement with the addition of citric acid leads to an increase in strength by up to 40% (in comparison to commercial preformulated binder) while maintaining the same density [29]. In [38] it was found that characteristics of aggregate also influence compressive strength of the composite, namely the predominance of short particles promotes greater strength.

1.3. Factors influencing thermal conductivity

The values of thermal conductivity coefficient determined in numerous studies range from 0.06 to 0.16 W/(m·K) [17,27,28]. Literature analysis indicates that the thermal conductivity of hempcrete is predominantly influenced by its density [11,26,28–30]. As mentioned, the density of the material is primarily determined by the mass ratio of the components and the degree of compaction during the forming process [27,31,32]. A reduction in the binder-to-hemp ratio from 2.5:1 to 1.5:1 was observed to lower the thermal conductivity coefficient by 25% [31]. Similar results were obtained in [33], where a change from 2.6:1 to 1.8:1 resulted in a 30% reduction in the λ coefficient. In studies involving manual material placement, an increase in compaction level (reduction in volume compared to the uncompacted state) from 30% to 60% led to an approx. 18% increase in density and an 8% increase in thermal conductivity [34]. The use of mechanical compaction with a device generating stresses in the range of 0.6–1.0 MPa enabled significant compression, resulting in a threefold reduction in volume and a 35% increase in the thermal conductivity coefficient [27]. Studies on the impact of mineral additives into the binder composition on thermal conductivity of hempcrete yield inconclusive results. Some publications suggest a marginal influence of mineral additives [28,30]. However, certain studies indicate that the use of binders based on starch or magnesium compounds can significantly improve the materials' thermal insulation properties [17,35,36]. Aggregate size has an ambiguous effect on thermal conductivity of the composite. Study [39] did not show significant effect of hemp shiv particles size on thermal conductivity, while in [38] use of smaller aggregate resulted in higher conductivity due to better material compaction. Similarly to other porous thermal insulation materials, rise of humidity and temperature leads to an increase in the thermal conductivity of hempcrete [10,32,37,40]. Discussed composite is characterized by an anisotropic structure, which causes the directionality of its properties. λ coefficient achieves lower values when the direction of heat flow is parallel to the direction of material compaction - the difference can reach up to 16% [34].

1.4. Factors influencing water vapor permeability

The diffusion resistance coefficient of hempcrete in RH 50% falls within the 3.6–7.7 range, but values around 5 are the most common in literature [28,29,41]. In [29] it was shown that water vapor permeability of hempcrete depends on both: the characteristics of components and their proportions, however study [28] revealed that micropores of binder have a small impact, while the dominating factor is characteristics of macropores between hemp shiv particles, which result mainly from proportions of ingredients and the degree of mix compaction. In study [41], it was found that higher relative humidity induces higher vapor permeability rates of the composite. A similar conclusion was drawn in [38], where diffusion resistance coefficient of hempcrete was determined in two ranges, namely 0–50% and 50–94% and for thick and fine hemp shiv particles. Results were 12.18–

12.37 (lower RH) and 5.57–4.94 (higher RH) respectively, highlighting higher permeability in higher RH ranges and minor effect of hemp shiv particles size on the tested feature.

1.5. Factors influencing specific heat

The specific heat of hemp shives (at 23 °C) was determined to be approx. 1250 J/(kg·K) [37]. The literature reports significantly diverse values of specific heat of hemp-lime composites, ranging from 300 to 1601 J/(kg·K) [37,38,42]. The factors causing such discrepancies in results seem to be not only different compositions of the composites, but also the research methodology. According to [37], indirect methods based on the results of thermal conductivity and density tests may underestimate the values obtained compared to direct measurements. Moisture content of the material may lead to atypical results [42]. In study [37], a hemp-lime composite tested by two direct methods showed specific heat of 905 and 911 J/(kg·K) (at 20 °C), whereas the indirect method yielded a result lower by 18%. Measurements using indirect methods also demonstrate sensitivity to the material's anisotropy – for a hemp-lime composite with a density of approx. 400 kg/m³, specific heat values of 620 and 840 J/(kg·K) were obtained, respectively, for heat flow parallel and perpendicular to the dominant orientation of hemp shiv particles [40]. On the other hand, some tests carried out using the indirect method showed relatively high values of specific heat – in [43] for wet (RH 50%) and dry composites of 1:1 binder-to-hemp mass ratio the results ranged from 1398 to 1557 J/(kg·K) and from 1250 to 1421 J/(kg·K), respectively. The type of binder and the shiv particles size seem to be of lesser importance. According to [28], use of hydraulic binders resulted in only slightly higher specific heat compared to binders based on hydrated lime with pozzolanic additives. Comparison of specific heat measured by the direct method for two different gradations of hemp shives, showed values of 1575 and 1601 J/(kg·K) for fine and coarse aggregates, respectively, indicating a marginal influence of hemp shiv particles size on the tested feature [38]. To increase the specific heat of the composite and thus the heat capacity of building partitions, the effect of PCM addition was also investigated [44].

2. Materials and Methods

2.1. Mixtures and samples preparation

Hemp-lime composite samples were produced with use of hemp shiv and preformulated binder (formulated lime of class FL A 3.5 compliant with EN 459-1:2015 [45]) from European producers, which technical sheets are available at [46] and [47], accordingly. Only general binder composition is given – air lime (98% Ca(OH)₂): 75%; hydraulic binder: 25%; minor additives [48]. Water at temperature of 20 °C ± 2 °C came from the Warsaw water supply network.

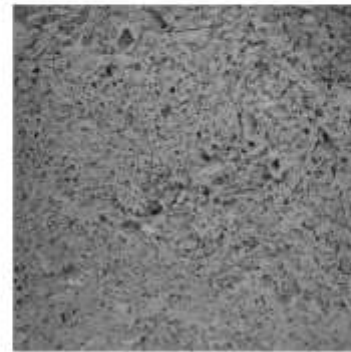
The method of sample preparation was adopted to reproduce the procedure and conditions prevailing on the construction site of hempcrete buildings erected by tamping, which is a dominant technique in small, individual investments [26]. Three series of samples were produced from mixtures varying in proportions of constituents, corresponding to three main building applications: R – horizontal insulation of roof (above the structural ceiling/between the rafters) or raised floor (between the beams), W – walls infill (for timber / steel frame), and F – floor on ground (material which transfers loads into the ground). The proportions of components were adopted from the instructions of a European manufacturer (Table 1) [48]. The ingredients were mixed in a mixer with a vertical axis of rotation. Firstly, water and binder were mixed for 3 min., then hemp shiv was added and mixed for another 5 min. During mixing of grout F, intense foaming occurred (Fig. 1a), which was not observed on such a scale during the preparation of other mixtures. As a result, a specific porous structure of F samples was obtained (Fig. 1b).

Table 1. Characterization of mixes.

Mix symbol	Hemp : Binder : Water ratio by mass	The lowest initial volumetric density (kg/m ³)	The highest initial volumetric density (kg/m ³)
R (roof)	1 : 1 : 2.15	630	870
W (wall)	1 : 1.8 : 3	400	640
F (floor)	1 : 2.25 : 4	690	930



(a)



(b)

Figure 1. (a) Foaming of the F mixture grout during mixing; (b) Structure of F690 sample with visible characteristic pores in the matrix resulting from the release of air from the foamed mixture.

Mixtures of a certain mass were placed in molds of a certain volume and per chance compressed by tamping. In the case of series R and F (material applied in the form of a horizontal layer), the samples with the lowest density were obtained by completely filling the volume of the molds, without compaction. In the case of the W series (material applied in the form of a vertical layer) the procedure was similar, however, slight compression was applied to eliminate the resulting voids - the lowest adopted volumetric density was the first one that guaranteed that the sample would not spontaneously fall apart during demolding. Then, subsequent samples of all series were made by placing more mixture in the molds (the volumetric density was increased by 0.3 kg/m³), which required increasingly greater compaction. Ultimately, the highest density samples were obtained, i.e. those that could not be further compacted manually. Due to the foaming of mixture F, subsequent samples of this series were produced at approx. 15-minute intervals, which allowed for the release of more air and obtaining higher volume densities (otherwise, compressing the mixture to the intended volume would not have been possible).

For the W series, 10 samples were produced, and for the R and F series, 9 samples were produced for each tested feature (except for specific heat). The samples were demolded after 1-2 days and seasoned for 90 days: the first 7 days at 23 °C; RH 80% (except for the samples for compressive strength tests, which were kept in such conditions for 28 days), and the remaining period at 23 °C; RH 50%. For the specific heat test, for each series, 5 cubes of 0.05 x 0.05 x 0.05 m were cut from the 0.3 x 0.08 m blocks of the lowest density (from different, distant places), conditioned as described above. Prior to test, these samples were pulverized and dried (described in chapter 2.5).

2.2. Compressive strength

The compressive strength of the material was determined through a destructive compression test carried out on 28 cubic samples with dimensions of $0.15 \times 0.15 \times 0.15$ m, 90 days after their production, using an Instron 3382 testing machine with a maximum load capacity of 100 kN (Fig. 2). The samples were uniformly compressed at a jaw displacement rate of 5 mm/min, in the direction corresponding to the loads to which the material is subjected in the intended structural application. To ensure uniform force distribution, an 8 mm thick steel plate was placed on each sample and in contact with the moving press head. Parameters such as force, displacement, and stress were recorded using the Instron Bluehill software, which generated real-time stress-strain curves. Prior to testing, a preload of approximately 0.02 kN was applied to minimize the impact of surface irregularities, after which the displacement measurement was reset to zero. The mass of the steel plate was excluded from calculations, as it accounted for less than 2% of the lowest recorded compressive strength value.



Figure 2. Instron 3382 machine and samples of all series prepared for compressive strength tests.

There is no standard or generally accepted method for determining the compressive strength of hemp-lime composites. In this study, different methods were used depending on the mechanical behavior of the material being tested. Only the F series samples showed a characteristic point of maximum stress (followed by its reduction), which allowed it to be used to determine ultimate compressive strength. Since such a point does not occur in the stress-strain curves of the W series samples, the strength of this series was determined according to the method proposed in [49], i.e. at the point where the instantaneous stiffness falls to 25% of the recorded maximum value based on a 20-point moving average. The distinct deformation characteristics of R series samples required yet another analytical approach. For this series, the compressive strength was determined at the point where the samples reached 5% deformation, as it was used to establish the serviceability limit state in [50]. Additionally, in order to compare the results of samples from all series, the strength based on the stress recorded at 5% strain was presented (in relation to volumetric density) also for series F and W.

2.3. Thermal conductivity

The thermal conductivity tests were carried out on 28 rectangular samples with dimensions of $0.3 \times 0.3 \times 0.08$ m, 90 days after their production, using FOX 314 plate apparatus, with heat flux density sensors (Fig. 3), in accordance with the EN 12664:2002 [51]. Mass of the samples was stabilized prior to testing. The test room conditions were stable: temp. 22.2–22.7 °C. The measurements were made at an average sample temperature of 10 °C, a temperature difference across the sample thickness of 20 K, heat movement from the bottom to the top (perpendicular to the direction of sample compaction, i.e. in the direction of heat flow in the building partition). The change in the mass of the samples during the test did not exceed 0.2%.



Figure 3. Fox 314 apparatus and samples of all series prepared for thermal conductivity tests.

2.4. Water vapor permeability

The water vapor permeability tests were carried out on 28 cylindrical samples with a diameter of 0.128 m and a height of 0.05 m (R and F series) or 0.08 m (W series), 90 days after their production, using the “Cup” method, in accordance with the EN ISO 12572:2016 [52] with minor modification - instead of steel vessels, samples were placed onto glass vessels (Fig. 4). The W series samples were cut from the 0.3 x 0.3 x 0.08 m blocks to ensure correct direction of vapor flow i.e. perpendicular to the direction of sample compaction. Mass of the samples was stabilized prior to testing. Samples, placed onto vessels filled with calcium chloride, were sealed with liquid wax, leaving surfaces of 0.1 m diameter at the top. The vessels were weighed and placed in a chamber at temp. 23° C ±1 °C, RH 50% ± 5%. Vessels were weighed at intervals of 1-3 days until the calculated change in mass per hour, for each individual vessel in each of the previous 5 measurements was within 5% of the mean change in mass of the vessel from these measurements. In case of W series samples due to problems with mass stabilization of 3 samples, an average from 4 measurements was used in calculations instead of 5 advised by the standard - it is believed that the impact of this change was insignificant for the results. After 15, 17 and 16 days, the tests of the R, W and F series were completed. The coefficient of water vapor permeability was calculated according to the equations of EN ISO 12572:2016 standard [52]. The coefficient of diffusion resistance was determined as the ratio of the vapor permeability of air ($\delta_a = 720 \cdot 10^{-6} \text{ g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$) to the vapor permeability of the material.



Figure 4. Sealed samples in climatic chamber and samples of all series prepared for water vapor permeability tests.

2.5. Specific heat

Samples for testing with a differential scanning calorimeter (DSC) required several stages of preparation, consisting of grinding, drying, collecting, and placing in a crucible. Pre-prepared 0.05 x 0.05 x 0.05 m cubes were split into many smaller pieces. Then, about 3/4 of each original sample was crushed using a high-speed impact mill (IKA A11). The samples were ground in two stages. The total grinding time was set at 45 seconds, with the first stage lasting 25 sec. and the second stage lasting 15 sec. Between the first and second stages, the grinding state of the sample was checked. There were no noticeable differences amongst all samples. Each sample obtained in this way was spread evenly on an aluminum tray with a diameter of approx. 20 cm, forming a thin layer. An example

sample after grinding is shown in Fig. 5. The trays were placed in a dryer at 70°C for 72 hours. After this time a portion of powder of each sample was taken and poured into a DSC crucible of approx. 5 mm diameter (Fig. 5). Rare, unusually long particles were removed to avoid disturbing the sample structure during pressing. The pressed samples occupied about half the volume of the DSC crucible, weighed approx. 16–18 mg and were considered representative. For each type of mixture, 5 samples were prepared. Additionally, tests were carried out on hemp shives alone, which were pre-crushed and dried under similar conditions as the composite samples. Three hemp shives samples were prepared by loosely placing several particles in a Pt-Rh crucible, resulting in a sample mass of approx. 6.5 mg. To ensure that the samples remained dry, the temperature program was set to consist of repeated heating and cooling cycles.

The specific heat of hemp-lime composites was determined using a DSC 404 F1 Pegasus (Netzsch) apparatus (Fig. 5). For this purpose, Pt-Rh crucibles and sapphire as a reference material were used, and an inert gas atmosphere was provided using argon with a flow rate of 20 ml/min. The test was carried out in the temperature range from 30°C to 70°C in three heating-cooling cycles, where the heating rate was 2 K/min and the cooling rate was 2 K/min. An isotherm of $t = 10$ min was applied between the cooling and heating stages, which allowed a steady state to be reached before the next heating cycle. The data for determining the specific heat was obtained from the last heating cycle. The samples were weighed with an accuracy of 0.0001 mg (Stratarius Supermicro). At the end of the measurement series, a reference sample in the form of amorphous sapphire was tested, which was treated as a sample with unknown specific heat to verify the measurement accuracy. In the tested range, the largest difference recorded was less than 1.5% in the upper temperature range. In the lower temperature range, this difference was less than 1%.



Figure 5. Hemp shiv sample in DSC crucible and example crushed sample of hemp-lime composite prepared for specific heat tests.

3. Results and discussion

3.1. Compressive strength

Despite using the same test procedure for all mixtures, their stress-strain curves show clear differences. The R series specimens showed significant deformations at low stress levels (Fig. 6), while the W series specimens showed a steeper stress-strain curve with noticeable quasi-linear regions (Fig. 7). In both series, the stress increased continuously until the test was terminated at 10% strain (due to visible material damage). The F series curves showed significantly increased stress levels in the initial loading period and reached a characteristic maximum, after which the stress was reduced with a further increase in strain (Fig. 8). The higher stiffness of the F series samples indicates a greater contribution of the binder to the transfer of initial loads.

The compressive strength determined using different methods for series R, W and F is shown in Figures 6, 7 and 8, respectively. Detailed values for all samples are presented in Appendix A.1. For all tested series, a close-to-linear relationship was observed,

indicating an increase in strength with increasing volumetric density and, consequently, a more compact composite structure.

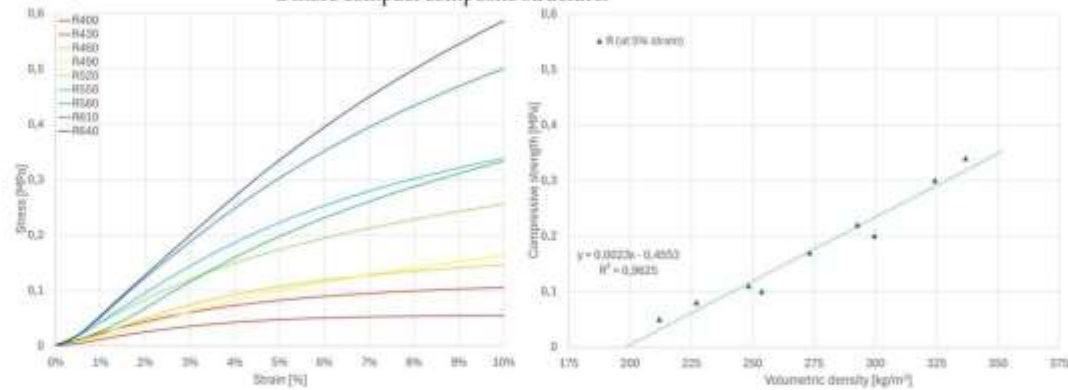


Figure 6. Results of compressive strength tests for R series.

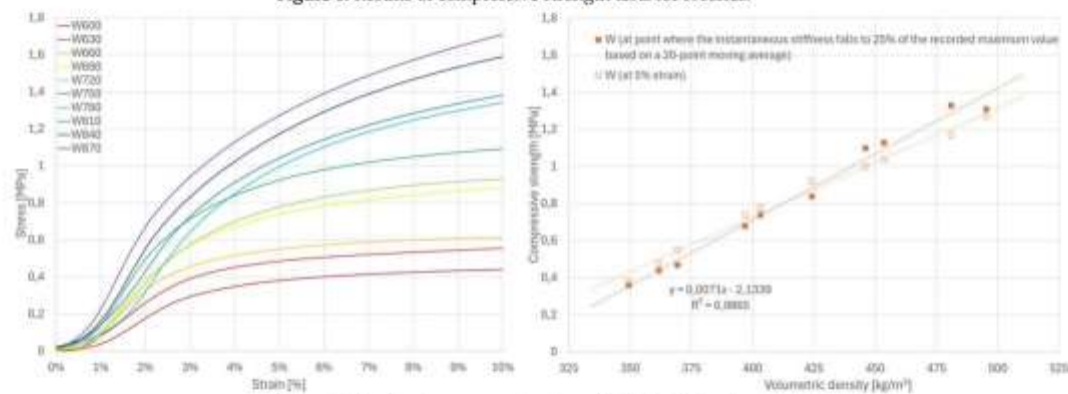


Figure 7. Results of compressive strength tests for W series.

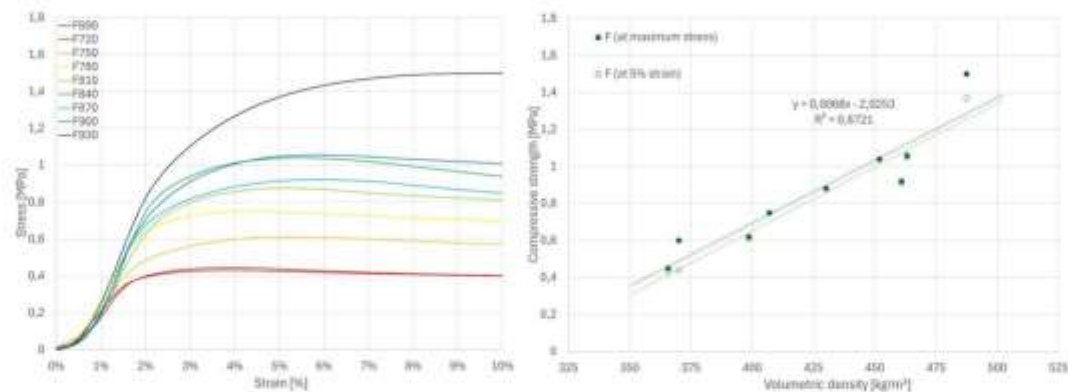


Figure 8. Results of compressive strength tests for F series.

The results are generally consistent with the values presented in the literature for various types of hemp-lime composites [17,23,28–31]. As expected, the R series samples, characterized by the lowest density, showed the lowest strength which is related to the

lowest binder content in the mixture and, consequently, small contact surfaces between aggregate particles. The W series samples showed slightly higher strength than the F series samples, despite the lower binder-to-hemp mass ratio in the mixture. Analysis of the F series stress-strain curves indicates that the ultimate strength, determined using the same method as for W (rate at which the 25% maximum instantaneous stiffness criterion is achieved [49]) would occur at 2-3% strain, while in the W series this point shifts toward higher strains with increasing sample density, reaching values in the range of 4-7%. In the case of the F series, this criterion is met more rapidly, and the stress value at this point remains lower than the maximum stress recorded during testing. For this reason, the method adopted for the W series does not seem to be the most appropriate for the F series. However, using the criteria of highest recorded stress or stress at 5% strain (Fig. 8), the results of the F series specimens are still lower than those of the W series. It should therefore be assumed that composite W, despite the lower binder-to-hemp ratio, is characterized by higher strength than composite F due to differences in structure or the method of determining the strength for the W series samples overestimates their results.

To directly compare the results for all series, on Figure 9 the strength calculated based on the stress values at 5% strain in relation to the volumetric density of the samples is shown. It is worth noting that this method gives values approximate to those obtained using methods selected specifically for individual series (W and F). According to the obtained relationships, an increase in composite density leads to a more significant increase in strength in composites with a higher binder-to-hemp mass ratio.

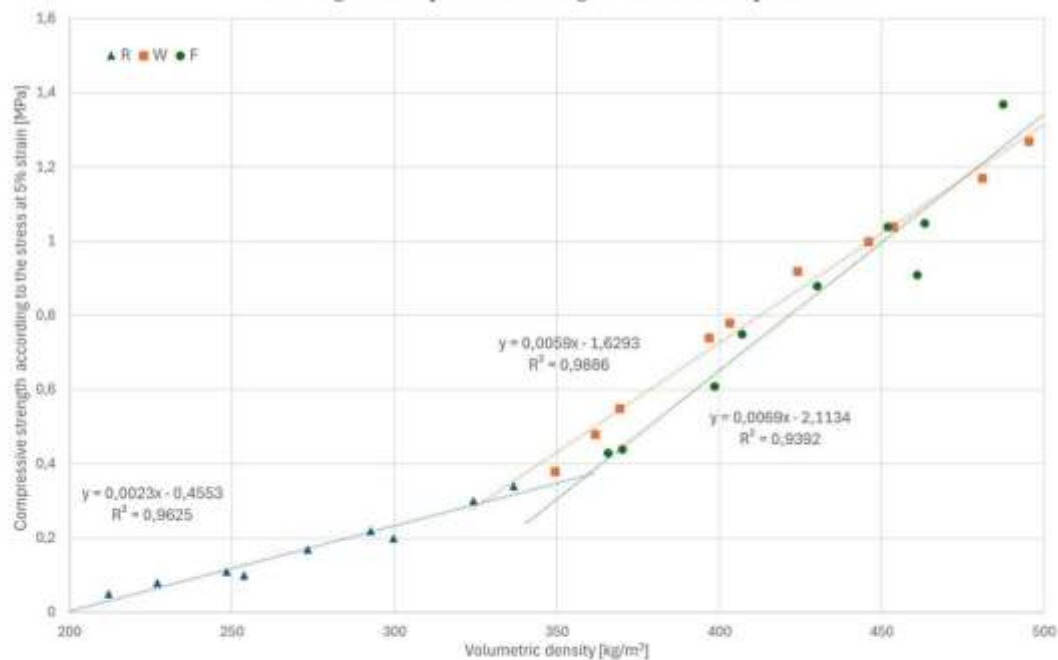


Figure 9. Stress values at 5% displacement in relation to density for all samples.

Example samples of each series before and after testing, showing the nature of the failure, are presented in Figure 10.

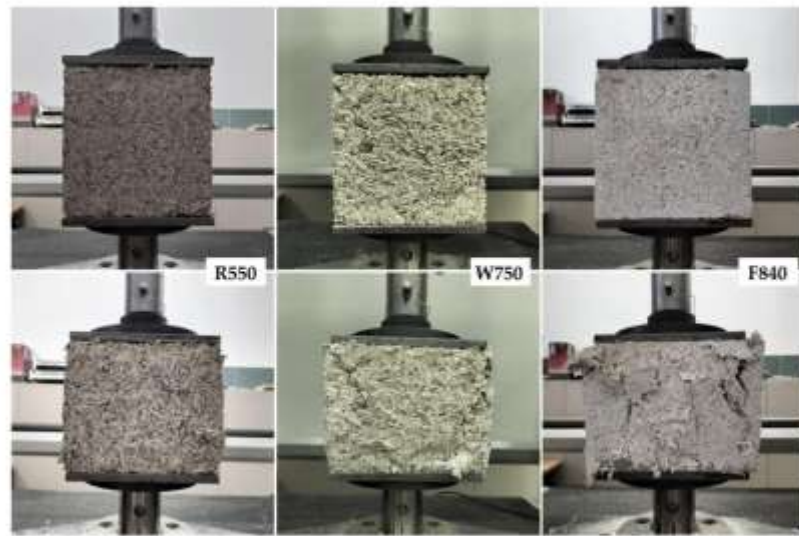


Figure 10. Example average density samples of each series before and after destructive testing.

3.2. Thermal conductivity

The results of the thermal conductivity tests are presented in Figure 11; detailed values are given in Appendix A.2. In all tested series, a clear relationship was observed, indicating an increase in conductivity with increasing volumetric density - similarly to [11,26,28-30]). The increase in conductivity becomes steeper with increasing binder-to-hemp ratio.

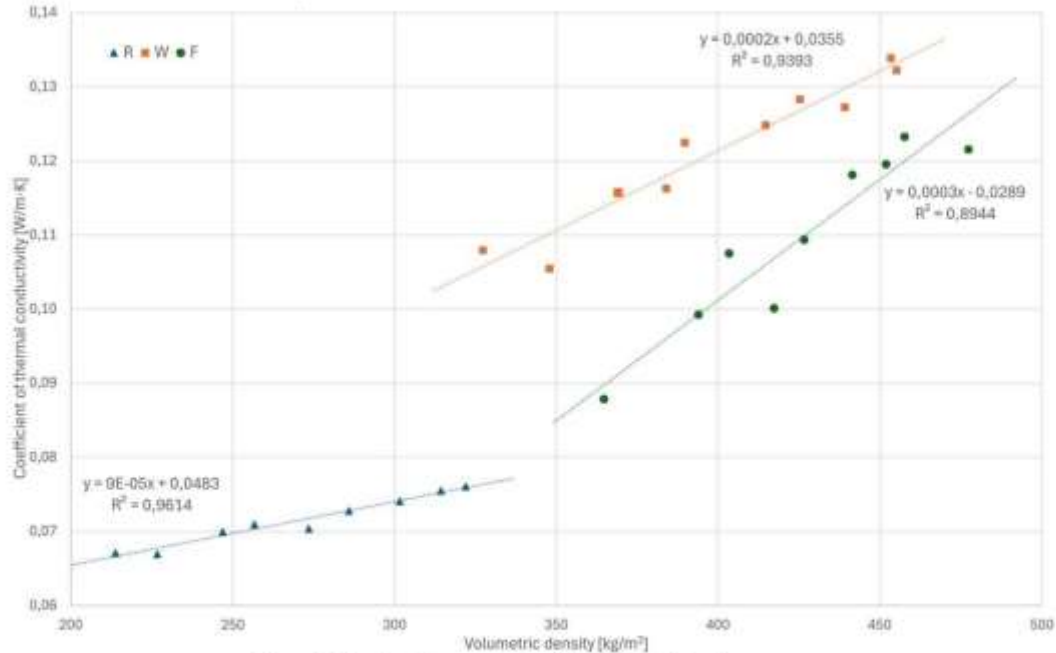


Figure 11. Results of thermal conductivity tests of all series.

The R series samples showed the lowest thermal conductivity (0.0671–0.0761 W/(m·K)) due to highest hemp shiv share and, consequently, the lowest density. Increasing the binder share in the W and F series (compared to the R series) resulted in increased thermal conductivity (similarly to [31,33]), but unexpectedly, the W series samples showed higher thermal conductivity than the F series samples at similar densities: 0.1080–0.1339 and 0.0879–0.1233 W/(m·K), respectively, despite the lower binder-to-hemp ratio in the W mix. This may be due to different pore characteristics of both composites (foaming of F mixture, described in chapter 2.1). Visual inspection (Fig. 12) shows that the macropores of the W samples (especially the low-density ones) are larger and interconnected, forming continuous voids, which can potentially enhance heat transfer by convection, in contrast to the F samples, in which the macropores are more evenly distributed, smaller, and do not form continuous voids. The trends indicate that the difference between W and F values decreases with increasing compactness. However, the observed phenomenon requires further investigation to clarify the cause. The obtained thermal conductivity values of the composites are generally in line with literature data [17,27,28].

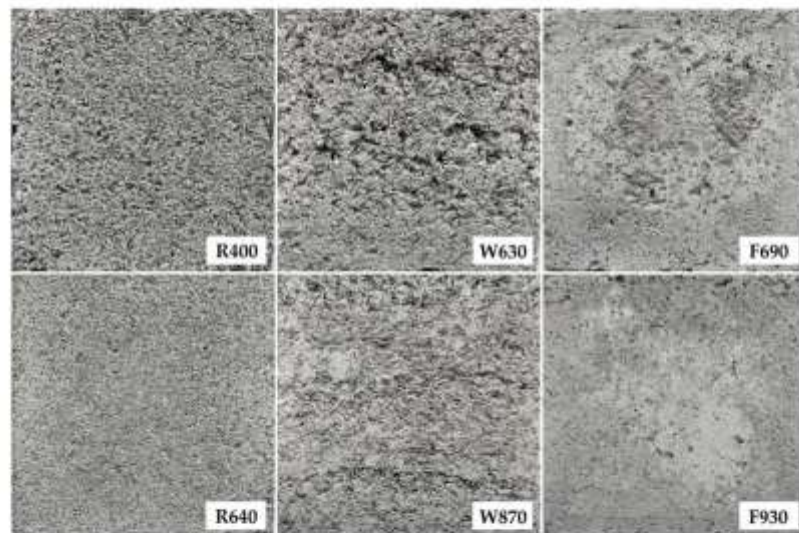


Figure 12. Surface photos of the lowest and highest density samples for all series showing differences in the composite structures.

3.3. Water vapor permeability

The results of the water vapor permeability tests are presented in Figure 11; detailed values for all samples are presented in Appendix A.3. For all tested series, an increase in the diffusion resistance coefficient was observed with increasing volumetric density, and the relationship was closest to exponential in the tested density ranges. The R series samples are characterized by the lowest diffusion resistance coefficient (3.61–5.37) and F series samples by the highest (5.87–10.10). The results generally fall within the range of values previously reported in the literature [28,29,38,41]. The combined results for the R and F series form a well-correlated exponential trend ($R^2 = 0.9896$) despite significantly different component ratios, which may suggest the volumetric density as a main parameter for estimation of the diffusion resistance coefficient. On the other hand, the results of the W

series (4.10–7.37) are clearly lower than those for F and do not fall within the “R+F trend”, which may be the result of a more heterogeneous structure of this type of composite. Due to compaction method and the consistency of the mix itself, the voids of W composites have a more random shape and size (forming continuous channels, allowing for easier vapor flow), while the macropores of F composite are less differentiated and more evenly distributed (Fig. 13). The observed characteristics show the importance of macropores between shiv particles for the water vapor transport process (as noticed in [28]).

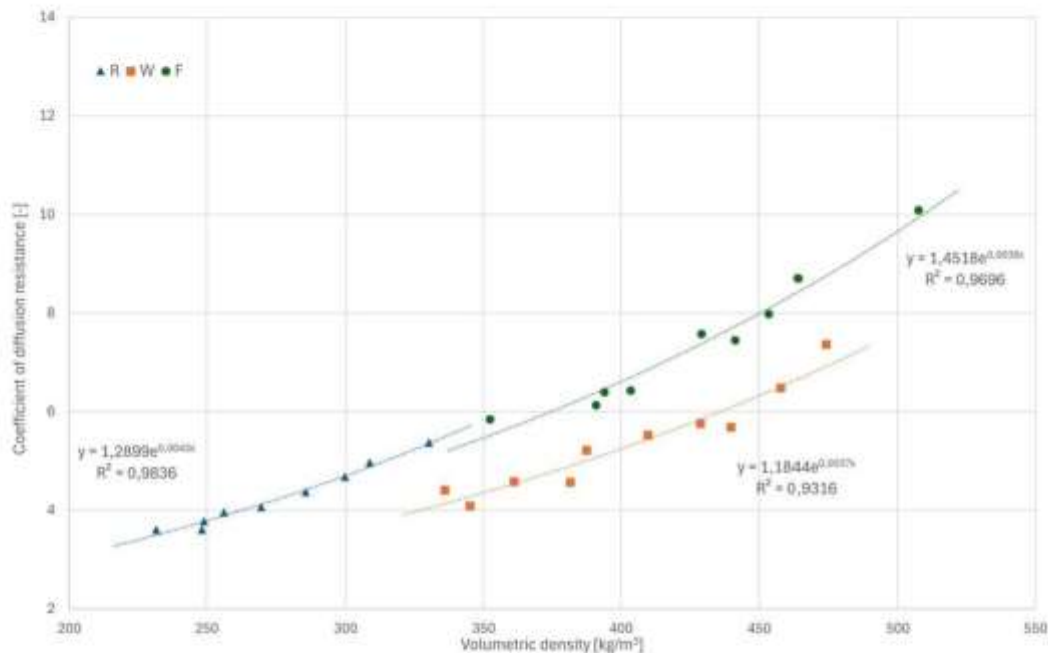


Figure 13. Results of water vapor permeability tests of all series.

3.4. Specific heat

The results of the specific heat tests are presented in Figures 14–16; detailed values for all samples are presented in Appendix A.4. Based on the analysis of three heating cycles, no significant differences were observed between DSC signals from the second and third heating cycles. Throughout the entire measurement range, these differences were within the measurement error range of $\pm 1\%$. Slightly larger differences were observed between the first and the second heating cycle, which could indicate the removal of residual moisture. On this basis, it can be concluded that determining the specific heat based on data from the last heating cycle is justified and safe. All samples showed similar properties – specific heat increases with temperature. The obtained specific heat values for different types of samples are similar. In the upper temperature range, the R series samples achieved the highest values, W – the average, and F – the lowest values. In the lower temperature range, the F series samples achieved the highest values and R the lowest. Linear extrapolation to 20°C gives mean values for samples of series R, W and F of 629, 710 and 729 J/(kg·K), respectively. The obtained results are in the lower range of values found in the literature – close to [40] (indirect method), slightly lower than in [37] (direct method) and much lower than in [38] (direct method).

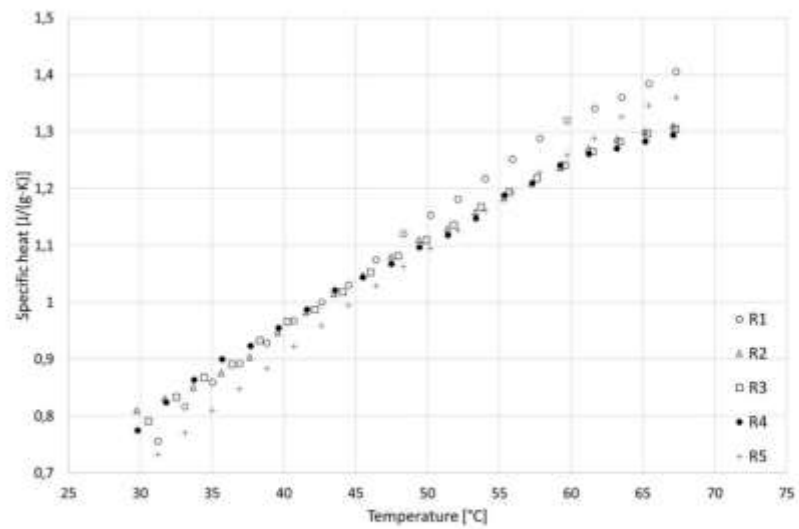


Figure 14. Results of specific heat tests for R series.

436

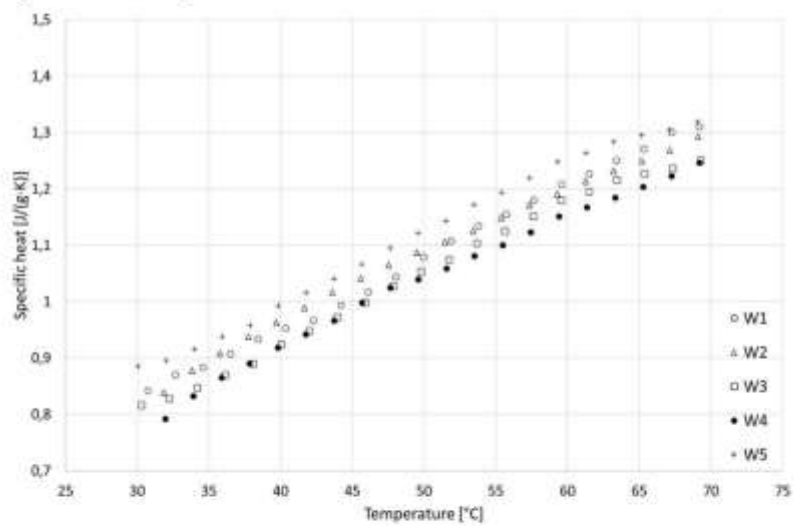


Figure 15. Results of specific heat tests for W series.

438

439

440

441

442

443

444

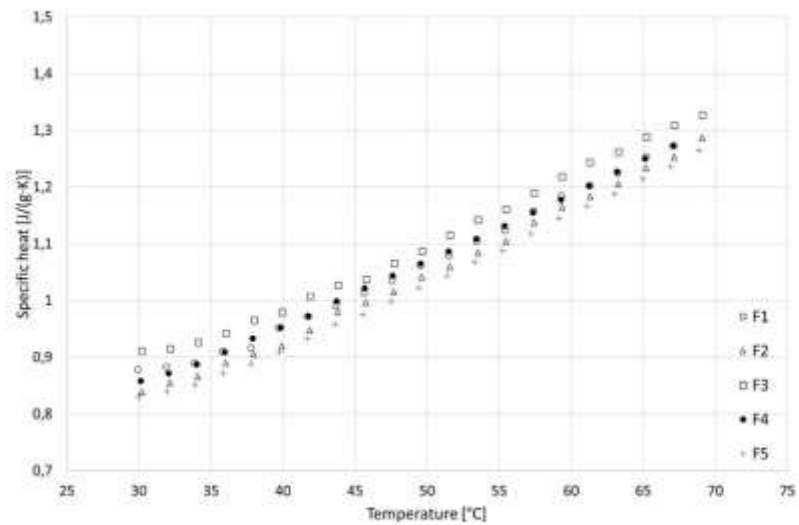


Figure 16. Results of specific heat tests for F series.

446

The obtained results prompted the investigation of the specific heat of the plant component itself, which effect is presented in Figure 17. The observed low specific heat of aggregate explains the relatively low values for the entire composite and indicates that this factor may be one of the reasons for the large scatter of specific heat values of hempcrete presented in the literature [37,38,42]. The relationship between specific heat and temperature is slightly different for hemp shive samples. It is close to linear at lower temperatures, but at $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ values start to decrease. This may indicate the beginning of some transformation or exothermic reaction. Unfortunately, the entire effect was not captured due to the narrow measurement range. Similar characteristics in the upper measurement range can be observed in the case of R samples (with the highest share of hemp shiv).

447
448
449
450
451
452
453
454
455
456

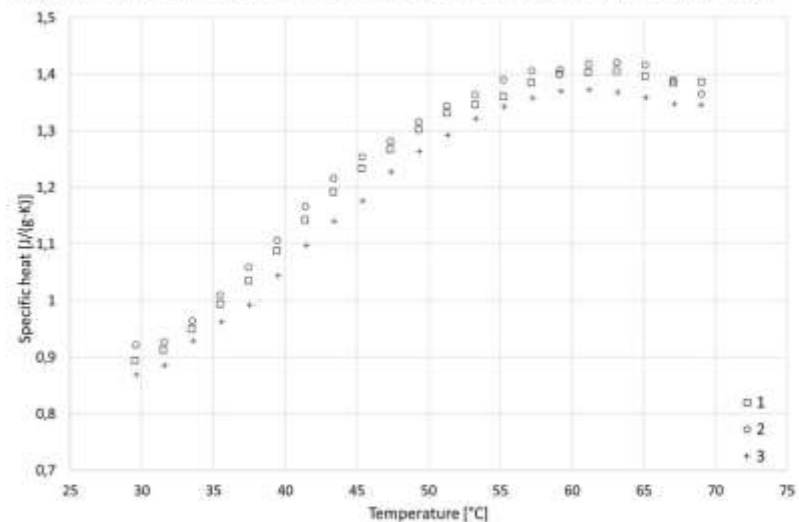


Figure 17. Results of specific heat tests of hemp shiv.

467

5. Conclusions

The test results indicate wide ranges of compressive strength, thermal conductivity and water vapor permeability values of the hemp-lime composite, which can be controlled by the adopted degree of densification, making this material useful in various construction applications. The established relationships between the proportions of components, volumetric density and the main properties of hempcrete may prove useful in the processes of optimizing building design. The data obtained will be used in further research on the properties of building partitions and entire buildings constructed using hempcrete technology.

The macropore structure, regardless of the volumetric density, clearly influences the main properties of the tested material, especially those with a lower degree of densification. This adds uncertainty to inferring materials properties from volumetric density.

Relatively low specific heat values of the tested composites were recorded, mainly due to the low specific heat of hemp shiv used. It seems advisable to conduct broader research on plant ingredients in this area, considering the influence of raw material production technology on their thermal properties.

It seems reasonable to establish a universal method for determining the compressive strength of hemp-lime composites, considering their use and static work in the building, which would allow for better comparison of results.

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

Funding: This research was funded by Warsaw University of Technology within the Excellence Initiative: Research University (IDUB) program, grant number: CRP-IDUB-238/Z01/2024 (504/04496/1010/45.010009). The APC was funded by Warsaw University of Technology.

Data Availability Statement: Data is contained within the article or supplementary material.

Acknowledgments: Work of M.G., W.P. and M.K. was administratively and technically supported by Warsaw University of Technology in the framework of statutory activities. Work of B.P. was administratively and technically supported by Building Research Institute in the framework of statutory activities.

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

Appendix A

Appendix A.1

Table A1.1. Detailed results of compressive strength tests of R samples.

Measured parameter (unit)	R400	R430	R460	R490	R520	R550	R580	R610	R640
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	211.9	227.0	248.3	253.7	273.2	292.7	299.6	324.2	336.7
Volumetric density of dry sample (kg/m ³)	197.1	211.0	231.9	236.0	253.7	271.3	277.9	300.5	312.1
Compressive strength ¹ (MPa)	0.05	0.08	0.11	0.10	0.17	0.22	0.20	0.30	0.34

¹ Determined as a point where 5% strain occurs.

Table A.1.2. Detailed results of compressive strength tests of W samples.

Measured parameter (unit)	W600	W630	W660	W690	W720	W750	W780	W810	W840	W870
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	349.4	361.7	369.3	396.8	403.1	424.1	445.9	453.5	480.9	495.2
Volumetric density of dry sample (kg/m ³)	318.6	330.2	335.9	361.3	366.3	384.7	404.0	411.0	434.2	447.2
Compressive strength ¹ (MPa)	0.36	0.44	0.47	0.68	0.74	0.84	1.10	1.13	1.33	1.31
Compressive strength ² (MPa)	0.38	0.48	0.55	0.74	0.78	0.92	1.00	1.04	1.17	1.27

¹ Determined as a point where the instantaneous stiffness falls to 25% of the recorded maximum value based on a 20-point moving average.

² Determined as a point where 5% strain occurs.

Table A.1.3. Detailed results of compressive strength tests of F samples.

Measured parameter (unit)	F690	F720	F750	F780	F810	F840	F870	F900	F930
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	365.6	370.0	398.5	406.9	430.1	451.8	460.9	463.1	487.3
Volumetric density of dry sample (kg/m ³)	333.6	338.8	362.9	369.8	390.0	409.1	417.1	420.0	441.9
Compressive strength ¹ (MPa)	0.45	0.60	0.62	0.75	0.88	1.04	0.92	1.06	1.50
Compressive strength ² (MPa)	0.43	0.44	0.61	0.75	0.88	1.04	0.91	1.05	1.37

¹ Determined as a point where maximum stress is reached.

² Determined at the point where 5% strain occurs.

Appendix A.2

Table A.2.1. Detailed results of thermal conductivity tests of R samples.

Measured parameter (unit)	R400	R430	R460	R490	R520	R550	R580	R610	R640
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	213.8	226.6	247.0	256.8	273.6	286.0	301.6	314.4	322.0
Coefficient of thermal conductivity (W/(m·K))	0.0671	0.0670	0.0700	0.0710	0.0704	0.0728	0.0741	0.0755	0.0761

Table A.2.2. Detailed results of thermal conductivity tests of W samples.

Measured parameter (unit)	W600	W630	W660	W690	W720	W750	W780	W810	W840	W870
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	327.3	347.8	369.2	383.9	389.6	414.6	425.2	439.1	455.1	453.3
Coeff. of thermal conductivity (W/(m·K))	0.1080	0.1055	0.1157	0.1163	0.1225	0.1249	0.1284	0.1273	0.1323	0.1339

Table A.2.3. Detailed results of thermal conductivity tests of F samples.

Measured parameter (unit)	F690	F720	F750	F780	F810	F840	F870	F900	F930
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	364.6	393.9	417.3	403.3	426.6	441.5	451.9	457.6	477.3
Coefficient of thermal conductivity (W/(m·K))	0.0879	0.0993	0.1002	0.1076	0.1094	0.1182	0.1196	0.1233	0.1216

Appendix A.3

Table A.3.1. Detailed results of water vapor permeability tests of R samples.

Measured parameter (unit)	R400	R430	R460	R490	R520	R550	R580	R610	R640
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	231.6	249.0	248.2	256.2	269.7	285.5	299.8	308.8	330.3
Coefficient of diffusion resistance (-)	3.61	3.78	3.61	3.96	4.07	4.38	4.68	4.97	5.37

Table A.3.2. Detailed results of water vapor permeability tests of W samples.

Measured parameter (unit)	W600	W630	W660	W690	W720	W750	W780	W810	W840	W870
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	348.4	367.7	390.0	391.4	424.6	421.1	436.9	449.2	468.6	479.1
Coefficient of diffusion resistance (-)	4.42	4.10	4.58	4.59	5.23	5.53	5.77	5.69	6.49	7.37

Table A.3.3. Detailed results of water vapor permeability tests of F samples.

Measured parameter (unit)	F690	F720	F750	F780	F810	F840	F870	F900	F930
Volumetric density in RH 50% (kg/m ³)	352.3	390.8	393.8	403.3	429.1	441.3	453.4	463.8	507.4
Coefficient of diffusion resistance (-)	5.85	6.14	6.41	6.44	7.59	7.46	7.99	8.71	10.10

*Appendix A.4***Table A.4.1.** Detailed results of specific heat test of R samples.

Measured parameter (unit)	R1	R2	R3	R4	R5	Av.	Std. Dev.
Specific heat at approx. 60°C (J/(g·K))	1.320	1.237	1.241	1.241	1.259	1.260	0.035
Specific heat at approx. 30°C (J/(g·K))	0.756	0.810	0.791	0.775	0.732	0.773	0.030
Specific heat at approx. 20°C ¹ (J/(g·K))	0.590	0.670	0.667	0.670	0.551	0.629	0.056

¹ Linear extrapolation.**Table A.4.2.** Detailed results of specific heat test of W samples.

Measured parameter (unit)	W1	W2	W3	W4	W5	Av.	Std. Dev.
Specific heat at approx. 60°C (J/(g·K))	1.208	1.213	1.180	1.168	1.248	1.204	0.031
Specific heat at approx. 30°C (J/(g·K))	0.843	0.838	0.817	0.792	0.885	0.835	0.034
Specific heat at approx. 20°C ¹ (J/(g·K))	0.699	0.728	0.685	0.682	0.756	0.710	0.031

¹ Linear extrapolation.**Table A.4.3.** Detailed results of specific heat test of F samples.

Measured parameter (unit)	F1	F2	F3	F4	F5	Av.	Std. Dev.
Specific heat at approx. 60°C (J/(g·K))	1.185	1.165	1.219	1.178	1.145	1.178	0.027
Specific heat at approx. 30°C (J/(g·K))	0.878	0.838	0.912	0.858	0.829	0.863	0.033
Specific heat at approx. 20°C ¹ (J/(g·K))	0.762	0.701	0.762	0.730	0.689	0.729	0.034

¹ Linear extrapolation.**References**

- IEA. Global Status Report for Buildings and Construction 2019. IEA: Paris, France, 2019. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (accessed on: 24 July 2025).
- Ritchie, H.; Samborska, V.; Roser, M. Urbanization. Our World in Data. Available online: <https://ourworldindata.org/urbanization> (accessed on: 24 July 2025).
- Sartori, I.; Hestnes, A.G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy Build.* **2007**, *39*, 249–257, doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001
- Hill, C.; Norton, A.; Dibdiakova, J. A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials. *Energy Build.* **2018**, *162*, 12–20, doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.009
- Asdrubali F.; D'Alessandro F.; Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustain. Mater. Technol.* **2015**, *4*, 1–17, doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002
- Jiang, Y.; Lawrence, M.; Ansell, M.P.; Hussain, A. Cell Wall Microstructure, Pore Size Distribution and Absolute Density of Hemp Shiv. *R. Soc. Open Sci.* **2018**, *5*, doi:10.1098/rsos.171945
- Laborel-Préneron, A.; Magniont, C.; Aubert, J. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste and Biomass Valor.* **2018**, *9*, 1095–1112, doi:10.1007/s12649-017-9895-z
- Gołębiewski, M.; Narloch, P.; Piątkiewicz, W.; Wasilewski, I. Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Mater. Bud.* **2023**, *2023*, 2–8, doi:10.15199/33.2023.09.04
- Kaur, G.; Kander, R. The Sustainability of Industrial Hemp: A Literature Review of Its Economic, Environmental, and Social Sustainability. *Sustain.* **2023**, *15*, doi:10.3390/su15086457
- Rahim, M.; Douzane, O.; Tran Le, A.D.; Langlet, T. Effect of Moisture and Temperature on Thermal Properties of Three Bio-Based Materials. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*, 119–127, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061

11. Benfratello, S.; Capitano, C.; Peri, G.; Rizzo, G.; Scaccianoce, G.; Sorrentino, G. Thermal and Structural Properties of a Hemp – Lime Biocomposite. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *48*, 745–754, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096
12. Marceau, S.; Glé, P.; Guéguen-Minerbe, M.; Gourlay, E.; Moscardelli, S.; Nour, I.; Amziane, S. Influence of Accelerated Aging on the Properties of Hemp Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 524–530, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129
13. Dinh, T.M.; Magniont, C.; Coutand, M. Hemp Concrete Using Innovative Pozzolanic Binder. In Proceedings of the First International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 22–24.06.2015.
14. Asghari, N.; Memari, A.M. State of the Art Review of Attributes and Mechanical Properties of Hempcrete. *Biomass (Switzerland)* **2024**, *4*, 65–91, doi:10.3390/biomass4010004
15. Jami, T.; Karade, S.R.; Singh, L.P. A Review of the Properties of Hemp Concrete for Green Building Applications. *J. Clean. Prod.* **2019**, *239*, 117852, doi:10.1016/j.jclepro.2019.117852
16. Sáez-Pérez, M.P.; Brümmer, M.; Durán-Suárez, J.A. A Review of the Factors Affecting the Properties and Performance of Hemp Aggregate Concretes. *J. Build. Eng.* **2020**, *31*, doi:10.1016/j.job.2020.101323
17. Sinka, M.; Heede, P. Van Den; Belie, N. De; Bajare, D.; Sahnenko, G. Comparative Life Cycle Assessment of Magnesium Binders as an Alternative for Hemp Concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 288–299, doi:10.1016/j.resconrec.2018.02.024
18. Hausteijn, E. Thermal Insulation Properties of the Lime-Cement Composite with Hemp Shives. *Ecol. Eng.* **2018**, *19*, 72–78, doi:10.1016/j.ecoleng.2018.02.024
19. Kinnane, O.; Reilly, A.; Grimes, J.; Pavia, S.; Walker, R. Acoustic Absorption of Hemp-Lime Construction. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 674–682, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106
20. Le, A.D.T.; Maalouf, C.; Mai, T.H.; Wurtz, E.; Collet, F. Transient Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1797–1806, doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.016
21. Ip, K.; Miller, A. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Hemp-Lime Wall Constructions in the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *69*, 1–9, doi:10.1016/j.resconrec.2012.09.001
22. Ingrao, C.; Lo Giudice, A.; Bacenetti, J.; Tricase, C.; Dotelli, G.; Fiala, M.; Siracusa, V.; Mbohwa, C. Energy and Environmental Assessment of Industrial Hemp for Building Applications: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *51*, 29–42, doi:10.1016/j.rser.2015.06.002
23. Shea, A.; Lawrence, M.; Walker, P. Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp – Lime Building. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *36*, 270–275, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123
24. Elfordy, S.; Lucas, F.; Tancrét, F. Mechanical and Thermal Properties of Lime and Hemp Concrete (“Hempcrete”) Manufactured by a Projection Process. **2008**, *22*, 2116–2123, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016
25. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. PROJECTION FORMED AND PRECAST HEMP-LIME: BETTER BY DESIGN?, In Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIBrous materials, Clermont-Ferrand, France, 21–23.06.2017.
26. Gołębiowski, M. Aspekty Zastosowania Kompozytów Wapienno-Konopnych w Budownictwie Indywidualnym Domów Mieszkalnych w Architekturze Proekologicznej. PhD, Warsaw University of Technology, Poland, 2020.
27. Nguyen, T.T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; Amziane, S.; Baley, C.; Thu, T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; et al. Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete. **2011**, *8189*, doi:10.3166/EJECE.14.545-560
28. Walker, R.; Pavia, S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp – Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *64*, 270–276, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081
29. Brzyski, P. Hemp-Lime Composite as Wall Material Meeting the Requirements for Sustainable Development in Construction Industry. PhD, Lublin University of Technology, Poland, 2018.
30. Piątkiewicz, W.; Narloch, P.; Pietruszka, B. Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Arch. Civ. Eng.* **2020**, *LXVI*, 485–503, doi:10.24425/ace.2020.134409
31. Somé, S.C.; Ben Fraj, A.; Pavoine, A.; Hajj Chehade, M. Modeling and Experimental Characterization of Effective Transverse Thermal Properties of Hemp Insulation Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *189*, 384–396, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.210
32. Collet, F.; Pretot, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 612–619, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039
33. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of Constituents on the Properties of the Bio-Aggregate Composite Hemp-Lime. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 9–17, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109
34. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime. *Mater. Struct.* **2017**, *50*, 1–10, doi:10.1617/s11527-016-0976-4

35. Pundiene, I.; Vitola, L.; Pranckeviciene, J.; Bajare, D. Hemp Shive-Based Bio-Composites Bounded by Potato Starch Binder: The Roles of Aggregate Particle Size and Aspect Ratio. *J. Ecol. Eng.* **2022**, *23*, 220–234, doi:10.12911/22998993/144637
36. Hussain, A.; Calabria-Holley, J.; Lawrence, M.; Jiang, Y. Hygrothermal and Mechanical Characterisation of Novel Hemp Shive Based Thermal Insulation Composites. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *212*, 561–568, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029
37. Seng, B.; Magniont, C.; Lorente, S. Characterization of a Precast Hemp Concrete. Part I: Physical and Thermal Properties. *J. Build. Eng.* **2018**, *24*, doi:10.1016/j.jobbe.2018.07.016
38. Brzyski, P.; Gladecki, M.; Rumińska, M.; Pietrak, K.; Kubiś, M.; Lapka, P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials (Basel)*, **2020**, *13*, 1–17, doi:10.3390/ma13235383
39. Stevulova, N.; Kidalova, L.; Junak, J.; Cigasova, J.; Terpakova, E.; Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of light-weight fibrous composites. *Procedia Engineering* **2012**, *42*, 496–500, 2012, doi:10.1016/j.proeng.2012.07.441
40. Pierre, T.; Colinart, T.; Glouannec, P. Measurement of Thermal Properties of Biosourced Building Materials. *Int. J. Thermophys.* **2014**, *35*, 1832–1852, doi:10.1007/s10765-013-1477-0
41. Collet, F.; Chamoin, J.; Pretot, S.; Lanos, C. Comparison of a hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Build.* **2013**, *62*, 294–303, doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010
42. De Bruijn, P.; Johansson, P. Moisture Fixation and Thermal Properties of Lime-Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 1235–1242, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006
43. Abdellatef, Y.; Khan, M.A.; Khan, A.; Alam, M.I.; Kavgić, M. Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials. *Materials* **2020**, *13*, 5000, doi:10.3390/ma13215000
44. Abdellatef, Y.; Kavgić, M. Thermal, Microstructural and Numerical Analysis of Hempcrete-Microencapsulated Phase Change Material Composites. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *178*, 115520, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115520
45. EN 459-1:2015 Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria
46. www.fr.weber/en/facades-neuves/projet-de-renovation/chanvribat (accessed on: 15 May 2025).
47. www.fr.weber/facades-neuves/projet-de-renovation/tradical-thermo (accessed on: 15 May 2025).
48. www.fr.weber/tradicalr (accessed on: 15 May 2025).
49. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The influence of components on the properties of hemp-lime bioaggregate composite. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *159*, 9–17, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109
50. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. Effect of Linseed Oil and Metakaolin on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp-Lime Concrete. *Acad. J. civil eng.* **2017**, *35/2*, 73–80.
51. EN 12664:2002 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance.
52. EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties – Cup method.

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.

10.7. Publikacja [6]

Article

Determination of Compressive Strength in Hemp–Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach

Wojciech Piątkiewicz , Andrzej Piotrowski  and Piotr Narloch 

Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland; andrzej.piotrowski@pw.edu.pl

* Correspondence: wojciech.piatkiewicz.dokt@pw.edu.pl (W.P.); piotr.narloch@pw.edu.pl (P.N.)

Featured Application

The methodology proposed in this study for determining the compressive strength of hemp–lime composites may serve as a foundation for developing a unified testing standard for this type of material used in sustainable construction. The obtained results can be directly applied to the design and evaluation of building envelopes made of hemp–lime composites, ensuring greater repeatability and comparability of test outcomes, as well as optimizing their mechanical and functional properties.

Abstract

The determination of compressive strength of hemp–lime composite (HLC) is currently based on diverse and non-unified approaches, which complicates the direct comparison of results obtained in different studies. This study compares commonly used strength-determination methods using a dedicated experimental dataset and proposes a new, more universal approach, defining compressive strength as the stress corresponding to 1% permanent strain. Cubic specimens ($150 \times 150 \times 150$ mm) were produced at three compaction levels (150%, 170%, 190%) and tested under uniaxial compression. Increasing compaction increased density and resulted in compressive strengths of 219, 316, and 349 kPa, respectively. Methods based on fixed strain levels (5% and 10%) showed good repeatability but primarily reflected serviceability limits, whereas those based on loss of linearity or stiffness reduction were less reliable and highly sensitive to curve interpretation. The proposed 1% permanent-strain method accurately captured the onset of irreversible deformation and aligned with the real behavior of hemp–lime infill in frame structures, supporting its use for standardizing compressive-strength testing of hemp–lime composites.

Keywords: hempcrete; hemp–lime composite; mechanical properties; stress–strain behavior; compressive strength; compression; plant-based aggregate; standardization



Academic Editors: Yimmy Silva and Gerardo Araya-Letelier

Received: 28 November 2025

Revised: 24 December 2025

Accepted: 26 December 2025

Published: 28 December 2025

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.

1. Introduction

The construction sector significantly contributes to greenhouse gas emissions, representing one of the major environmental challenges [1]. Increasing requirements concerning energy efficiency and carbon footprint reduction are driving the development of sustainable materials [2,3]. Among them, renewable plant-based resources capable of CO₂ sequestration have attracted particular attention [4]. Industrial hemp stands out as a promising aggregate for building composites [5]. Its woody core, known as shiv—a by-product of

stem processing for fiber and hemp wool production—is used to manufacture a hemp–lime composite commonly referred to as hempcrete.

Hemp–lime composite exhibits a distinctive mechanical behavior resulting from the combination of two materials with fundamentally different properties: a highly porous, compressible organic aggregate (hemp shiv) and a rigid mineral binder [6,7]. This combination produces an unconventional mechanical response under loading [5], necessitating detailed analysis and a tailored approach to both design and strength assessment. As a material primarily intended for vertical building envelopes—such as external and internal walls—the hemp–lime composite must possess sufficient compressive strength, one of its most critical mechanical characteristics [5]. Due to the distinctive deformation characteristics of the hemp–lime composite and the wide range of stress levels it may exhibit, the literature reports a variety of approaches for determining its compressive strength from the stress–strain response. In some studies, the maximum stress, i.e., the peak point [8], is adopted as the strength criterion, whereas in others the stress corresponding to a total strain of 10% is employed [9–13]. Moreover, researchers have identified four additional, less commonly implemented definitions of compressive strength. This methodological heterogeneity, coupled with the inherent limitations of each approach, leads to inconsistencies in interpretation and hinders the establishment of a coherent framework for evaluating the material’s mechanical performance. Consequently, the present work undertakes a critical comparison of these existing methods and introduces a universal procedure for the determination of compressive strength, which, in the authors’ view, provides the most consistent and broadly applicable basis for its definition.

In this composite, the matrix is a mineral binder, typically based on hydrated lime, while the inclusion phase consists of hemp shiv. The shiv is characterized by high porosity ($76 \pm 2\%$) and an elongated prismatic shape [7,14]. Due to its geometry and low bulk density (approximately 110 kg/m^3), the hemp–lime composite requires appropriate compression during molding, as the degree of compaction strongly influences its density and resulting compressive behavior [15,16]. To obtain a sufficiently wide range of mechanical responses—necessary for a robust evaluation of the various strength-determination methods examined in this study—specimens were intentionally prepared under different compaction levels. Although compaction is recognized as an influential parameter, its description in the literature is often general and lacks reproducible specification, which further motivated its controlled variation in the experimental program.

While the primary objective of this work is to compare existing definitions of compressive strength and to validate the proposed universal method, the study also introduces a practical procedure for defining and reporting the degree of compaction. This auxiliary contribution enables the effects of compaction-induced changes in mechanical properties to be systematically incorporated into the assessment of strength-determination methodologies.

1.1. Factors Influencing the Compressive Strength of Hemp–Lime Composite

Depending on its composition, production method, and curing stage, hemp–lime composite (HLC) exhibits a wide range of compressive strength values, from 0.06 MPa [9] up to 4.74 MPa [17], with most reported results falling between 0.1 and 1.2 MPa [9,16,18–21]. The primary factor influencing compressive strength is the composite density, which depends mainly on the binder-to-shiv ratio and the degree of compaction [22]. Increasing the binder content consistently leads to higher density and strength, as demonstrated in multiple studies [9,10,12,18,23,24].

Binder type also significantly affects the mechanical performance of HLC. Studies on hydrated lime-based binders show that hydraulic additives such as Portland cement, hydraulic lime, gypsum, or clay improve compressive strength [12,25]. Although hy-

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

draulic binders provide higher early strength than hydrated lime, this difference decreases with longer curing times [19,26]. Magnesium oxide-based binders can yield compressive strengths of up to 2 MPa [27], while hydrated lime composites typically reach 0.2–0.83 MPa [28,29]. The carbonation-driven curing of lime binders leads to a substantial long-term strength increase, accompanied by reduced failure strain [22]. Additionally, specimen orientation affects test results, with samples loaded perpendicular to the casting direction exhibiting higher strength and lower failure strain than those tested parallel to it [30].

The degree of compaction has a pronounced effect on the mechanical performance of hemp–lime composites. Experimental studies have shown that compressing the fresh material under stresses of 0.6–1 MPa, leading to a threefold reduction in volume, can yield densities up to 600 kg/m³. Intensive compaction markedly enhances compressive strength and alters the deformation behavior; the material maintains a monolithic structure even under vertical strains of about 25%. Despite the severalfold increase in strength observed between low- and high-compaction samples, identifying the exact point of failure remains challenging due to the material's continuous densification during loading. Notably, higher packing density does not significantly affect the composite's stiffness.

In the present study, three compaction levels were analyzed, corresponding to 30%, 45%, and 60% volume reduction. Increasing compaction from 30% to 60% resulted in a 175% increase in compressive strength, confirming the strong influence of this parameter on mechanical performance. Simultaneously, the reduction in air volume within the structure nearly doubled the material's density, which led to an approximately 17% increase in thermal conductivity.

1.2. Behavior of Hemp–Lime Composite Under Axial Loading

The key mechanical parameter of hemp–lime composite is its compressive strength, which is typically determined through destructive tests under controlled displacement by analyzing the stress–strain curve. Under compression, the material exhibits elastoplastic behavior, with a short quasi-elastic range followed by a wide plastic region [31,32].

Initially, the mineral binder carries the load, resulting in a rapid stress increase with minimal strain; this phase usually does not exceed 2–3% strain and depends on binder content [19,22,33].

The plastic phase is extensive and can be divided into zones. The first is associated with the progressive closure of voids between and within hemp shiv particles, leading to stress concentrations, aggregate deformation, and local binder cracking [5]. This stage may produce a quasi-linear “plateau” in the stress–strain curve, which is characterized by limited stress growth despite increasing strain, although this feature is not always distinct [19]. As voids close further, the granular skeleton stiffens, and stress growth slows; peak stress may occur here, depending on the binder-to-aggregate ratio [22]. However, a clear stress maximum is often absent or appears only at very large strains (>15%), which brings into question its suitability as an ultimate strength criterion.

Some studies identify a third deformation phase in which the compacted hemp shiv increasingly carries the load, causing the stress–strain curve to continue rising without a clear failure point [34]. In this range, the material response resembles wood loaded perpendicular to the grain, and further compression is possible despite visible damage, likely due to partial carbonation and prolonged binder curing [35].

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

1.3. Methods for Determining the Compressive Strength of Hemp–Lime Composite

The specific mechanical characteristics of hemp–lime composite, combined with the absence of standardized testing procedures, have led to a wide variety of approaches for determining its compressive strength. Figure 1 presents a compilation of results from selected studies employing the same or very similar binder composition (70% hydrated lime, 20% hydraulic binder, and 10% pozzolanic additives) and a comparable binder-to-shiv ratio ranging from 2.0 to 2.25.

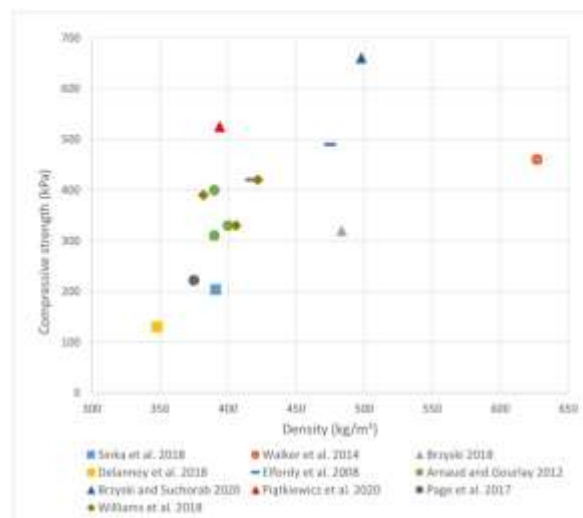


Figure 1. Compressive strength of hemp–lime composite as a function of density, compiled from various publications using comparable binders and binder-to-shiv ratios, with consideration of possible differences arising from the applied compressive strength testing methods [9,10,12,19,20,22,23,33,36,37].

Analysis of the available data indicates that, even under comparable composite parameters—including binder composition, component proportions, and density—reported compressive strength values differ by as much as a factor of two and range from 0.24 to 0.525 MPa. These discrepancies primarily arise from the application of different testing procedures and evaluation criteria used to determine the compressive strength of the material.

Numerous approaches for determining the compressive strength of hemp–lime composites can be found in the available literature, reflecting the diversity of testing procedures and experimental parameters adopted by different researchers (Table 1). These methods vary primarily in the application of loading, sample geometry and dimensions, loading regime, and criteria used to define the ultimate strength.

All methodologies consistently assume that the loading should be applied slowly to ensure measurement accuracy, although the loading rate may range from 0.2 mm/min to 10 mm/min, depending on the adopted testing protocol [8,9]. The specimen sizes also differ significantly—from small cubic samples with 50 mm edges to cylindrical specimens measuring 110 mm in diameter and 220 mm in height [16,38]. The tests may involve either monotonic or cyclic loading, with some studies suggesting that the loading type has little effect on the measured compressive strength [39].

The principal distinction between methods lies in the definition of the ultimate compressive strength, which can be determined based on various reference points, such as the maximum recorded stress or the point of visible specimen failure. In the literature, six distinct methods for evaluating the compressive strength of hemp–lime composites have been identified and summarized in Table 1, highlighting their specific characteristics and the impact of methodological choices on the obtained results.

Table 1. Methods for determining the compressive strength of hemp–lime composite.

Method Index	Abbreviated Method Name	Method Description	Testing Conditions	Ref.
I	Deviation from Linearity of the σ – ϵ Curve	The compressive strength is defined as the stress corresponding to the onset of non-linear behavior on the stress–strain curve.	Cubic specimens $50 \times 50 \times 50$ mm or $100 \times 100 \times 100$ mm; loading rate 50 N/s or 5 mm/min; procedure based on EN 459-2:2010 [40] and EN 196-1:2005 [41]	[19,33]
II	25% Stiffness Reduction	The strength is defined at the point where the instantaneous stiffness decreases to 25% of its maximum value, determined using a 20-point moving average.	Cubic specimens $150 \times 150 \times 150$ mm; loading rate 3 mm/min.	[23,30]
III	Serviceability Limit (5% Strain)	The compressive strength is defined as the stress corresponding to 5% strain, adopted as the material's serviceability limit.	Cubic specimens $50 \times 50 \times 50$ mm.	[38]
IV	Stress at 10% Strain	In accordance with EN 826, the compressive strength is defined as the stress at 10% strain.	Specimens with dimensions ranging from $50 \times 50 \times 30$ mm to $100 \times 100 \times (80\text{--}93)$ mm; loading rate 3–10 mm/min.	[9–13]
V	Maximum Load ($\sigma_{\max}$)	The compressive strength is defined as the stress corresponding to the maximum recorded load during compression.	Cylindrical specimens with 102 mm diameter and 102 mm height, and cubic specimens $150 \times 150 \times 150$ mm; loading rate 0.2–3 mm/min.	[8]
VI	Cyclic Compression	The strength is determined during the final loading to failure, preceded by three controlled compression cycles with increasing strain levels (1%, 2%, 3%).	Cylindrical specimens 110 mm in diameter and 220 mm in height; displacement control: 3 mm/min (loading) and 6 mm/min (unloading).	[17,39]

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Binder Characteristics

The binder for the hemp–lime composite was made by mixing hydrated non-hydraulic calcium lime of class CL 90S (ALPOL Gips, Trzebinia, Poland), Portland cement of compressive class CEM I 42.5R (Holcim S.A., Malogoszcz, Poland), and Metakaolin of type L05 (Mikrosilika Trade, Warsaw, Poland) in proportions of 75%, 15%, and 10% (wt.), respectively, based on literature and preliminary studies [9,19,20,22,26,33,42–44]. These locally

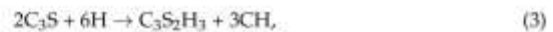
<https://doi.org/10.3390/app16010306>

sourced materials ensure availability in Poland, cost-effectiveness, and reduced environmental impact. Hydrated lime supports plasticity and moisture regulation due to its porous structure [25]; cement enhances high early compressive strength, enabling rapid formwork removal [45], and metakaolin, a natural pozzolan, improves durability and reduces thermal conductivity while lowering embodied energy compared to pure Portland cement [38,46,47]. Such a composition, aligned with commercial binders, optimizes mechanical, thermal, and hydrothermal properties while minimizing the carbon footprint [48,49].

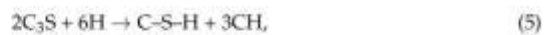
The combination of hydrated lime, Portland cement, and metakaolin enables us to obtain a hybrid binder system in which the components react simultaneously or sequentially, creating a new type of composite mineral matrix. In case of calcium lime the, main contributor to the matrix, first calcium oxides take part in the reactions of hydration (Equation (1)) (at this stage, hydrated lime also contributes to maintaining a highly alkaline pore solution rather than directly enhancing mechanical resistance), and later—the hydrated phases are subjected to additional hardening through the carbonation process, i.e., neutralization of calcium hydroxide to calcium carbonate under the influence of CO_2 in the presence of atmospheric moisture (Equation (2)). This process contributes to microstructural densification of the matrix at later ages.



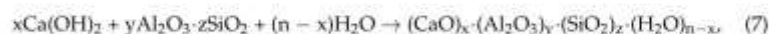
In case of Portland cement, the most intensive reactions are hydration and hydrolysis of calcium silicates (alite and belite), resulting in formation of calcium silicate hydrates phase (C–S–H) and calcium hydroxide (portlandite) (Equations (3)–(6)), as well as ettringite formed from calcium aluminate and ferro-aluminate phases in the presence of sulfates.



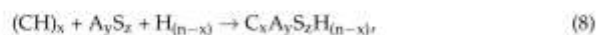
or using abbreviated formulas:



These products are primarily responsible for early-age stiffness and strength development of the matrix. Meanwhile, the calcium hydroxide (i.e., the product of both, lime and Portland clinker constituents hydration) takes part in the pozzolanic reaction with the amorphous silica present in metakaolin, resulting in formation of additional binding phases, mainly C–S–H of low Ca/Si ratio and calcium aluminosilicate hydrates (C–A–S–H) (Equations (7) and (8)) [50] with minor amounts of calcium aluminate hydrates such as gehlenite hydrate or hydrogarnet-type phases. In the presence of carbonate ions, carboaluminate and hydroxy-carboaluminate phases may also form, stabilizing aluminum-bearing reaction products [51].



or using abbreviated formula:



The combined effect of the above-mentioned reactions and mechanisms results in a continuous increase in mechanical resistance over time. Early strength is controlled by cement hydration, while medium- and long-term strength development is governed by pozzolanic reactions and gradual carbonation. Unlike pure lime binders, where strength develops slowly and may remain limited, the lime-cement-metakaolin system exhibits sustained strength growth and improved long-term stability. Importantly, the progressive consumption of calcium hydroxide reduces excessive alkalinity, which is beneficial for limiting mineralization and degradation of hemp particles, thereby contributing to the durability of the hemp-lime composite.

The specific chemical compositions of all hybrid binder components, namely Portland cement CEM I 42.5R, calcium lime CL 90S, and metakaolin L05, are summarized in Table 2.

Table 2. Chemical composition (expressed by oxides) of the binders used in the research according to the declarations of the manufacturers.

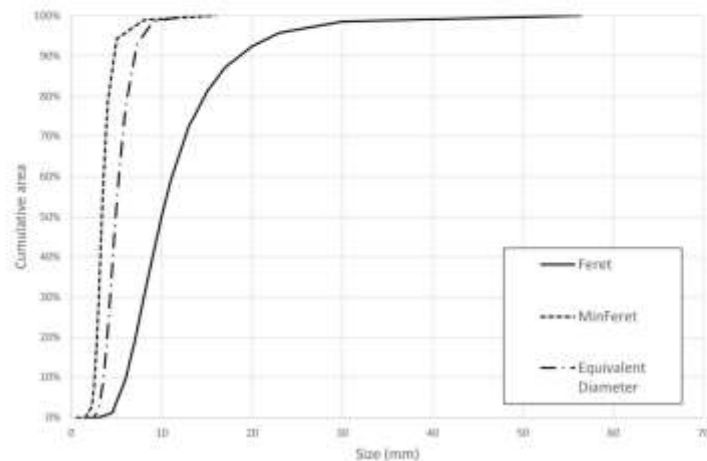
Chemical Compound	Hydrated Lime CL 90S	Portland Cement CEM I 42.5R	Metakaolin L05
CaO + MgO	≥90%	-	-
MgO	≤1.2%	0.5–4%	0.18%
CO ₂	≤3.5%	-	-
SO ₃	≤1%	1.5–3.5%	-
CaO	-	60–67%	0.13%
SiO ₂	-	17–25%	54.1%
Al ₂ O ₃	-	3–8%	40.1%
Fe ₂ O ₃	-	1–6%	1.1%
Na ₂ O	-	0.1–1.0%	-
K ₂ O	-	0.3–1.3%	0.8%
TiO ₂	-	-	1.8%

2.1.2. Hemp Shives

The aggregate used in the study consisted of hemp shives from the Futura 75 industrial hemp variety, commonly employed in construction applications [10,29,52]. Sourced from a single growing season and processed into fibers and shives by the Polish producer (Podlaskie Konopie, Dobrzyńówka, Poland), the material was dedusted and defibrated to ensure uniformity and minimize variables beyond particle size distribution. The hemp underwent natural retting during production. Particle geometry was characterized using image analysis, with 30 independent 3 g shive samples scanned and processed in ImageJ software, version 1.54g (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) to determine basic parameters such as Feret diameter, minimum Feret diameter, area, and perimeter of each particle, following the RILEM BBM Technical Committee protocol [35]. Based on these data, additional parameters, including equivalent diameter, circularity, and elongation, were calculated. Detailed granulometric characteristics of the shives are reported in [53], with results presented in Table 3 and Figure 2.

Table 3. Characteristics of hemp shiv used in the study.

Bulk Density (kg/m ³)	Mean Feret Diameter (mm)	Mean Minimum Feret Diameter (mm)	Mean Equivalent Diameter (mm)	Mean Area (mm ²)	Mean Circularity (-)	Mean Elongation (-)
108.6	9.26	3.15	4.47	21.33	0.48	3.09

**Figure 2.** Particle size distribution of hemp shives used in the study.

2.2. Experimental Design

To investigate the effect of compaction on the mechanical resistance of the hemp–lime composite, a series of laboratory mixes was prepared with varying degrees of material compaction during production (Table 4). All mixtures were produced and tested under controlled conditions, enabling an assessment of the correlation between the material's internal structure and its strength parameters.

Table 4. Series of prepared specimens.

Series Name	Compaction Level	Hemp/Binder/Water Ratio by Mass (-)
HLC.150	150%	1/2/2.34
HLC.170	170%	
HLC.190	190%	

Furthermore, based on the results of the mechanical tests, a comparative analysis of the most commonly used methods for determining compressive strength reported in the scientific literature was conducted, and an original method for defining this property was proposed.

2.2.1. Specimen Preparation

In the initial stage of specimen preparation, the quantities of all components of the hemp–lime composite were precisely measured, including the binder constituents (hydrated lime CL 90-S, Portland cement CEM I 42.5 R, and metakaolin), hemp shiv, and water. The dry binder components were thoroughly mixed, after which the premeasured amount of water was added, and the mixture was blended in a planetary mixer with a vertical

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

axis for approximately 2–3 min, until a uniform consistency was achieved, following the procedure applied in [22,54,55]. Subsequently, the hemp shiv was gradually added to ensure even distribution of the binder within the aggregate and to obtain a homogeneous composite. The total mixing time ranged from 6 to 8 min.

After the mixture was prepared, its loose bulk density (without compaction) was determined using a mold measuring $30 \times 30 \times 8$ cm. Based on this loose density and the assumed compaction levels (150%, 170%, and 190%), the mass of material required for each specimen was calculated. The 150% compaction level was selected based on preliminary tests, which showed that a minimum compaction of 145% was necessary to ensure specimen integrity after demolding. Conversely, 190% compaction represented the maximum achievable value when using manual tamping with a hand rammer, while 170% compaction served as an intermediate level, allowing analysis of the influence of varying compaction degrees.

The specimens were formed in cubic molds measuring $15 \times 15 \times 15$ cm using manual tamping (Figure 3). The forming process was carried out in two equal layers, each approximately 7.5 cm thick. The mass of material per layer was equal and corresponded to half of the total calculated mass for a given specimen. After forming the first layer, its surface was lightly loosened to ensure proper bonding with the subsequent layer.



Figure 3. On the left: mold and hand rammer used for specimen forming. On the right: specimen prepared for the compressive strength test.

After molding, the specimens were left in the molds for 24 h, then demolded and placed in a climatic chamber maintained at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative humidity of $60 \pm 10\%$, providing optimal conditions for carbonation [22]. The specimens were cured for 28 days, after which they were weighed and measured to determine their final density.

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

2.2.2. Compressive Strength Testing

The compressive strength tests were carried out after 28 days of curing, following the procedure described in [17]. Cubic specimens measuring $15 \times 15 \times 15$ cm were weighed and measured prior to testing to determine their density.

Compressive strength and the shape of the stress–strain curves were determined through destructive compression tests performed using an Instron 3382 testing machine with a maximum load capacity of 100 kN. The specimens were compressed at a constant crosshead displacement rate of 5 mm/min, in a direction parallel to the forming and compaction axis, corresponding to the typical orientation of material load transfer in shuttering technology [30]. A steel plate (8 mm thick) was placed on each specimen to ensure uniform contact with the machine's movable platen. Parameters such as load, displacement, and stress were recorded using the Instron Bluehill 2 software (Instron, Norwood, MA, USA), which generated real-time stress–strain curves.

Before each test, a preload of approximately 0.02 kN was applied to minimize the effect of surface irregularities, after which the displacement measurement was zeroed. The influence of the steel plate was neglected in calculations, as its mass accounted for less than 2% of the lowest recorded strength value. The compression test was terminated when the strain reached 13.3% or when a noticeable stress drop occurred. All key steps of the experimental procedure are presented in the experimental flow chart (Figure 4).

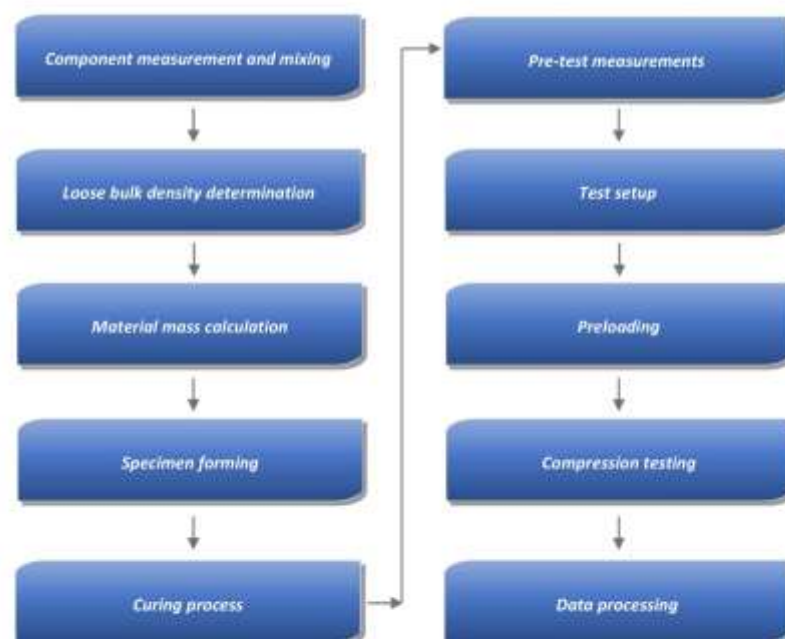


Figure 4. Experimental flow chart of specimen preparation and compression testing.

Due to the absence of a standardized procedure for determining the compressive strength of hemp–lime composite, five methods from the scientific literature were applied, along with a proposed method. The cyclic loading method was omitted because of the monotonic nature of the loading used. According to [39], a comparison between monotonic and cyclic loading showed no significant differences in the determined compressive strength values.

The proposed method in this study defines the compressive strength as the stress corresponding to 1% permanent strain of the material. Considering the mechanical behavior of hemp–lime composite, the approach was based on EN 408:2010+A1:2012 [56], which specifies procedures for determining the compressive strength of wood perpendicular to the grain. The choice of a 1% permanent strain criterion was motivated by the assumption that the tested material is designed to interact with timber structures in applications such as walls, floors, and roofs, where permanent strain is defined as the irreversible deformation remaining after unloading.

This method involved an initial estimation of the expected compressive strength of each specimen, followed by fitting a linear trend line using the least squares method to the elastic portion of the curve (up to 40% of the estimated strength, Figure 5), referred to as the initial curve. By shifting this line 1% to the right along the strain axis, an offset line was obtained. The intersection point of this offset line with the experimental stress–strain curve, recorded by the Instron Bluehill software, was taken as the compressive strength of the composite. The schematic representation of the proposed method is shown in Figure 6.

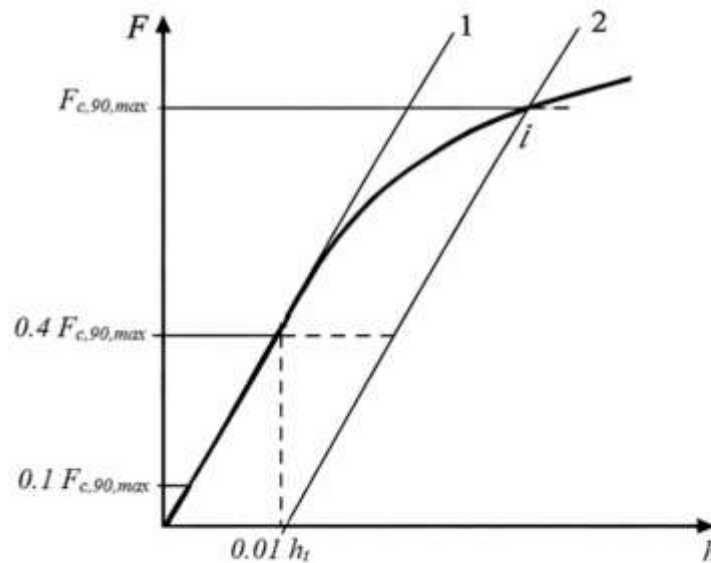


Figure 5. Load–deformation diagram illustrating the procedure for determining compressive strength, where F is the applied load, h the deformation, $F_{c,90,max}$ the maximum load, and h_t the specimen height [56]. Line 1—linear trend line fitted to the elastic portion of the curve. Line 2—offset line obtained by shifting Line 1 by 1% along the strain axis.

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

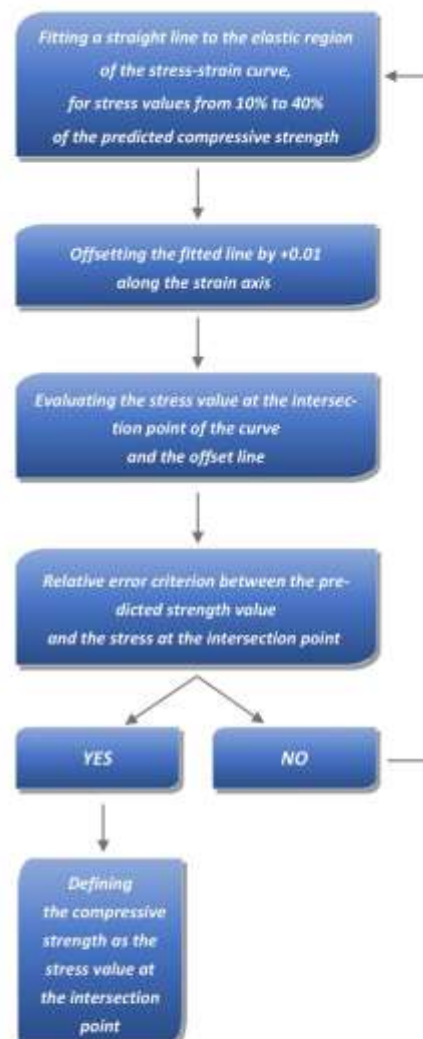


Figure 6. Flowchart of the procedure for determining compressive strength using the proposed method.

3. Results

3.1. Samples Density

An increase in the compaction level of the hemp–lime composite during the forming stage by 20% and 40% resulted in a corresponding increase in material density by 13.6% and 18.7%, respectively (Table 5). The standard deviation for series HLC.150 and HLC.190 was low, at 5.2–5.3 kg/m³, indicating good repeatability. The intermediate series, HLC.170, exhibited a noticeably higher standard deviation of 14.8 kg/m³, suggesting slightly greater variability in material homogeneity.

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

Table 5. Density of specimens prepared for compressive strength testing.

Series Name	Average Density (kg/m ³)	Standard Deviation (kg/m ³)
HLC.150	346.2	5.2
HLC.170	393.4	14.8
HLC.190	411.0	5.3

3.2. Compressive Strength

Visual observation of specimens during compression testing revealed characteristic failure mechanisms (Figure 7). During the initial loading stage, no discernible changes in the specimen structure were observed. With increasing load, acoustic emissions in the form of intermittent cracking became evident, suggesting the onset of microdamage within the binder matrix. With further increase in load, the specimens exhibited progressive lateral bulging. The deformation was generally symmetric; however, local stress concentrations and bulging patterns depended on the spatial distribution of aggregate particles within the composite. More pronounced bulging occurred in regions with weaker interlocking of hemp shiv particles, allowing their displacement beyond the original specimen boundaries. The observed failure mechanisms showed a clear dependence on the degree of compaction applied during specimen formation. Specimens with lower compaction (HLC.150) exhibited detachment of larger clusters of hemp shiv particles, resulting in more pronounced surface degradation. In contrast, specimens with higher compaction (HLC.190) showed markedly reduced surface damage, with particle detachment largely limited to individual aggregate elements. As the loading process continued, visible cracks began to appear in the material and propagated along the aggregate particles. Their distribution was irregular and non-repetitive, governed by the random arrangement of hemp shiv within the composite. No distinct failure surface or well-defined fracture plane typical of brittle materials was observed. The highest damage intensity occurred in the central region of the specimens, across the cross-section, where lateral bulging and detachment of hemp shiv particles were most pronounced. Despite progressive damage and visible structural degradation, detached particles did not fully separate from the composite but remained partially connected through residual binder bridges and mechanical interlocking with adjacent aggregate elements. Throughout the plastic deformation phase, the specimens exhibited a continuous increase in stress without reaching a distinct maximum within the investigated strain range.

With reference to the stress–strain response of the material, the initial loading stage, typically up to a relative strain of $\epsilon = 1\%$, was characterized by a run-in phase. This was attributed to surface irregularities of the specimens formed during compaction, as well as to the composite's structural characteristics, where the aggregate phase constitutes the dominant volume fraction. To minimize the influence of this initial effect on further analysis, a linear extrapolation of the elastic section of the stress–strain curve was performed on its intersection with the strain axis, ensuring consistent curve alignment between specimens.

After eliminating this initial effect—and in some cases, from the very beginning of loading—a clearly defined linear-elastic phase was observed, characterized by the steepest slope (highest stiffness) and an almost perfectly straight relationship between stress and strain. In this range, stress increased most rapidly with strain. Around $\epsilon \approx 2\text{--}3\%$, a gradual transition to the plastic phase occurred, during which the rate of stress increase significantly decreased while strains grew more rapidly (Figure 8).

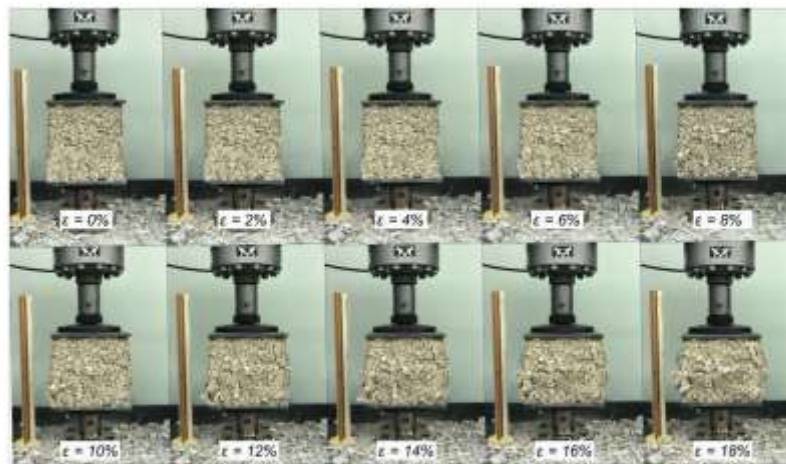


Figure 7. Failure progression of hemp–lime composite specimens during compression testing at 2% strain intervals (0–18%). The images demonstrate characteristic features including gradual lateral bulging, progressive particle detachment, and crack formation along aggregate particles, with maximum damage concentration in the mid-height region.

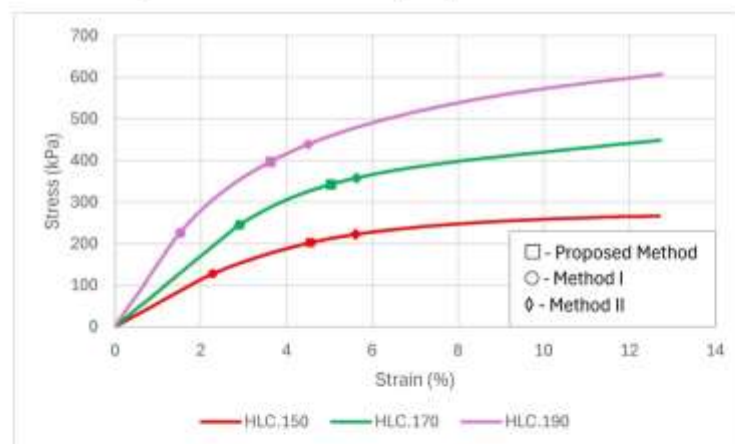


Figure 8. Stress–strain response of representative specimens under compression, with reference points corresponding to compressive strength determined using Method I, Method II, and the proposed method.

For some specimens, the boundary between the elastic and plastic regions was difficult to identify precisely, which introduced uncertainty in defining the yield point according to Method I. Despite substantial strain accumulation with only minor stress increase, none of the tested specimens reached a distinct peak stress (maximum on the curve) within the analyzed range. After approximately $\epsilon = 7\%$, the stress increase became minimal but continued up to the end of the test. The HLC.190 series displayed a more pronounced stress increase at this stage compared with HLC.150 and HLC.170.

The tests were terminated when the specimen shortening reached 20 mm, corresponding to a relative strain of $\epsilon = 13.3\%$, in accordance with the procedure adopted in [34]. Up to this point, no stress drop was observed in any of the specimens. Due to the absence

of a peak on the stress–strain curves, two of the six evaluated methods—Method V and Method VI, which require identification of maximum stress—could not be applied and were therefore excluded from further comparison.

The stress values determined using the remaining methods, along with the proposed method, are presented in Table 6. Figure 9 illustrates the relationship between compressive strength and density for all tested specimens in each series. In addition, the complete dataset is provided in Appendix A.

Table 6. Compressive strength (kPa) of tested series according to different methods.

Method No.	HLC.150	HLC.170	HLC.190	Standard Deviation
I	140.00	205.00	178.67	33.75
II	233.00	344.03	421.30	31.90
III	229.64	332.39	427.58	23.19
IV	289.87	414.59	558.98	16.75
Proposed Method	219.46	315.55	348.92	31.09

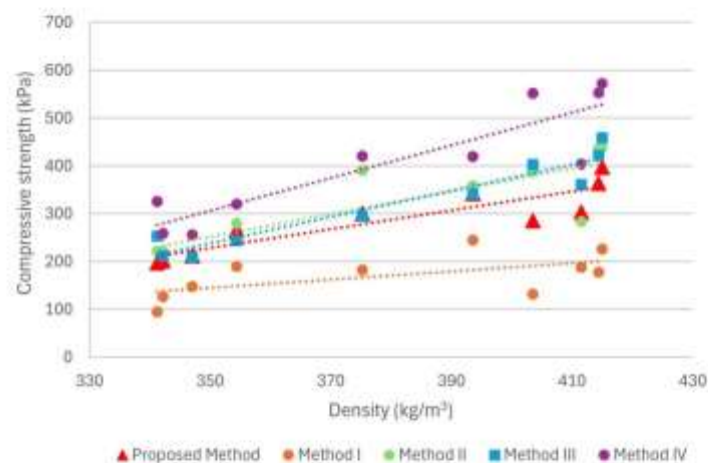


Figure 9. Compressive strength in relation to the density of the tested series. The dashed lines in each color represent the trend lines for each method.

In Methods III and IV, the strain corresponding to the measured stress has a fixed value, whereas in the remaining methods, this parameter is variable and provides important information when comparing the obtained strength values. The strain values corresponding to the ultimate stress in Methods I and II and in the proposed method are summarized in Table 7.

Table 7. Strain values (%) at the point of compressive strength determination according to different methods.

Method No.	HLC.150	HLC.170	HLC.190	Standard Deviation
I	2.4	2.1	1.2	0.7
II	5.2	5.3	4.9	1.4
Proposed Method	4.07	4.2	3.4	0.9

An analysis of these data indicates that, in all three methods, the ultimate strain decreases with increasing compaction level of the material. This implies that, for composites with higher strength, the point at which the reference value is determined occurs closer to the initial (elastic) segment of the stress–strain curve.

4. Discussion

The observed specimen behavior during compression is consistent with the elastoplastic behavior described in the literature for hemp–lime composites with specific binder-to-aggregate ratios. The mechanism of gradual particle detachment while maintaining their partial connection confirms the phenomenon described in previous studies, where local cracking of the mineral matrix occurs around the highly compressible aggregate, leading to progressive damage accumulation rather than sudden structural collapse.

The absence of a clearly defined failure surface or distinct fracture plane is a fundamental characteristic of hemp–lime composites under compressive loading, resulting from their unique structure. Unlike conventional concrete or masonry materials, which exhibit classical failure modes with well-defined crack patterns or shear planes, hemp–lime composites are characterized by distributed damage patterns. This behavior results from the fact that the soft, highly compressible organic aggregate continues to deform plastically even after visible damage to the mineral binder has occurred.

The continuous increase in stress observed throughout the plastic deformation phase occurred without a distinct maximum. This behavior supports hypotheses reported in the literature that progressively densified hemp shiv gradually assumes load-bearing capacity as composite compaction proceeds. As a result, defining compressive strength using traditional peak-stress criteria becomes impractical. The observed failure behavior, therefore, indicates that hemp–lime composites should be evaluated using criteria that reflect their elastoplastic response and gradual densification mechanism, rather than conventional strength assessment methods developed for materials with well-defined failure surfaces.

Method I, which defines compressive strength based on the transition of the stress–strain curve from the elastic to the plastic region, exhibited the highest standard deviation among all of the analyzed approaches. In hemp–lime composites, this transition is often poorly defined, and in some samples, the elastic phase is nearly absent. Consequently, determining the strength required a subjective interpretation of the curve, increasing both result uncertainty and variability between analyses. Method I also yielded the lowest strength values, which can be attributed to the very short elastic range typical of hemp–lime composites—often not exceeding approximately 3% strain. Notably, this was the only method that indicated a higher strength for the HLC.170 series than for HLC.190, a result likely caused by the difficulty in precisely identifying the inflection point on the curve when the elastic phase is limited. In contrast, all other methods demonstrated consistent trends, showing an increase in strength with increasing density or compaction level, in agreement with findings reported in the literature.

Method II produced values comparable to those of Method III, with strains corresponding to a 25% reduction in instantaneous stiffness ranging between 4.9% and 5.3%. However, the standard deviation of the strain value at the limit point was the highest among all analyzed methods, and the relative error of stress—except for Method I—was also among the largest. This indicates significant variability of results obtained using this approach. Analysis of the stress–strain curves revealed that this method is particularly sensitive to the curve shape and the degree of “flattening.” When the curve exhibits a distinct elastic phase with a steep initial slope, followed by an abrupt transition to the plastic region, the point corresponding to 25% stiffness reduction appears relatively early. Conversely, for curves

with a gentle slope from the beginning of loading—where stiffness decreases gradually over a wider strain range—the point occurs at much higher strain values.

Similar limitations of this method were also reported in a previous study [57], where some hemp–lime composite series did not reach a 25% stiffness reduction within the strain range of 0–20%. It was shown that this point could appear at strains as low as 4% for mixes with higher initial stiffness and as high as 7% for those with lower stiffness and a less distinct elastic phase. This led to situations in which a mix with a lower binder content—and consequently lower stiffness—exhibited a higher apparent strength than a stiffer mix, emphasizing the strong sensitivity of Method II to the shape of the stress–strain curve.

Methods III and IV were characterized by the lowest standard deviation among all analyzed approaches. In particular, Method IV, applied analogously to testing of insulation materials such as EPS, showed a standard deviation more than two times lower than that of Methods I and II and that of the proposed method. Both methods also exhibited a consistent increase in strength with higher compaction levels: approximately 44% between the HLC.170 and HLC.150 series and 90% between HLC.190 and HLC.150. While the strength increase between the least and moderately compacted samples was comparable across all methods (averaging about 45%), the difference between HLC.150 and HLC.190 was most pronounced in Methods III and IV.

During the analysis, an additional limitation was identified for Methods III and IV, in which compressive strength is defined as the stress corresponding to a specific strain level. These methods proved to be sensitive to material behavior in the initial loading phase, where, due to the composite's granular structure, deformation increases nonlinearly, showing a characteristic “run-in” effect. Despite applying a preliminary preload to minimize surface irregularities, the duration of this initial phase varied between samples, resulting in direct strain-axis shifts and affecting the stress values corresponding to fixed strain levels. This reduced both repeatability and comparability of results. As discussed earlier regarding curve extrapolation, this issue can be mitigated by omitting the initial unstable portion of the curve and extending the linear section back to its intersection with the strain axis. Applying such a correction minimizes the influence of surface irregularities during the initial loading phase and yields more representative stress values at defined strain levels.

Within the proposed method, the compressive strength of the HLC.150 and HLC.190 samples increased; however, this improvement was the smallest among all analyzed approaches, amounting to 59%. A noticeable yet stable increase in strength was obtained with a relative error slightly lower than in Methods I and II. Unlike Methods V and VI—which rely on the maximum stress value as the failure criterion—the proposed method is based on the assumption that the failure of a hemp–lime composite cannot be defined by the peak of the compressive stress–strain curve. As demonstrated by the experimental data, such a maximum may either not occur or may appear only after irreversible structural changes have already taken place within the composite. Likewise, using the total strain as the failure criterion—as adopted in Methods III and IV—is inappropriate, as it disregards the elastic component of the material response. Consequently, depending on the Young's modulus, the same total strain value may correspond to different stages of deformation and, therefore, different levels of material degradation.

In contrast, the proposed method relies on permanent strain, which provides a direct and unambiguous measure of irreversible deformation in the tested specimen. This approach is consistent with established engineering standards, where analogous criteria are employed, for example, to determine the elastic and plastic limits of metals or to assess the compressive strength of wood loaded perpendicular to the grain.

In view of the above, the authors recommend adopting a permanent strain of 1% as the failure threshold, following the convention used in wood mechanics and considering

that hemp–lime composites frequently interact structurally with timber components in construction applications. It should be noted, however, that this method is not applicable to elastobrittle composites with a high binder content, for which the traditional maximum-stress approach remains the more appropriate criterion.

5. Conclusions

The analysis of the conducted tests revealed significant differences among the methods commonly used in the literature to determine the compressive strength of hemp–lime composites. The results confirm that the choice of testing procedure has a direct impact on the interpretation of the material's mechanical behavior, which, due to its highly porous structure and nonlinear deformation characteristics, does not exhibit a typical stress–strain curve. Consequently, traditional criteria based on maximum load are insufficient and lead to results that are difficult to compare across different laboratories.

Among the analyzed approaches, the methods based on constant strain levels (5% and 10%) exhibited relatively consistent results for the specific material type examined. It should be emphasized, however, that these methods refer more to a serviceability limit state than to material strength, and in this role they perform well. Nevertheless, they lack a solid theoretical basis for defining compressive strength and remain sensitive to several influencing factors—for example, using total strain as a criterion disregards the elastic component of deformation, meaning that the same strain value may correspond to different stages of material degradation depending on the Young's modulus. Additionally, for samples with uneven loading surfaces, the stress values measured at these strain levels may be under- or overestimated due to nonuniform contact with the press plate during the initial loading phase. To improve the reliability of this approach, the initial portion of the loading curve should be adjusted by extrapolating the linear (elastic) section, thereby minimizing errors arising from imperfect specimen–plate contact.

The proposed method—based on the stress corresponding to 1% permanent strain—can be regarded as the most representative and reliable among the approaches considered, as it directly captures the level of irreversible damage in the material and reflects the actual working conditions of hemp–lime composites in timber-frame systems, where the interaction with wooden elements is structurally significant. Such an approach is consistent with current engineering practice for other materials, including wood, for which the 1% strain criterion is widely accepted. Given the close interaction between hemp–lime composites and timber in building applications, adopting the same threshold is both practical and justified, while future studies may refine this value to reflect material-specific behavior and engineering requirements.

The method based on the loss of linearity exhibited high sensitivity to researcher interpretation and to variations in the curve profile. Moreover, this method may lead to misleading conclusions, such as indicating lower strength values for composites with a higher compaction degree—contradicting the results obtained by other methods. This significantly limits its usefulness for comparative or standardized testing. Similarly, the stiffness reduction method, despite producing results close to those of Method III, showed sensitivity to the variability of the stress–strain curve and is therefore unsuitable for comparing composites with markedly different stiffness levels. The lack of clear reference points in materials with an extended plastic phase makes these approaches poorly repeatable and difficult to standardize.

The degree of compaction was found to have a significant influence on the compressive strength of the hemp–lime composite. An increase in compaction by 40% resulted in an approximately 59% increase in compressive strength, as determined using the proposed method. The present study introduces a unified approach for defining the degree

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

of compaction during the composite manufacturing process, enabling the standardization of specimen forming and improving the comparability of results across different research facilities.

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

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

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

Acknowledgments: The authors would like to express sincere gratitude to Ernest Przyżeczki for his valuable assistance in preparing the samples for the experimental tests, as well as to Piotr Woyciechowski (Warsaw University of Technology), Joanna Julia Sokółowska (Warsaw University of Technology), and Maciej Kalinowski (Warsaw University of Technology) for their valuable substantive support.

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

Appendix A

Table A1. Detailed results of density and compressive strength tests of all samples.

Specimen ID	Density (kg/m ³)	Proposed Method (kPa)	Method I (kPa)	Method II (kPa)	Method III (kPa)	Method IV (kPa)
HLC.150.1	354.41	266.01	190.00	280.12	243.62	319.93
HLC.150.2	342.13	202.39	127.00	222.23	211.74	258.39
HLC.150.3	347.02	212.15	148.00	208.25	209.78	255.77
HLC.150.4	341.24	197.27	95.00	221.4	253.43	325.4
HLC.170.1	375.23	300.83	182.00	390.91	295.18	420.35
HLC.170.2	411.56	303.29	188.00	283.34	360.53	403.46
HLC.170.3	393.55	342.52	245.00	357.83	341.46	419.96
HLC.190.1	415.01	397.08	226.00	438.99	458.17	572.44
HLC.190.2	403.49	285.6	132.00	388.89	402.98	551.76
HLC.190.3	414.42	364.07	178.00	436.02	421.59	552.75

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Glossary*; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Geneva, Switzerland, 2023; ISBN 9781009325844.
2. Narloch, P.; Piątkiewicz, W.; Pietruszka, B. The Effect of Cement Addition on Water Vapour Resistance Factor of Rammed Earth. *Materials* **2021**, *14*, 2249. [\[CrossRef\]](#)
3. European Parliament and Council of the European Union. *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 Establishing the Framework for Achieving Climate Neutrality and Amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*; European Parliament and Council of the European Union: Brussels, Belgium, 2021.
4. Skrzypczak, D.; Gorazda, K.; Mikula, K.; Mironiuk, M.; Kominko, H.; Sawka, K.; Evrard, D.; Trzaska, K.; Moustakas, K.; Chojnacka, K. Towards Carbon Neutrality: Enhancing CO₂ Sequestration by Plants to Reduce Carbon Footprint. *Sci. Total Environ.* **2025**, *966*, 178763. [\[CrossRef\]](#)
5. Bardouh, R.; Toussaint, E.; Amziane, S.; Marceau, S. Mechanical Behavior of Bio-Based Concrete under Various Loadings and Factors Affecting Its Mechanical Properties at the Composite Scale: A State-of-the-Art Review. *Clean. Eng. Technol.* **2024**, *23*, 100819. [\[CrossRef\]](#)
6. Asghari, N.; Memari, A.M. State of the Art Review of Attributes and Mechanical Properties of Hempcrete. *Biomass* **2024**, *4*, 65–91. [\[CrossRef\]](#)

<https://doi.org/10.3390/app16010306>

7. Jiang, Y.; Lawrence, M.; Ansell, M.P.; Hussain, A. Cell Wall Microstructure, Pore Size Distribution and Absolute Density of Hemp Shiv. *R. Soc. Open Sci.* **2018**, *5*, 171945. [CrossRef]
8. Benfratello, S.; Capitano, C.; Peri, G.; Rizzo, G.; Scaccianoce, G.; Sorrentino, G. Thermal and Structural Properties of a Hemp—Lime Biocomposite. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *48*, 745–754. [CrossRef]
9. Sinka, M.; Van Den Heede, P.; De Belie, N.; Bajare, D.; Sahmenko, G. Comparative Life Cycle Assessment of Magnesium Binders as an Alternative for Hemp Concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 288–299. [CrossRef]
10. Piatkiewicz, W.; Narloch, P.; Pietruszka, B. Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Arch. Civ. Eng.* **2020**, *LXVI*, 485–503. [CrossRef]
11. Sassoni, E.; Manzi, S.; Motori, A.; Montecchi, M.; Canti, M. Novel Sustainable Hemp-Based Composites for Application in the Building Industry: Physical, Thermal and Mechanical Characterization. *Energy Build.* **2014**, *77*, 219–226. [CrossRef]
12. Brzyski, P. *Hemp-Lime Composite as Wall Material Meeting the Requirements for Sustainable Development in Construction Industry*; Lublin University of Technology: Lublin, Poland, 2018.
13. EN 826:2013; Thermal Insulating Products for Building Applications—Determination of Compression Behaviour. ISO: Geneva, Switzerland, 2013.
14. Piatkiewicz, W.; Narloch, P.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp—Lime Composites. *Materials* **2025**, *18*, 3458. [CrossRef]
15. Colinart, T.; Glouannec, P.; Chauvelon, P. Influence of the Setting Process and the Formulation on the Drying of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *30*, 372–380. [CrossRef]
16. Niyigena, C.; Amziane, S.; Chateaufort, A. Multicriteria Analysis Demonstrating the Impact of Shiv on the Properties of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *160*, 211–222. [CrossRef]
17. Tronet, P.; Lecompte, T.; Picandet, V.; Baley, C. Study of Lime Hemp Concrete (LHC)—Mix Design, Casting Process and Mechanical Behaviour. *Cem. Concr. Compos.* **2016**, *67*, 60–72. [CrossRef]
18. Hausteiner, E. Thermal Insulation Properties of the Lime-Cement Composite with Hemp Shives. *Ecol. Eng.* **2018**, *19*, 72–78. [CrossRef]
19. Walker, R.; Pavia, S.; Mitchell, R. Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *61*, 340–348. [CrossRef]
20. Delannoy, G.; Marceau, S.; Glé, P.; Gourlay, E.; Guéguen-minerbe, M.; Diafi, D.; Nour, I.; Amziane, S. Influence of Binder on the Multiscale Properties of Hemp Concretes. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2018**, *23*, 609–625. [CrossRef]
21. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. The Effect of a Polyacrylic Acid Viscosity Modifying Agent on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp and Rapeseed Straw Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *235*, 117536. [CrossRef]
22. Arnaud, L.; Gourlay, E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*, 50–56. [CrossRef]
23. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of Constituents on the Properties of the Bio-Aggregate Composite Hemp-Lime. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 9–17. [CrossRef]
24. Dinh, T.M.; Magniont, C.; Coutand, M. Hemp Concrete Using Innovative Pozzolanic Binder. In Proceedings of the First International Conference on Bio-Based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 22–24 June 2015; RILEM Publications: Bagneux, France, 2015.
25. Sáez-Pérez, M.P.; Brümmer, M.; Durán-Suárez, J.A. A Review of the Factors Affecting the Properties and Performance of Hemp Aggregate Concretes. *J. Build. Eng.* **2020**, *31*, 101323. [CrossRef]
26. Walker, R.; Pavia, S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp—Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *64*, 270–276. [CrossRef]
27. Cigasova, J.; Stevulova, N.; Schwarzova, I.; Junak, J. Innovative Use of Biomass Based on Technical Hemp in Building Industry. *Chem. Eng. Trans.* **2014**, *37*, 685–690. [CrossRef]
28. Evrard, A.; Herde, A. De Dynamical Interactions between Heat and Mass Flows in Lime-Hemp Concrete. In *Research in Building Physics and Building Engineering*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006; pp. 69–76.
29. De Bruijn, P.; Jeppsson, K.-H.; Sandin, K.; Nilsson, C. Mechanical Properties, Water Sorption And Frost Resistance Of Lime-Hemp Cementitious Composites. *J. Chem. Inf. Model.* **2013**, *53*, 1689–1699.
30. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime. *Mater. Struct.* **2017**, *50*, 108. [CrossRef]
31. Sofiane, A.; Laurent, A. *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, 1st ed.; John Wiley & Sons, Incorporated: Hoboken, NJ, USA, 2013.
32. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. A Method for the Assessment of the Internal Structure of Bio-Aggregate Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *116*, 45–51. [CrossRef]
33. Elfordy, S.; Lucas, F.; Tancret, F. Mechanical and Thermal Properties of Lime and Hemp Concrete (“Hempcrete”) Manufactured by a Projection Process. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *22*, 2116–2123. [CrossRef]

34. Brzyski, P.; Gladecki, M.; Rumińska, M.; Pietrak, K.; Kubiś, M.; Lapka, P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials* **2020**, *13*, 5383. [CrossRef] [PubMed]
35. Amziane, S.; Collet, F. *Bio-Aggregates Based Building Materials*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2017; ISBN 9789402410303.
36. Brzyski, P.; Suchorab, Z. Capillary Uptake Monitoring in Lime-Hemp-Perlite Composite Using the Time Domain Reflectometry Sensing Technique for Moisture Detection in Building Composites. *Materials* **2020**, *13*, 1677. [CrossRef]
37. Page, J.; Sonebi, M.; Amziane, S. Design and Multi-Physical Properties of a New Hybrid Hemp-Flax Composite Material. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 502–512. [CrossRef]
38. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. Effect of Linseed Oil and Metakaolin on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp-Lime Concrete. *Acad. J. Civ. Eng.* **2017**, *35*, 124–132.
39. Nguyen, T.T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; Amziane, S.; Baley, C.; Thu, T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; et al. Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2011**, *14*, 545–560. [CrossRef]
40. EN 459-2:2010; Building Lime—Part 2: Test Methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2010.
41. EN 196-1:2005; Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength. CEN: Brussels, Belgium, 2005.
42. Kinnane, O.; Reilly, A.; Grimes, J.; Pavia, S.; Walker, R. Acoustic Absorption of Hemp-Lime Construction. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 674–682. [CrossRef]
43. Collet, F.; Pretot, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 612–619. [CrossRef]
44. Dhakal, U.; Berardi, U.; Gorgolewski, M.; Richman, R. Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings. *J. Clean. Prod.* **2017**, *142*, 3655–3664. [CrossRef]
45. Golebiewski, M.; Narloch, P.; Piatkiewicz, W.; Wasilewski, I. Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Mater. Bud.* **2023**, *2023*, 2–8. [CrossRef]
46. Abdellatif, Y.; Kavgić, M. Thermal, Microstructural and Numerical Analysis of Hempcrete-Microencapsulated Phase Change Material Composites. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *178*, 115520. [CrossRef]
47. Zerrouki, R.; Benazzouk, A.; Courty, M.; Ben Hamed, H. Potential Use of Metakaolin as a Partial Replacement of Preformulated Lime Binder to Improve Durability of Hemp Concrete under Cyclic Wetting/Drying Aging. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *333*, 127389. [CrossRef]
48. Ip, K.; Miller, A. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Hemp-Lime Wall Constructions in the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *69*, 1–9. [CrossRef]
49. Ruggieri, G.; Arrigoni, A.; Pelosato, R.; Meli, P.; Sabbadini, S.; Dotelli, G. Life Cycle Assessment of Natural Building Materials: The Role of Carbonation, Mixture Components and Transport in the Environmental Impacts of Hempcrete Blocks. *J. Clean. Prod.* **2017**, *149*, 1051–1061. [CrossRef]
50. Sokolowska, J.J. Utilizing Sakurajima Volcanic Ash as a Sustainable Partial Replacement for Portland Cement in Cementitious Mortars. *Sustainability* **2025**, *17*, 7576. [CrossRef]
51. Rojas, M.F.; Sánchez de Rojas, M.I. The Effect of High Curing Temperature on the Reaction Kinetics in MK/Lime and MK-Blended Cement Matrices at 60 °C. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *33*, 643–649. [CrossRef]
52. De Bruijn, P.B.; Jeppsson, K.H.; Sandin, K.; Nilsson, C. Mechanical Properties of Lime-Hemp Concrete Containing Shives and Fibres. *Biosyst. Eng.* **2009**, *103*, 474–479. [CrossRef]
53. Narloch, P.; Piatkiewicz, W.; Anysz, H.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Digital Image-Based Characterization of Particle Size and Shape Distribution in Industrial Hemp Shives. 2025. Available online: <https://zenodo.org/records/15664512> (accessed on 25 December 2025).
54. Hirst, E. *Characterisation of Hemp-Lime as a Composite Building Material*; University of Bath: Bath, UK, 2013.
55. Amziane, S.; Arnaud, L. 4. Formulation and Implementation. In *Bio-Aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2013.
56. EN 408:2010+A1:2012; Timber Structures-Structural Timber and Glued Laminated Timber-Determination of Some Physical and Mechanical Properties. Swedish standard: Stockholm, Sweden, 2012.
57. Golebiewski, M.; Pietruszka, B.; Piatkiewicz, W.; Kubiś, M.; Oleksienko, O. Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. *Materials* **2025**, *18*, 4958. [CrossRef] [PubMed]

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.

10.8. Publikacja [7]



Article

Effect of Technological Variables on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Hemp–Lime Composites

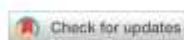
Wojciech Piątkiewicz

Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland; wojciech.piatkiewicz.dokt@pw.edu.pl

Abstract

Hemp–lime composites are bio-based building materials with carbon sequestration potential, yet their properties exhibit significant variability depending on manufacturing variables, and standardized production guidelines remain lacking. This study investigates the influence of water-to-binder ratio ($W/B = 1.75, 1.95, 2.15$) and compaction degree ($CD = 150\%, 170\%, 190\%$) on the thermal conductivity and compressive strength of hemp–lime composites using a full 3×3 factorial design at a binder-to-shiv ratio of $B/S = 1:1$. Results were synthesized with previously published investigations from a systematic research programme, enabling a comparative assessment of four technological variables across an extended dataset spanning densities from 227 to 518 kg/m^3 . The binder-to-shiv ratio was identified as the dominant factor governing both properties, primarily through its effect on bulk density and the mechanical character of the composite. Compaction degree was the most effective parameter for adjusting properties within a fixed mix design, with the strongest gains observed at the transition from $CD = 150\%$ to $CD = 170\%$. The water-to-binder ratio exerted only marginal influence on bulk density and thermal conductivity, while its effect on compressive strength remained inconclusive at $B/S = 1:1$. Hemp shive particle size had a limited effect on thermal conductivity and no detectable influence on compressive strength. Both properties exhibited strong positive linear relationships with bulk density across the extended dataset. The findings support the standardization of hemp–lime composite production and the development of practical design guidelines.

Keywords: hemp–lime composite; thermal conductivity; compressive strength; water-to-binder ratio; bulk density; bio-based building material; sustainable construction



Academic Editors: Angelo Luongo and F. Pacheco-Torgal

Received: 16 April 2026

Revised: 21 May 2026

Accepted: 26 May 2026

Published: 29 May 2026

Copyright: © 2026 by the author. 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.

1. Introduction

The construction sector remains the most emissions-intensive sector of the global economy, accounting for 37% of global greenhouse gas emissions [1]. Concurrently, the 2023 United Nations Environment Programme (UNEP) report indicates that the global building floor area is projected to double by 2060 [1]. As the operational energy efficiency of new buildings improves, the need to address embodied carbon associated with material production and construction processes becomes increasingly urgent. These challenges are reflected in emerging regulatory frameworks worldwide, including the European EPBD IV directive and similar requirements in Canada, the United States, and China [2–6], which mandate whole-life carbon assessment of buildings. In response to these regulatory requirements, the International Energy Agency (IEA) and numerous research institutions emphasize the necessity of broader adoption of bio-based materials as a key strategy for reducing the whole-life carbon footprint of buildings [7]. These materials, through

biological carbon sequestration during plant growth, offer the potential to achieve negative carbon balance [8].

Among bio-based building materials, hemp–lime composites (HLC)—consisting of hemp shive aggregate bound with a lime-based binder—have attracted increasing research attention due to their low thermal conductivity, vapour permeability, and capacity for carbon sequestration during both plant growth and binder carbonation. Reviews of the material confirm its potential as a sustainable building component [9,10], while experimental studies demonstrate that HLC walls offer significantly longer thermal phase shift compared to mineral wool assemblies, indicating better attenuation of outdoor temperature fluctuations and improved indoor thermal comfort [11]. Despite growing popularity, HLC properties exhibit significant scatter in values depending on composition and technological manufacturing parameters. The literature reports wide ranges: compressive strength from 0.1 to 1.2 MPa [12,13], with an extreme case of 5.75 MPa using magnesium-based binder [14], and thermal conductivity 0.06–0.13 W/(m·K) [15–18]. Properties are influenced by: binder type [19–21], and most prominently by the binder-to-shiv ratio (B/S), which governs composite density and determines the trade-off between mechanical and thermal performance. Increasing B/S raises compressive strength and thermal conductivity while reducing vapour permeability, with reported B/S values ranging from 0.69 to 4.82 across the literature [15,22–27]. This relationship is not strictly linear. Studies show that the effect of increasing B/S on thermal conductivity is more pronounced at higher ratios [28], suggesting a threshold behaviour in binder-aggregate interaction. Further variables influencing composite properties include curing conditions [27], aggregate particle size [29], composite age [26,27], compaction degree [30,31], and even forming direction [30]. An additional source of value scatter is the diversity of methods for determining compressive strength: Ref. [31] identified 6 distinct strength criteria, with methodological details such as specimen size or loading rate differing even within a single criterion. Significant scatter also characterizes the global warming potential (GWP), which can range from -9.696 to $+10.165$ kg CO₂eq/m² [32], depending not only on HLC composition and manufacturing technology, but also on constituent origin [33]. In the context of increasing regulatory requirements for whole-life GWP calculation in buildings, this scatter, encompassing both negative and positive carbon balances, becomes a critical issue requiring standardization of manufacturing processes.

The choice of B/S ratio therefore involves a fundamental trade-off: beyond its effect on thermal and mechanical properties, increasing B/S ratio simultaneously raises embodied emissions and eliminates CO₂ sequestration potential [33,34], constituting a critical design trade-off between mechanical performance and environmental impact. Within a fixed mix design, material compaction degree (CD) during forming provides an additional means of controlling properties through porosity changes [31], yet is rarely quantified in the literature. Descriptions of the forming process are typically qualitative and non-reproducible, ranging from “slight compaction” to “tamped to avoid large air voids” [35,36], making cross-study comparison of results unreliable. Compaction efficiency is in turn governed by mixture workability, which depends on both B/S and the water-to-binder ratio (W/B). Water plays a dual role in the composite: insufficient water impairs binder hydration and reduces mechanical strength, while excess water causes binder segregation, increases density and thermal conductivity, and prolongs drying time [37–39]. Despite this critical influence, clear compositional guidelines for water content are lacking. In practice, the required amount of water is most commonly determined by experience or qualitative consistency assessments such as the “damp muesli” criterion [40], which are inherently subjective and difficult to reproduce between research groups. The aggregate itself also plays a role: hemp shive particle size influences both mechanical and thermal properties, although reported

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

effects vary considerably across studies. Differences in thermal conductivity attributable to particle size range from as little as ~6% to as much as ~34% [29,41]. This variability likely reflects the confounding influence of density, which is itself affected by particle size through changes in packing efficiency, as finer fractions produce denser composites with higher thermal conductivity. However, this effect is difficult to isolate from direct particle geometry effects when density is not controlled between compared mixtures. Additionally, particle chemical composition varies depending on country of origin and production method [42], further complicating cross-study comparison. Alongside these manufacturing variables, long-term durability represents a further critical consideration: cyclic exposure to water and temperature causes microstructural degradation [43], emphasizing the importance of proper structure formation during production.

In response to the identified challenges, a systematic research programme was undertaken to develop objective methodologies and determine the influence of technological variables (Figure 1). The starting point was exploratory research [25] demonstrating significant influence of B/S ratio and revealing methodological difficulties and an underappreciated variable—water content. The program encompassed development of: (1) image analysis method for hemp shive particle characterization (ImageJ), enabling more objective determination of particle length distribution than traditional sieve analysis—the influence of three fractions on thermal conductivity was examined, demonstrating a relatively marginal effect (~6%) [17]; (2) Compaction Degree (CD) method, defining compaction as the ratio of compacted material density to loose-fill density, eliminating the subjectivity of qualitative descriptions—the influence of three compaction levels (CD = 150%, 170%, 190%) was examined, demonstrating significant influence on strength [31]; and (3) a criterion for determining compressive strength based on 1% permanent deformation (EN 408 standard), which proved most universally applicable [31]. Parallel investigations [34] encompassing three different B/S ratios for wall, roof, and floor applications provided broader property context.

Despite described progress, a fundamental knowledge gap remains: no study to date has systematically investigated all four technological variables within a unified experimental framework, nor assessed their relative importance and mutual interactions. Previous investigations, including those conducted within the present programme, followed a one-variable-at-a-time approach, which precludes direct comparison of variable influence across different mix proportions and excludes interaction effects by design. Specifically, the influence of W/B ratio on composite properties has not been systematically investigated, as in previous studies [17,31] the W/B ratio was held constant; direct comparison of the influence of individual variables at different B/S ratios is lacking; and the CD method requires verification under conditions of varying mixture consistency, as water content may affect the reference loose-fill measurement.

This work aims to address these gaps through:

1. Systematic investigation of W/B influence on thermal conductivity and compressive strength using a 3×3 factorial design (W/B = 1.75, 1.95, 2.15 $\times$ CD = 150%, 170%, 190%), enabling identification of interactions between variables;
2. Synthesis of results with previous investigations [17,31] to provide a comparative assessment of the influence of four technological variables (B/S, W/B, particle size, CD) on thermal and mechanical properties;
3. Critical evaluation of the CD method and proposal for refinement. Investigations were conducted at B/S = 1:1 (density ~300 kg/m³), complementing previous studies at B/S = 2:1 and 3:1 [17,31] and the range B/S = 1:1, 1.8:1, and 2.25:1 [34].

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

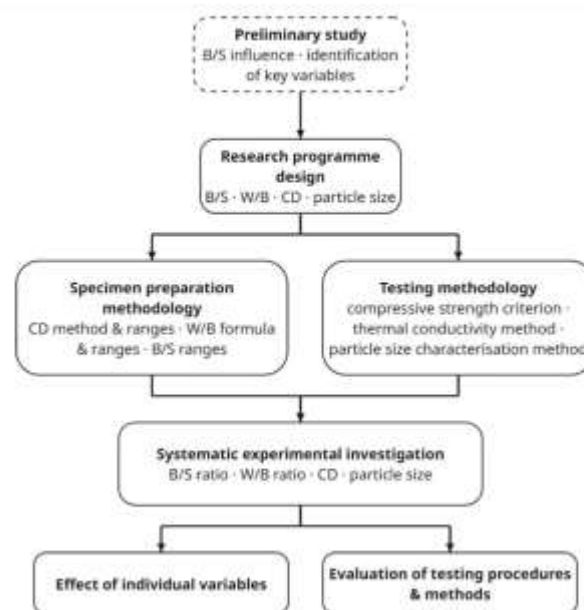


Figure 1. Schematic diagram of the systematic research programme showing the two-stage methodology development (specimen preparation and testing protocols) followed by investigation of four technological variables.

The combination of factorial design with synthesis of the entire research programme results represents, to the authors' knowledge, the first systematic comparative assessment of all four key technological variables—B/S ratio, W/B ratio, compaction degree, and hemp shive particle size—within a single unified framework, enabling a qualitative ranking of their relative influence and identification of interaction effects between W/B ratio and compaction degree.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Hemp Shives

Hemp shives derived from the Futura 75 variety were produced in Poland by Podlaskie Konopie (Dobrzyniówka, Poland). The hemp harvest took place in 2023, followed by natural retting during the decortication process. The supplied hemp shives were sieved to obtain three distinct particle size fractions. This process yielded three particle size groups: fine (F), medium (M), and coarse (C). The sieve sizes of 2 mm and 4 mm were selected based on preliminary observations of the particle size distribution of the supplied hemp shives. Sieves with apertures larger than 4 mm retained only a negligible proportion of material, while sieves finer than 2 mm allowed the passage of fine dust and fine residual fibres. The selected size range therefore captures the most representative and practically relevant portion of the supplied hemp shive material, while simultaneously enabling effective dust removal. Material retained on the 4 mm sieve constituted fraction C, material passing through 4 mm and retained on 2 mm constituted fraction F, while fraction M was obtained by blending F and C in equal proportions by mass (50/50 wt.%). The current study utilized fraction C.

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

The same batch of hemp shives was used throughout the research programme, with different particle fractions employed in individual studies: publication [31] utilized fraction F, while [17] examined all three fractions (F, M, C). Relying on the same batch of hemp shives produced in the same season using the same decortication method (natural retting) ensures consistency of chemical properties across the entire research program. It has been demonstrated that region and harvest timing, and particularly the retting method of industrial hemp, affect not only the chemical composition of the raw material but also the properties of the finished HLC [42,44]. Chemical components present in hemp, such as pectins, lipids, hydrocarbons, and proteins, influence the binding of mineral binder [44]. Studies [34] showed that hemp shive from France, where chemical decortication is commonly employed, exhibited relatively low specific heat compared to natural field retting, which may result from a kind of “sterilization” of plant particles from microorganisms naturally present during traditional retting. This single-batch approach eliminates inter-batch variability as a confounding factor, ensuring that observed differences in composite properties across studies can be attributed to the investigated technological variables rather than to raw material inconsistency.

2.1.2. Binder Characteristics

The mineral binder consisted of three components in the following mass proportions: 75% hydrated lime CL 90-S (ALPOL Gips, Trzebinia, Poland), 15% Portland cement CEM I 42.5R (Holcim S.A., Malogoszcz, Poland), and 10% metakaolin type L05 (Mikrosilika Trade, Warsaw, Poland).

Hydrated lime is the most commonly used binder in HLC due to its availability and compatibility with the material’s vapour permeability and the shives’ water absorption capacity. Calcium hydroxide, the main component of hydrated lime, exhibits high porosity supporting water absorption and thermal insulation properties [27,35]. In addition, it creates a highly alkaline environment ($\text{pH} \approx 12$), which protects hemp shives from biological corrosion and mould growth while improving the composite’s fire resistance [45]. Due to the slow setting process of lime binder, additives supporting early strength development were incorporated, primarily needed for technological reasons. Portland cement CEM I 42.5R was used for this purpose. Additionally, to reduce the carbon footprint of the binder, metakaolin type L05 was employed, a natural pozzolan that improves durability through reaction with calcium hydroxide [46]. A detailed description of the binder’s chemical composition and the chemical reactions occurring within it is presented in publication [31].

2.1.3. Water

Tap water (Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland) at a temperature of approximately 20 °C was used for mixture preparation.

2.2. Methods

This study employs standardized protocols developed within a systematic research programme on hemp–lime composites. Three key methodologies were applied:

1. Image analysis for particle characterization,
2. The Compaction Degree (CD) method for compaction level quantification,
3. The Proposed Method based on the permanent deformation criterion for compressive strength determination.

Consistent application of these protocols across all investigations (particle size [17], compaction [31], and water content—current study) ensures valid synthesis of results despite different mixture proportions (B/S ratio). Furthermore, all three studies employed

identical specimen curing conditions, ages, production methods, and thermal conductivity measurement procedures, and utilized materials from the same suppliers.

2.2.1. Particle Characterization

Geometric characterization of hemp shives was performed according to the image analysis methodology described in detail in [17], using ImageJ software version 1.54 g (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA). In brief, scanned images of 3 g samples were processed to binary contrast and analyzed to determine particle area, perimeter, Feret diameter, and minimum Feret diameter, from which equivalent diameter, circularity, and elongation were derived. A sample size of 15 g was established in [17] as sufficient for representative characterization of particle size distribution.

These parameters were selected because shape descriptors such as elongation and circularity provide information beyond what sieve analysis can offer. Since ImageJ measures the projected area of the largest particle face, elongated or irregular particles have a greater actual surface area relative to their projected area—a distinction relevant to binder demand, as more surface area requires more binder paste for adequate coating. Furthermore, shape parameters are expected to influence mix workability, particle packing efficiency, and resistance to compaction, though a systematic investigation of these relationships falls outside the scope of the present study and is identified as a direction for further research. Geometric characteristics of fraction C are presented in Figure 2 and Table 1 based on detailed characterization published in [47].

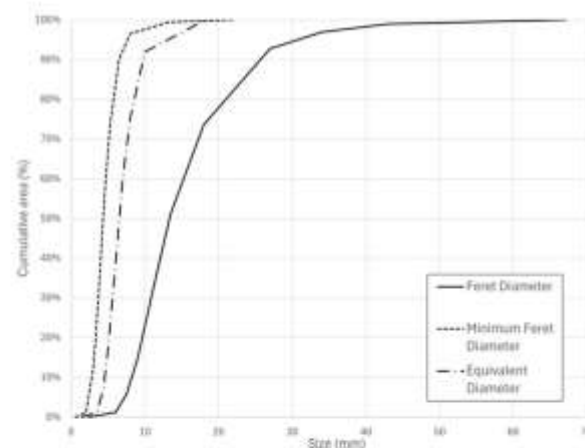


Figure 2. Particle size distribution of hemp shives (fraction C).

Table 1. Mean characteristics of hemp shives (fraction C).

Bulk Density (kg/m ³)	Particle Feret (mm)	Minimum Feret (mm)	Equivalent Diameter (ED) (mm)	Area (mm ²)	Circularity (-)	Elongation (-)
97.5	12.34	4.01	5.79	36.49	0.45	3.33

2.2.2. Compaction Level Quantification

The method for determining the Compaction Degree (CD) involves relating the density of compacted material to the density of loose fill according to the formula (1):

$$CD [\%] = (\rho_C / \rho_L) \cdot 100 \quad (1)$$

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

where

ρ_C —bulk density of specimen after compaction [kg/m^3]

ρ_L —bulk density of specimen in loose state [kg/m^3]

To determine ρ_L , fresh mix was freely poured into a $30 \times 30 \times 8$ cm mould without any compaction, then weighed (Figure 3). Based on the calculated CD value and target mould volume, the mass of mixture needed to fill the mould at the assumed compaction degree was determined. This measured mass of material was divided into an appropriate number of layers: four layers for $30 \times 30 \times 8$ cm moulds and two layers for $15 \times 15 \times 15$ cm moulds. Each layer was tamped with a wooden tamper ensuring uniform compaction across the entire specimen surface. Three compaction levels were applied in the research programme. The lower bound (CD = 150%) was established empirically as the minimum compaction level at which specimens maintained sufficient green cohesion upon demoulding after 24 h—that is, the specimens could be handled and transferred to the curing chamber without loss of structural integrity. Below this threshold, the low binder content (B/S = 1:1) combined with insufficient compaction resulted in specimens that could not sustain their own weight after demoulding. The upper bound (CD = 190%) corresponds to the practical limit of manual compaction: above this level, the elastic springback of hemp shives prevented further densification, as the material partially recovered its volume between successive tamping events, making higher compaction degrees unachievable without mechanical assistance. The intermediate level (CD = 170%) was selected as the midpoint between these two bounds, enabling assessment of the non-linearity of the compaction effect.



Figure 3. Key stages of specimen preparation and testing: (a) empty reference mould; (b) loose-fill material for ρ_L determination; (c) compacted specimen showing layered structure (dye visualization); and (d) thermal conductivity testing in FOX 314 apparatus.

It should be noted that the loose-fill density, used as the reference value in the CD method, is sensitive to mixture workability. Consequently, variables that affect workability,

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

such as water content and aggregate particle size, may indirectly influence the CD measurement. A detailed analysis of this phenomenon and its impact on results is presented in Section 4.3.

2.2.3. Compressive Strength Criterion

Various testing criteria can be applied to determine the compressive strength of HLC. Publication [31] compared methods existing in the literature and proposed a new approach (Proposed Method). The specific deformation character of HLC under loading means that some traditional methods have limited applicability. The maximum stress-based method is applicable only to certain mixtures, while methods based on loss of linearity in the stress–strain curve are sensitive to researcher interpretation. Methods utilizing 5–10% total strain better describe serviceability state than actual material strength and omit the elastic strain component, whereby the same strain value may indicate different degrees of material damage depending on the elastic modulus. For these reasons, within the research programme, the Proposed Method was selected and applied in all conducted investigations, including the present work. This method involves determining composite strength as the stress corresponding to 1% permanent deformation in the material, adapted from standard [48] for structural timber testing. The method is described and illustrated in detail in [31]. This approach better corresponds to the specific deformation behaviour of hemp–lime composite under compressive loading. Moreover, in cases where the material works in conjunction with timber structures—which frequently occurs in building practice—it constitutes the most appropriate solution among analyzed methods. It should be noted, however, that the applicability of the Proposed Method depends on the presence of a clearly defined inflection point in the stress–strain curve. At low binder content ($B/S = 1:1$), this condition may not be met across all compaction levels, which limits the method's reliability for such mix designs. This limitation is discussed in detail in Section 4.1.

2.3. Experimental Design

To evaluate the influence of water content and compaction level on material properties, a full 3×3 factorial design was employed to examine the effects of both variables and their potential interaction. The water-to-binder ratio was varied across three levels. To identify the optimal W/B for the binder composition employed, water demand data reported in the literature for hemp–lime composites with comparable binder compositions were collected and a best-fit curve was applied to the dataset, yielding the empirical formula (2):

$$W_B = 1.95 \cdot B_S^{-0.51} \quad (2)$$

where

W_B is the water-to-binder ratio (W/B);

B_S is the binder-to-shiv ratio (B/S).

The formula describes the relationship between mix proportions and optimal water demand across a range of B/S ratios reported in the literature [15,27,35]. For the tested mixture ($B/S = 1:1$), the formula yields $W/B = 1.95$, which was adopted as the reference (optimal) level. To examine the effects of water deficiency and excess relative to this optimum, the W/B ratio was decreased and increased by 0.2, yielding three levels: $W/B = 1.75$, 1.95, and 2.15. This step size was selected to produce a meaningful variation in mix workability while remaining within the range of practically achievable water contents for the tested binder and shiv combination. The compaction degree was varied across three levels ($CD = 150\%$, 170% , 190%) established within the CD methodology developed in

the research programme. The combination of these variables created nine experimental conditions (Table 2), enabling evaluation of:

1. The main effect of water-to-binder ratio at constant compaction;
2. The main effect of compaction degree at constant water content;
3. Interaction effects between W/B and CD.

Table 2. Sample designations for hemp–lime composites based on compaction degree and water-to-binder ratio.

Compaction Degree	Water-to-Binder Ratio		
	1.75	1.95	2.15
CD = 150%	HLCL150	HLCM150	HLCH150
CD = 170%	HLCL170	HLCM170	HLCH170
CD = 190%	HLCL190	HLCM190	HLCH190

To enable comprehensive synthesis across the research programme, complementary measurements were conducted: thermal conductivity on specimens from [31] and compressive strength on specimens from [17], following identical protocols (Sections 2.2.2 and 2.2.3). Table 3 provides an overview of all series included in the programme, their mix design parameters, and the properties measured in each case. Series for which complementary measurements were added in the present work are indicated separately. These additional data, combined with the factorial design results, enabled comparative analysis of all four technological variables (B/S, W/B, CD, and particle size).

Table 3. Overview of all series in the research programme. B/S = binder-to-shiv ratio (by mass); W/B = water-to-binder (L-low, O-optimal, H-high); CD = compaction degree (%); Hemp Shive Group (F-fine, C-coarse, M-medium) according to [17]; • = measured in source publication; ○ = not measured; † = complementary measurement added in the present work.

Series ID	B/S	W/B	CD	Hemp Shive Group	Thermal Conductivity	Compressive Strength	Source
HLCL150	1	L	150%	C	•	•	This study
HLCM150	1	O	150%	C	•	○	This study
HLCH150	1	H	150%	C	•	•	This study
HLCL170	1	L	170%	C	•	•	This study
HLCM170	1	O	170%	C	•	○	This study
HLCH170	1	H	170%	C	•	•	This study
HLCL190	1	L	190%	C	•	•	This study
HLCM190	1	O	190%	C	•	•	This study
HLCH190	1	H	190%	C	•	•	This study
HLC.150	2	L	150%	F	○	•	[31]
HLC.170	2	L	170%	F	○†	•	[31]
HLC.190	2	L	190%	F	○	•	[31]
HL1.C	2	O	150%	C	•	○	[17]
HL1.F	2	O	150%	F	•	○	[17]
HL1.M	2	O	150%	M	•	○†	[17]
HL2.C	2	H	150%	C	•	○	[17]
HL2.F	2	H	150%	F	•	○	[17]
HL2.M	2	H	150%	M	•	○	[17]
HL3.C	3	H	150%	C	•	○†	[17]
HL3.F	3	H	150%	F	•	○†	[17]
HL3.M	3	H	150%	M	•	○†	[17]

2.3.1. Specimen Preparation

The specimen preparation procedure followed the established protocol from previous programme studies [17,31], ensuring methodological consistency. All components were weighed according to mixture proportions (Section 2.1). Dry binder constituents (hydrated lime CL 90-S, Portland cement CEM I 42.5R, metakaolin) were combined with water and mixed for 2–3 min in a planetary mixer to form homogeneous paste. Hemp shives were subsequently added gradually in portions to ensure uniform particle coating and prevent agglomeration. Total mixing time was 6–8 min.

Mixture workability varied significantly with water content. At low water level ($W/B = 1.75$), the mixture exhibited increased resistance to mixing: shives wedged more strongly and displayed reduced mutual slip, impeding material flow through mixer blades and requiring careful handling to prevent spillage. Conversely, at high water content ($W/B = 2.15$), shives were thoroughly moistened; however, the relatively low binder content ($B/S = 1$) prevented paste runoff, with binder remaining adequately adhered to shiv surfaces. Specimens were formed in two geometries following the methodology established in [17]: $300 \times 80 \times 300$ mm slabs for thermal conductivity measurements and $150 \times 150 \times 150$ mm cubes for compressive strength testing. During preparation of thermal conductivity specimens, the number of tamping strokes required to achieve target compaction levels was recorded as an indicator of mixture workability (Table 4). The results showed that compaction degree had a dominant effect on the number of strokes required: at $CD = 150\%$, an average of 4–6 strokes per layer were sufficient regardless of water content, while at $CD = 170\%$, this number increased markedly to 10–22 strokes. No clear monotonic relationship between W/B ratio and the number of strokes was observed, suggesting that workability is governed primarily by the target compaction level rather than water content alone. Each stroke delivered approximately 49 J of compaction energy (10 kg hammer released from 0.5 m height). It was also noted that the number of strokes required increased slightly with each successive layer during casting, which may indicate elastic springback behaviour of the hemp shive (see Section 2.2.2), as the progressively compacted mass beneath each new layer offered increasing resistance, suggesting the material partially recovers its volume after each tamping event. All specimens were demolded after 24 h and cured following the protocol established in [17,31] until testing at 28 days.

Table 4. Mean number of tamping strokes per layer required to achieve target compaction levels.

Compaction Degree	CD = 150%	CD = 170%	CD = 190%
Mean tamping strokes per layer	4–6	10–22	n.d. *

* n.d.—not determined; at $CD = 190\%$, the self-weight of the tamping rod was insufficient to achieve the target compaction level and additional manual force was applied by the operator.

2.3.2. Testing Methods

Thermal conductivity was determined following EN 12667 standard [49] using a FOX 314 heat flow meter (TA Instruments, New Castle, DE, USA) with a 10×10 cm measurement area, as described in [17]. Specimens were positioned between temperature-controlled plates maintaining a 20 K differential at mean temperature of 20 °C. Heat flow direction was oriented perpendicular to the specimen compaction axis, simulating actual conditions in formwork-constructed walls.

Compressive strength was evaluated on 28-day specimens using an Instron 3382 universal testing machine (100 kN capacity) at 5 mm/min crosshead displacement rate, with loading direction parallel to the moulding axis. Testing continued until reaching 13.3% strain or pronounced stress reduction. The compressive strength determination method is described in detail in Section 2.2.3, while the complete testing procedure is provided in [31].

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

3. Results

3.1. Samples Density

The results demonstrate a clear increase in bulk density with both CD and W/B (Figure 4). This is consistent with the expected effects of increased material densification and improved mix workability at higher W/B. Mean bulk density across all series ranged from 233.2 to 296.3 kg/m³, reflecting the combined influence of both variables within the investigated ranges. The effect of compaction on density is more pronounced than that of water content. Density increased by an average of 9.4% between CD = 150% and CD = 170%, and by 12.4% between CD = 170% and CD = 190%, indicating a non-linear response.

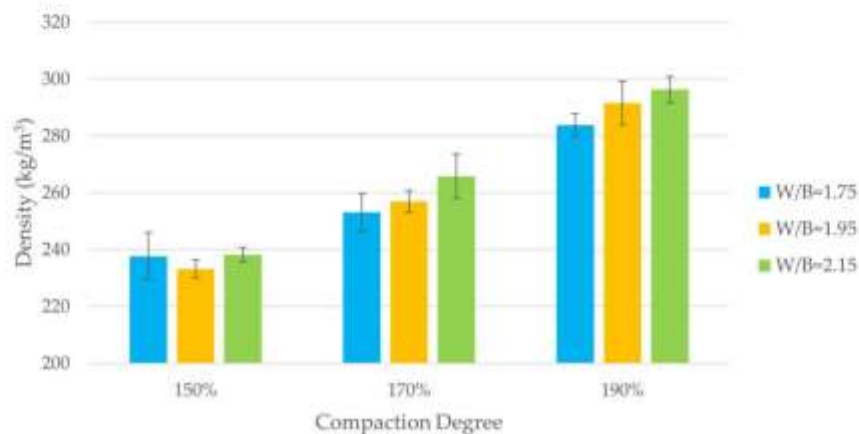


Figure 4. Mean density for each series grouped by compaction degree.

The influence of W/B on bulk density is visible but secondary. At CD = 150%, the difference in density between the lowest (W/B = 1.75) and highest (W/B = 2.15) water content is negligible, amounting to only 0.3%. At CD = 170% and CD = 190%, the effect becomes more apparent, with density increases of 5.0% and 4.4% respectively between the extreme W/B levels. The W/B effect on density was thus compaction-level dependent.

It should be noted that series HLCM150 deviates from the general trend, exhibiting a lower mean density than both HLCL150 and HLCH150. This anomaly occurs exclusively at the lowest compaction level (CD = 150%), where the effect of water content on density is minimal. At higher compaction degrees, density increases monotonically with W/B ratio.

The effect of W/B on density was also reflected in the loose bulk density of the fresh mix prior to compaction. An increase in W/B ratio resulted in a higher loose bulk density (Table 5), though this relationship was not strictly monotonic: series HLCM150 exhibited a higher value than HLCH150.

Table 5. Loose bulk density (kg/m³) of fresh hemp–lime composite mixes prior to compaction.

W/B Ratio	1.75 (Low)	1.95 (Optimal)	2.15 (High)
Loose bulk density (kg/m ³)	264.4–273.1	290.4–293.8	287.0–313.9

3.2. Thermal Conductivity

The thermal conductivity (λ) of the tested specimens ranged from 0.0840 to 0.0991 W/(m·K). Mean values for each series are presented in Table 6; results for individual specimens are shown in Figure 5. A clear positive relationship between volumetric density and thermal conductivity

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

was observed across all series, consistent with the linear trend fitted to the data (Figure 5, $R^2 = 0.8383$).

Table 6. Mean values of density and thermal conductivity (λ) for all experimental series. W/B = water-to-binder ratio; CD = compaction degree; SD = standard deviation.

Series	W/B	CD	Density (kg/m^3)		λ ($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$)	
			Mean	SD	Mean	SD
HLCL150	1.75	150%	237.6	8.4	0.08873	0.00116
HLCL150	1.95	150%	233.2	3.3	0.08526	0.00116
HLCH150	2.15	150%	238.2	2.5	0.08906	0.00018
HLCL170	1.75	170%	253.1	6.5	0.08879	0.00163
HLCL170	1.95	170%	256.9	3.8	0.08974	0.00198
HLCH170	2.15	170%	265.7	7.9	0.09212	0.00151
HLCL190	1.75	190%	283.8	4.0	0.09328	0.00100
HLCL190	1.95	190%	291.6	7.7	0.09335	0.00059
HLCH190	2.15	190%	296.3	4.6	0.09704	0.00175

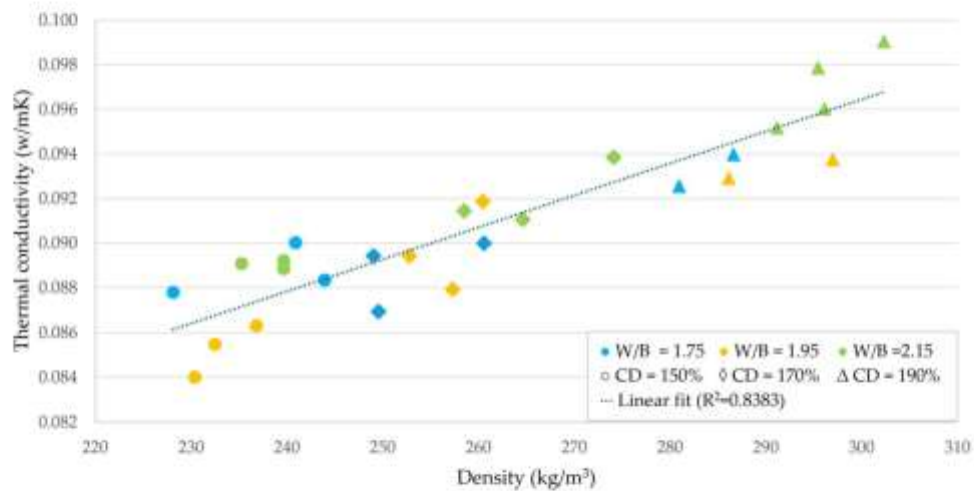


Figure 5. Relationship between thermal conductivity and density for all tested specimens.

Regarding the effect of compaction degree, the total increase in λ from CD = 150% to CD = 190% ranged from 5.1% to 9.5% depending on the W/B group. The distribution of this increase across compaction levels differed between series: for W/B = 1.75, nearly the entire increase occurred between CD = 170% and CD = 190%, with virtually no change between CD = 150% and CD = 170%. For W/B = 2.15 and W/B = 1.95, the increase was more evenly distributed across both steps (Table 6).

Regarding the effect of W/B, no consistent monotonic trend was observed (Figure 6). At CD = 170% and CD = 190%, mean λ increased monotonically with W/B ratio, with total increases of +3.8% and +4.0% respectively from W/B = 1.75 to W/B = 2.15. At CD = 150%, the net difference across the full W/B range was negligible (+0.4%). The anomalously low λ of the HLCL150 series at this compaction level coincided with its anomalously low mean density (see Section 3.1 and Table 6).

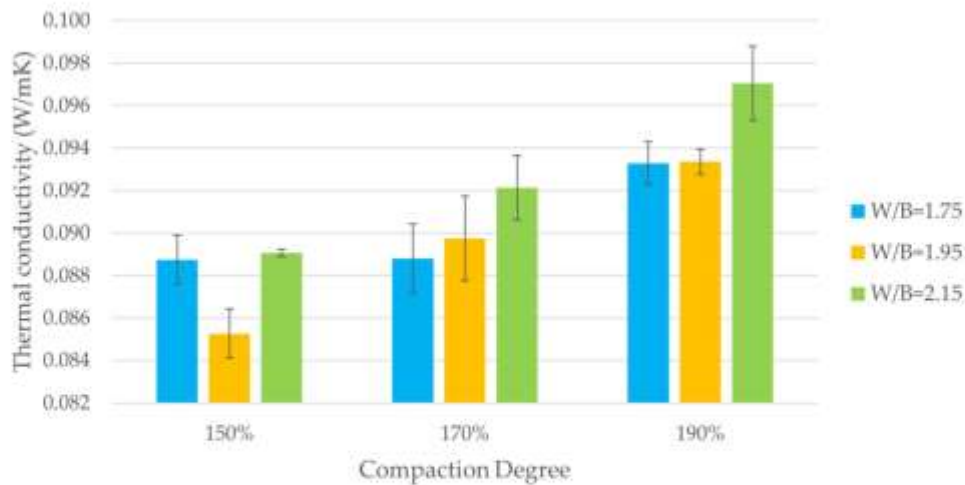


Figure 6. Mean thermal conductivity for each series grouped by compaction degree.

It should be noted that series HLCL190 and HLCM190 were tested on $n = 2$ specimens each (compared to $n = 3$ or $n = 4$ for the remaining series), which limits the reliability of the standard deviation estimates for those series.

3.3. Compressive Strength

Compressive strength was determined using the Proposed Method (described in Section 2.2.3). While this method proved applicable across the majority of tested series, its application was limited in specific cases where the stress–strain curve did not exhibit a sufficiently pronounced change in slope—the inclination changed minimally throughout the test, causing the offset line to intersect the curve at a strain far beyond the typical range, or not at all within the measured deformation. This behaviour was observed across all compaction levels examined. Strength values at 5% strain (Method 3 of [28]) are reported alongside the Proposed Method results for the affected series as a supplementary reference (Figure 7).

Series HLCM150 ($W/B = 1.95$, $CD = 150\%$) and HLCM170 ($W/B = 1.95$, $CD = 170\%$) were excluded from the compressive strength analysis. In both cases, the specimens exhibited anomalously low compressive strength compared to all other series at the same compaction level. Strength values were 3–4 times lower than those of series produced at the same compaction degree with different W/B ratios. This magnitude of difference falls outside the range attributable to W/B variation alone. Notably, the series produced at the same W/B but higher compaction (HLCM190, $CD = 190\%$) yielded strength values consistent with the general trend. This suggests that the combination of low binder content ($B/S = 1:1$), intermediate water content, and insufficient compaction resulted in an inadequately bonded composite matrix. This observation is also relevant in the context of the broader literature: studies reporting compressive strength at comparable B/S ratios typically employed mechanical rather than manual compaction [26,27]. This likely produced higher compaction levels and correspondingly higher strength values than those achievable by hand. This further illustrates the importance of reporting compaction level when comparing results across studies. The precise mechanism responsible for this anomalous behaviour remains to be systematically investigated and is identified as a direction for further research. Of particular interest is the interaction between water content, compaction

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

level, and binder matrix formation at low B/S ratios. The results of these two series are therefore not considered representative of the tested mix design and were not included in the interpretation. The influence of binder content and compaction on composite matrix formation is discussed further in Sections 4.1 and 4.2.

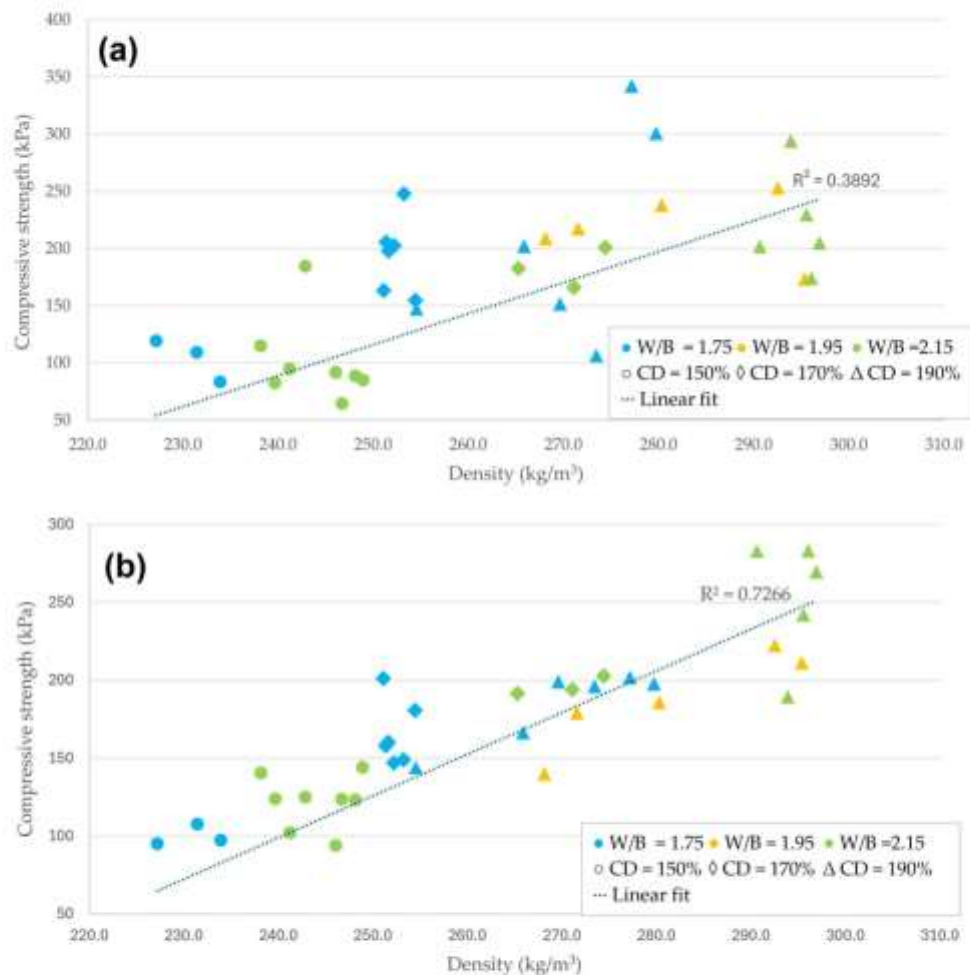


Figure 7. Compressive strength as a function of bulk density: (a) Proposed Method; (b) 5% strain criterion. Series HLCM150 and HLCM170 are excluded from both plots due to specimen preparation defects.

Within series HLCH150, HLCL190, and HLCH190, isolated specimens exhibited stress-strain curves with no distinct inflection point, causing the 1% offset line to intersect the curve at strains 2–3 times larger than the series average and producing strength values 1.5–3.2 times higher than the minimum. These outliers inflated series means and increased scatter substantially, with the most pronounced effect in HLCL190 ($CV = 44.9\%$, the highest of all series). The supplementary 5% strain criterion (Method 3 of [31]), which is not affected by inflection-point identification, yields more consistent results for these series. The impact

of outlying specimens on the dataset is reflected in the goodness of fit of the compressive strength–density relationship: excluding series HLCM150 and HLCM170, $R^2 = 0.389$ for the Proposed Method compared to $R^2 = 0.727$ for the 5% strain criterion.

For series where the Proposed Method yielded reliable results, the effect of compaction degree on compressive strength was consistent and pronounced. Representative stress–strain curves for three series sharing the highest water-to-binder ratio ($W/B = 2.15$) but differing in CD are shown in Figure 8. The curves illustrate a clear increase in stress level with increasing CD, with a markedly larger increment between $CD = 150\%$ and $CD = 170\%$ than between $CD = 170\%$ and $CD = 190\%$. The same pattern was observed for $W/B = 1.75$. This saturation of the compaction effect above $CD = 170\%$ was consistent across both W/B groups and both strength criteria, with the strength increment for the $CD = 150\%$ to $CD = 170\%$ transition approximately 6–9 times larger than for the $CD = 170\%$ to $CD = 190\%$ transition (Figure 9).

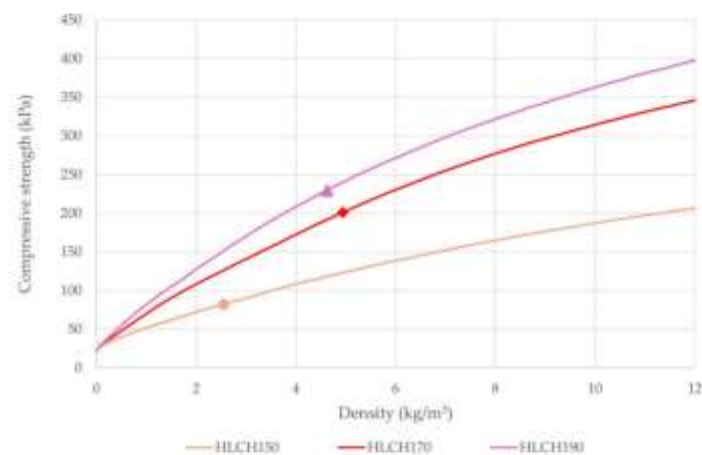


Figure 8. Representative compressive stress–strain curves for the HLCH series ($W/B = 2.15$) at three compaction degrees. Markers indicate the stress and strain values at which compressive strength was determined using the Proposed Method.

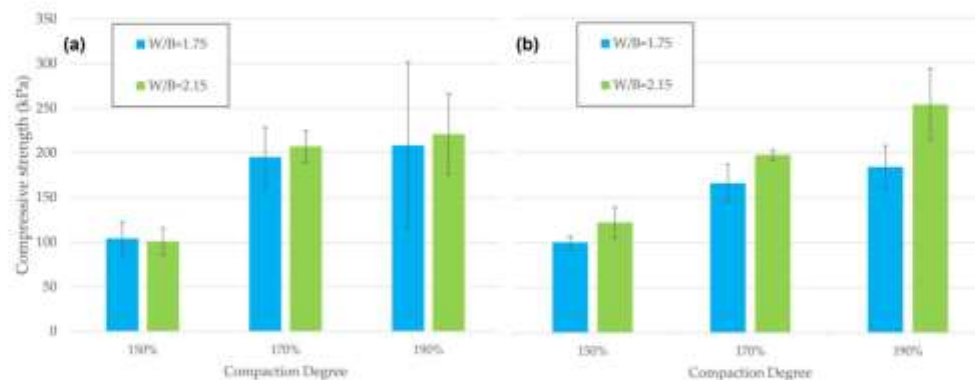


Figure 9. Mean compressive strength as a function of compaction degree for $W/B = 1.75$ and $W/B = 2.15$: (a) Proposed Method; (b) 5% strain criterion.

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

The effect of the water-to-binder ratio was assessed at CD = 190%, the only compaction level at which results from all three W/B groups were available (Figure 10). Using the Proposed Method, mean strengths were 208 kPa (HLCL190, W/B = 1.75), 218 kPa (HLCM190, W/B = 1.95), and 221 kPa (HLCH190, W/B = 2.15), corresponding to increments of +4.6% and +1.3% per step increase in W/B—all within the range of within-series variability. The 5% strain criterion yielded 184 kPa, 188 kPa, and 254 kPa respectively, pointing to a more substantial difference at the highest W/B tested (W/B = 2.15). This pattern is not confirmed by the Proposed Method and may reflect the sensitivity of the 5% criterion to elastic modulus differences between series rather than genuine strength differences. The effect of W/B on compressive strength therefore remains inconclusive at the compaction levels examined.

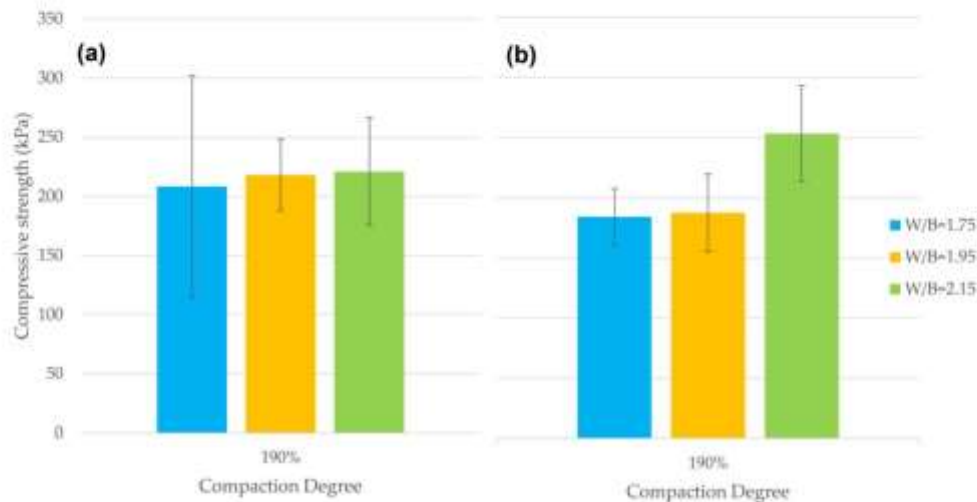


Figure 10. Mean compressive strength as a function of water-to-binder ratio at CD = 190%: (a) Proposed Method; (b) 5% strain criterion.

3.4. Extended Dataset

To place the results of the present study in a broader context, Figures 11 and 12 present scatter plots consolidating all results from the research programme. The dataset comprises results published in [17,31], results from the present study, and the complementary measurements identified in Table 3. The combined dataset spans a density range of approximately 227 to 518 kg/m³, substantially wider than the range covered by the present study alone (227–296 kg/m³), and reflects the diversity of mix designs investigated across the programme, including variations in B/S, W/B, compaction degree, and hemp shive particle size.

As shown in Figure 11, thermal conductivity exhibits a strong positive linear relationship with density across the full dataset ($R^2 = 0.9403$, $n = 55$). Figure 12 shows the corresponding plot for compressive strength. A positive linear relationship with density is also evident across the extended dataset ($R^2 = 0.6842$, $n = 68$). The coefficient of determination is markedly higher than that obtained for the present study alone ($R^2 = 0.389$), which, as discussed in Section 3.3, was depressed by the inflated mean values of series affected by within-series outliers.

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

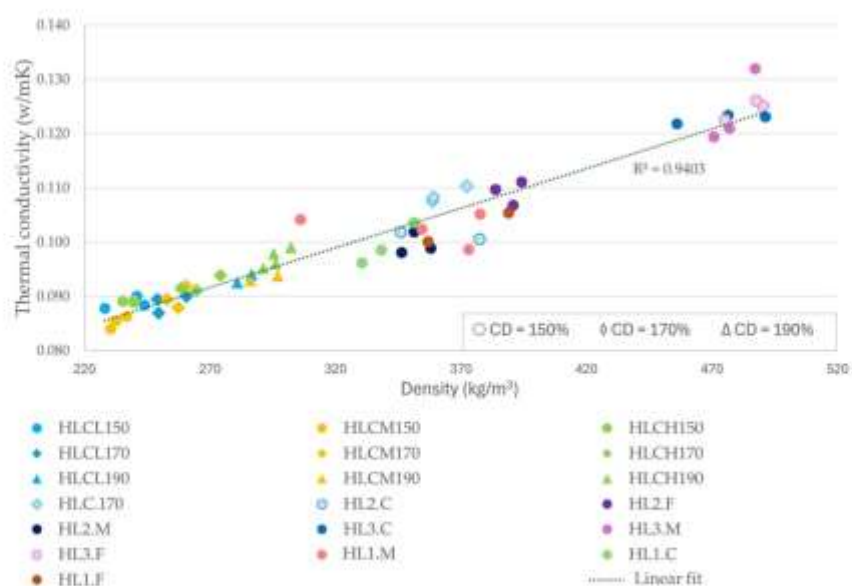


Figure 11. Thermal conductivity as a function of density for the extended dataset comprising results from [14,28], the present study, and previously unpublished measurements for selected series.

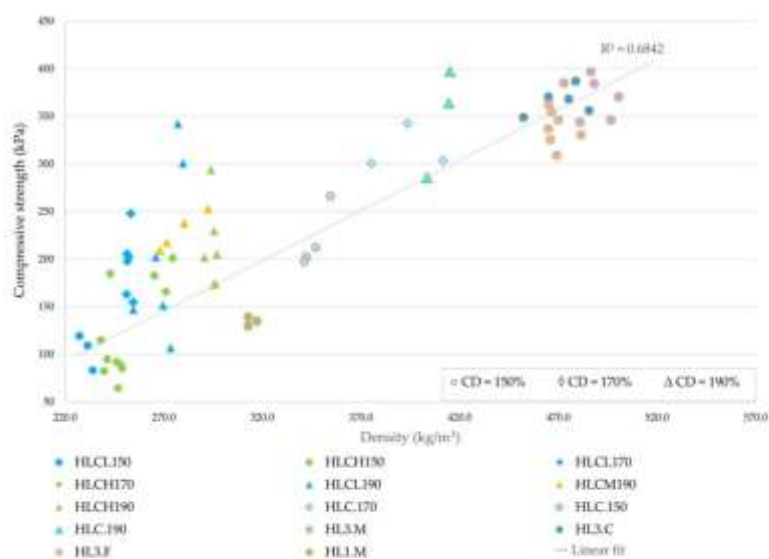


Figure 12. Compressive strength (Proposed Method) as a function of density for the extended dataset comprising results from [17,31], the present study, and previously unpublished measurements for selected series.

4. Discussion

4.1. Effect of Binder-to-Shiv Ratio on Composite Properties

The B/S ratio is the most influential technological variable investigated across the research programme, governing both thermal conductivity and compressive strength primarily through its effect on bulk density. Across the extended dataset, spanning B/S ratios from 1:1 to 3:1 [17], with densities from approximately 227 to 518 kg/m³, both λ and f_c increased with rising B/S ratio. At a comparable compaction level (CD = 150%), the increase in λ between the lowest and intermediate B/S ratio was approximately 18%, and between the intermediate and highest approximately 19%.

These findings are consistent with the literature. Sinka et al. demonstrated that regardless of binder type, an increase in B/S ratio from 1:1 to 2:1 resulted in a 17–23% increase in thermal conductivity [15]. Abdellatif et al. report an increase of approximately 30% for the same change in proportions [50]. Some researchers report even stronger effects. Sassoni et al. obtained a 34% increase in λ when B/S increased from 1.5 to 2.5 [51]. Brzyski observed an increase of 38% for a smaller step from B/S = 1.5 to 2.0 [23]. It should be noted, however, that changing the B/S ratio also alters mix workability and its susceptibility to compaction. In many of the cited studies, compaction level is not clearly defined or directly measured. The reported effect of binder content on thermal conductivity may therefore be confounded by uncontrolled differences in compaction. Within the present research programme, the effect of B/S ratio on thermal conductivity was investigated in [34] using a different binder composition. For mix designs with B/S ratios of 1:1 and 2.25:1, λ increased by 31% at comparable compaction levels. The effect of B/S ratio on density, and consequently on thermal conductivity, is thus substantial. Its influence on mechanical properties is, however, even more pronounced.

The B/S ratio also determines the fundamental mechanical character of the composite. At low binder content (B/S = 1:1, present study), the binder matrix is insufficient to dominate the mechanical response under compressive loading. The stress–strain curve lacks a well-defined inflection point, the material behaves as a low-density insulating fill, and the applicability of the Proposed Method is limited across all compaction levels examined. This behaviour is consistent with observations in [34], where the B/S = 1:1 mixture used as infill between rafters exhibited an identical deformation character. Arnaud and Gourlay identified the dominant role of shive particles in mixes with insufficient binder content, characterized by the absence of a clear elastic period and with a high level of plasticity [27]. This results in inferior mechanical properties due to the increased porosity of the composite [52]. This behaviour can be explained by the microstructural role of the binder phase. At low binder content, aggregate particles are connected by discrete binder bridges, with the shive network dominating the mechanical response and producing extended plastic plateaus under compression. At intermediate binder content, aggregates are partially coated by hydration products of varying thickness. At high binder content, the binder forms a continuous matrix encapsulating the aggregate particles, predominantly governing mechanical behaviour and producing a more pronounced elastic zone and more brittle failure [27,52,53]. Higher binder content therefore extends the elastic zone by shifting load transfer progressively to the mineral matrix [53], which explains why the Proposed Method, based on identification of the inflection point, yields reliable results mostly at B/S $\geq$ 2:1.

It should be noted that compaction also significantly affects the mechanical response of the composite: as demonstrated in [31,54], even at lower B/S ratios, a stiffer material with a more pronounced elastic zone can be obtained by applying a higher CD during production. The nature of the stress–strain curve, and in particular the clarity of its inflection point, therefore depends on both B/S ratio and compaction level, which jointly determine

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

the applicability of strength determination methods. The Proposed Method, based on the 1% permanent strain criterion, yields reliable and repeatable results for mixes with higher binder content, typically used in wall applications. This criterion is consistent with engineering practice for other materials, including wood loaded perpendicular to the grain [48], making it particularly appropriate for hemp–lime composites interacting with timber elements in frame structures.

4.2. Effect of Compaction Degree on Composite Properties

Within a fixed B/S ratio, CD is the most effective lever for adjusting composite properties. In both [31] (B/S = 2:1) and the present study (B/S = 1:1), the transition from CD = 150% to CD = 170% produced the largest single-step gains in density and compressive strength. Further compaction to CD = 190% yielded substantially diminishing returns. The significant influence of compaction on strength is confirmed by other authors: Williams et al. [30] reported a 175% increase in compressive strength when compaction increased from 30% to 60% volume reduction. Similarly, at a fixed B/S ratio, intensive compaction during production leads to a pronounced strength increase through reduction in void space within the composite [26,54].

Compaction produces comparable absolute gains in compressive strength regardless of B/S ratio. Between CD = 150% and CD = 170%, these amounted to approximately 97 kPa at B/S = 2:1 [31] and 91–106 kPa at B/S = 1:1 in the present study. The underlying mechanism is, however, fundamentally different. At higher binder content, compaction improves the continuity of the binder matrix, producing a well-defined inflection point in the stress–strain curve and reliable results from the Proposed Method. At B/S = 1:1, compaction primarily reduces the void space between shive particles without proportionally improving binder matrix continuity. Despite a real strength gain, the inflection point therefore remains poorly defined and the applicability of the Proposed Method is limited.

The effect of CD on thermal conductivity is indirect, operating through changes in bulk density. λ responds primarily to bulk density regardless of the B/S ratio, as confirmed by the strong λ – ρ correlations observed across the extended dataset. The total increase in λ from CD = 150% to CD = 190% ranged from approximately 5% to 10% depending on the W/B group, corresponding to the density increases observed over the same range. For the lowest W/B series, the increase in λ between CD = 170% and CD = 190% exceeded that between CD = 150% and CD = 170%. Given the measurement uncertainty, however, a definitive interpretation of this pattern is not possible. These findings are broadly consistent with [30,55], where compaction level differences accounted for most of the variation in λ between series of nominally similar composition. This is supported by Collet and Pretot, who demonstrated that at a fixed mix composition, a change in composite density alone can nearly double the value of λ [35]. The loose-fill density used as the reference in the CD method depends on how the material fills the measuring container. This is influenced by shive particle size and mix consistency, among other factors. The CD method describes compaction relative to the uncompacted state. This makes it potentially useful for on-site verification, where the ratio of the fresh mix volume to the volume of the completed partition element can be determined.

4.3. Effect of Water-to-Binder Ratio on Composite Properties

The W/B ratio influences the final bulk density of the composite. It might be expected that excess water evaporates during maturation and does not affect the density of the material. The results indicate, however, that a higher water content in the mix translated into a higher dry bulk density of the composite. The mechanism responsible for this relationship is likely the improved workability of the mix at higher W/B. The material filled

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

the measuring container used to determine loose-fill density more readily and completely. Loose bulk density therefore does not solely reflect the water content, but also the packing efficiency of all constituents within the measuring container. This effect is more pronounced at $CD = 170\%$ and $CD = 190\%$, where a greater mass of material was required to achieve the target compaction level. The loose-fill density differences therefore accumulated and produced a more noticeable effect on the final composite density. The absolute magnitude of this effect remains modest, with the density increase between the lowest and highest W/B amounted to approximately 5%.

The influence of W/B on thermal conductivity mirrors its effect on density and operates through the same mechanism. Increasing W/B leads to a marginal increase in λ consistent with the corresponding density increase. An exception is the HLCM150 series ($W/B = 1.95$, $CD = 150\%$), which exhibited a lower λ than the extreme W/B series at the same compaction level. At $CD = 150\%$, only a relatively small mass of mix is required to produce the specimen. The difference in loose-fill density between W/B groups has a negligible cumulative effect on the final composite density, and the lower density of this series reflects a technological effect of specimen preparation rather than a material property. Overall, the W/B effect on λ is very small, and when standard deviations are considered, differences between series frequently fall within measurement uncertainty. This is consistent with [17], where two water content levels were applied at $B/S = 2:1$, and the difference in thermal conductivity between series amounted to 1–6%, comparable to that observed in the present study.

No significant effect of W/B ratio on compressive strength was identified in the present study. As noted in Section 3.3, two series at the intermediate W/B level (HLCM150 and HLCM170) exhibited anomalously low strength values. These are attributed to technological difficulties arising from the low binder content ($B/S = 1:1$) rather than to the W/B ratio itself, as at this B/S ratio, the amount of binder is insufficient to form a coherent composite matrix. In the series that yielded reliable results, a tendency for strength to increase with W/B was observed. This may, however, reflect the associated density increase rather than a direct improvement in binder hydration quality. A W/B increment of 0.2 at $B/S = 1:1$ may be too small to produce a statistically significant effect on strength at such a low binder content.

Regardless of the above, a higher water content in the mix should generally favour the mechanical properties of the composite. Abdellatef et al. highlight the high capacity of hemp shives to absorb water from the mix, which limits its availability for binder hydration and carbonation [38]. This effect may be particularly pronounced in composites with low binder content, as in the present study, where the ratio of water to binder directly governs the quality of the binding matrix. To properly assess the influence of W/B on mechanical properties, further investigation at higher B/S ratios is needed. At higher binder content, changes in water quantity will be more significant relative to the total binder mass, and differences in hydration degree more discernible.

4.4. Effect of Hemp Shive Particle Size on Composite Properties

Shive particle size consistently reduced thermal conductivity across all B/S ratios and compaction levels examined in [17]: larger fractions produced lower composite density and correspondingly lower λ , with the total reduction from fine to coarse fraction reaching 7.6% at $B/S = 2:1$ and averaging approximately 4.1% across all series. The mechanism is straightforward: larger particles create larger inter-particle voids in the uncompacted state, and although compaction partially closes these voids, a residual porosity advantage is preserved in the compacted composite. This is consistent with findings in the literature,

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

where shive characteristics were shown to influence the insulating properties of hemp–lime composites, albeit to a modest degree [28,29,56].

No detectable effect of particle size on compressive strength was identified from supplementary measurements at B/S = 3:1 (previously unpublished), where series HL3.F (fine fraction, mean density 469.1 kg/m³), HL3.M (medium fraction, 491.9 kg/m³), and HL3.C (coarse fraction, 471.4 kg/m³) yielded mean compressive strengths of 338, 378, and 366 kPa respectively. The ranking of mean strengths corresponds to the ranking of mean densities, with no systematic offset attributable to particle size fraction. This suggests that at B/S = 3:1, compressive strength is governed by the density of the binder matrix rather than by aggregate geometry. Differences in packing arising from granulometry are absorbed by the binder phase and do not translate into differences in compressive strength. It should be noted that although compaction degree was kept constant across compared fractions, different particle sizes resulted in different final composite densities due to differences in packing efficiency. Since both thermal conductivity and compressive strength are strongly density-dependent, effects attributed to particle size may partly reflect these density differences rather than direct particle geometry effects. A fully rigorous assessment of particle size influence would require maintaining comparable final densities across fractions. This is consistent with the conclusion from [17] that the B/S ratio exerts a considerably stronger influence on both thermal and mechanical properties than shive granulometry, and that the particle size effect on λ —while real—is secondary to the effects of mix composition and compaction.

An important technological aspect observed during specimen preparation is the deterioration of mix workability with increasing particle size—larger shives are more difficult to mix homogeneously and more resistant to compaction, which may represent a significant practical limitation during production. It should also be noted that hemp–lime composites can be produced using finer shive fractions than those employed in the present programme. The literature reports shive fractions with mean particle lengths not exceeding 5 mm [41,57,58]. The finest fraction used in the present programme had a mean particle length of approximately 9 mm, reflecting the processing characteristics of Polish hemp shives. Precise granulometric characterization through image analysis is therefore particularly important when comparing results across studies using shive fractions of different origins and processing methods, as differences in particle geometry may otherwise be confounded with differences in raw material quality. The effect of particle size on λ may be more pronounced in studies using finer and more uniform fractions, as differences in packing geometry are amplified at smaller absolute particle sizes.

5. Conclusions

This study investigated the influence of W/B ratio and CD on the thermal conductivity and compressive strength of hemp–lime composites. Previously published investigations conducted within the research programme were incorporated into the analysis, and complementary measurements were added to selected series, enabling a comparative assessment of four technological variables: B/S ratio, CD, W/B ratio, and hemp shive particle size. The following conclusions are drawn from the systematic research programme as a whole:

- The binder-to-shive ratio (B/S) is the dominant technological variable governing composite density, thermal conductivity, and compressive strength. Beyond its quantitative effect, B/S determines the fundamental mechanical character of the composite and the applicability of strength determination methods: at B/S = 1:1 the material behaves as a plastic insulating fill and the Proposed Method shows limited applicability, while at B/S $\geq$ 2:1 the binder matrix dominates load transfer and the Proposed Method yields

reliable results. The 5% strain criterion is recommended for low-binder mixes where serviceability rather than strength governs design.

- Compaction degree (CD) acts as the most effective lever for adjusting composite properties within a fixed B/S ratio, with a non-linear response: the transition from CD = 150% to CD = 170% produced the largest gains in both compressive strength and density, with substantially diminishing returns at CD = 190%. From a practical standpoint, CD = 170% therefore represents an effective compaction target. The CD method provides a consistent and objective measure of compaction applicable under both laboratory and field conditions. A key limitation identified during the research programme is the sensitivity of the loose-fill reference density to mixture workability. To minimize this effect, determination of loose-fill density using a wide shallow mould (300 × 300 × 80 mm) is recommended.
- The water-to-binder ratio had a moderate influence on composite properties at the investigated binder content (B/S = 1:1). Increasing W/B resulted in a marginal increase in bulk density ($\leq 5\%$) and a corresponding increase in thermal conductivity, with differences between series frequently within measurement uncertainty. The effect of W/B on compressive strength remains inconclusive at this B/S ratio: the low absolute binder content limits the quality of the binding matrix regardless of water availability, and the investigated W/B increment of 0.2 may be insufficient to produce a detectable effect on strength. These findings should not be generalized to mixes with higher binder content, where W/B effects on mechanical properties are expected to be more pronounced. The empirical formula developed within the programme for determining W/B appears well-suited to the binder composition employed; however, its applicability may require verification for different binders and shiv origins. Investigation of W/B effects on mechanical properties at higher B/S ratios is recommended as a direction for further research.
- Hemp shive particle size had a limited but real effect on thermal conductivity: in investigations at B/S = 2:1, coarser fractions yielded lower composite density and correspondingly lower λ , with the total reduction from fine to coarse fraction reaching approximately 7.6%. No systematic effect of particle size on compressive strength was identified. Given the moderate influence of granulometry on both properties investigated, the selection of shiv fraction in practice should be guided primarily by technological considerations and raw material homogeneity. It should be noted that finer fractions improve workability and compactability, which facilitates the production process, but leads to higher composite density and ultimately higher thermal conductivity.
- Image analysis enables more objective determination of hemp shive particle size distribution than traditional sieve analysis, while also providing geometric parameters such as elongation and circularity relevant to binder demand and mix workability. A 15 g sample was found sufficient for reliable characterization.
- Across the extended dataset, comprising all series from the research programme over a density range of approximately 227 to 518 kg/m³, both thermal conductivity and compressive strength exhibited strong positive linear relationships with bulk density ($R^2 = 0.94$ and $R^2 = 0.68$, respectively). Bulk density therefore serves as a reliable intermediate descriptor linking technological variables to composite performance across a wide range of mix designs.

The results of the present research programme identify several directions for further investigation. First, the influence of W/B ratio on compressive strength should be examined at higher B/S ratios, where changes in water quantity represent a more significant fraction of the total binder mass and differences in hydration quality are expected to be more

discernible. Second, statistical analysis of interactions between technological variables, which the present programme investigated qualitatively through factorial design, would enable more rigorous quantification of their relative contributions. Third, the effect of specimen age on strength development deserves systematic investigation, as the 28-day testing protocol adopted in the present programme may not fully capture the long-term strengthening potential of lime-based binders. Finally, the establishment of minimum strength requirements for hemp–lime composites in different applications, such as wall infill, roof insulation, and floor fill, would provide a practical framework for translating the findings of the present programme into design guidelines.

The results of the research programme contribute to the standardization of hemp–lime composite production and may serve as a basis for developing design guidelines for broader application of this material in construction.

Funding: This research received no external funding.

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

Conflicts of Interest: The author declares no conflict of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

HLC	Hemp–lime composite
B/S	Binder-to-sliv
CD	Compaction degree
W/B	Water-to-binder

References

1. United Nations Environment Programme. *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2023.
2. Government of Canada, Treasury Board of Canada Secretariat. *Greening Government Strategy: A Government of Canada Directive*. Available online: <https://www.canada.ca/en/treasury-board-secretariat/services/innovation/greening-government/strategy.html> (accessed on 12 April 2026).
3. U.S. General Services Administration (GSA). Low-Embodied Carbon (LEC) Material Requirements for IRA-Funded Projects. Available online: <https://www.gsa.gov/real-estate/for-businesses-seeking-opportunities/ira-lec-material-requirements> (accessed on 12 April 2026).
4. Liu, Z.; Zhou, Q.; Tian, Z.; He, B.J.; Jin, G. A Comprehensive Analysis on Definitions, Development, and Policies of Nearly Zero Energy Buildings in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *114*, 109314. [CrossRef]
5. Zhu, C.; Yang, Z.; Huang, B.; Li, X. Embodied Carbon Emissions in China's Building Sector: Historical Track from 2005 to 2020. *Buildings* **2023**, *13*, 211. [CrossRef]
6. Parlament Europejski; Rada Unii Europejskiej. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z Dnia 30 Czerwca 2021 r. w Sprawie Ustanowienia Ram Na Potrzeby Osiągnięcia Neutralności Klimatycznej i Zmiany Rozporządzeń (WE) Nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie Prawo o Klimacie). *Dz. Urzędowy Unii Eur.* **2021**, *L 243*, 1–17. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32021R1119> (accessed on 12 April 2026).
7. Global Alliance for Buildings and Construction; International Energy Agency; The United Nations Environment Programme. *2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*; UNEP: Paris, France, 2019.
8. Pittau, F.; Krause, F.; Lumia, G.; Habert, G. Fast-Growing Bio-Based Materials as an Opportunity for Storing Carbon in Exterior Walls. *Build. Environ.* **2018**, *129*, 117–129. [CrossRef]
9. Muhit, I.B.; Omairey, E.L.; Pashakolaie, V.G. A Holistic Sustainability Overview of Hemp as Building and Highway Construction Materials. *Build. Environ.* **2024**, *256*, 111470. [CrossRef]
10. Asghari, N.; Memari, A.M. State of the Art Review of Attributes and Mechanical Properties of Hempcrete. *Biomass* **2024**, *4*, 65–91. [CrossRef]

<https://doi.org/10.3390/civileng7020033>

11. Hrčka, R.; Štompf, P.; Jochim, S.; Mikuš, M.E.; Iskra, M. The Measurement of Hemp Concrete Thermal and Moisture Properties for an Effective Building Construction Proposal in Region of Slovakia (Central Europe). *Materials* **2025**, *18*, 1651. [\[CrossRef\]](#)
12. Sassoni, E.; Manzi, S.; Motori, A.; Montecchi, M.; Canti, M. Novel Sustainable Hemp-Based Composites for Application in the Building Industry: Physical, Thermal and Mechanical Characterization. *Energy Build.* **2014**, *77*, 219–226. [\[CrossRef\]](#)
13. Hirst, E.; Walker, P.; Paine, K.; Yates, T. Characterisation of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading. In Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy, 28–30 June 2010; pp. 1395–1405.
14. Stevulova, N.; Cigasova, J.; Schwarzova, L.; Sicakova, A.; Junak, J. Sustainable Bio-Aggregate-Based Composites Containing Hemp Hurds and Alternative Binder. *Buildings* **2018**, *8*, 25. [\[CrossRef\]](#)
15. Sinka, M.; Van Den Heede, P.; De Belie, N.; Bajare, D.; Sahmenko, G.; Korjaks, A. Comparative Life Cycle Assessment of Magnesium Binders as an Alternative for Hemp Concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 288–299. [\[CrossRef\]](#)
16. Walker, R.; Pavia, S. Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp—Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *64*, 270–276. [\[CrossRef\]](#)
17. Piątkiewicz, W.; Narloch, P.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Effect of Hemp Shive Granulometry on the Thermal Conductivity of Hemp—Lime Composites. *Materials* **2025**, *18*, 3458. [\[CrossRef\]](#)
18. Sáez-Pérez, M.P.; Brümmer, M.; Durán-Suárez, J.A. A Review of the Factors Affecting the Properties and Performance of Hemp Aggregate Concretes. *J. Build. Eng.* **2020**, *31*, 101323. [\[CrossRef\]](#)
19. Delannoy, G.; Marceau, S.; Glé, P.; Gourlay, E.; Guéguen-minerbe, M.; Diafi, D.; Nour, I.; Amziane, S. Influence of Binder on the Multiscale Properties of Hemp Concretes. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2019**, *23*, 609–625. [\[CrossRef\]](#)
20. de Bruijn, P.B.; Jeppsson, K.-H.; Sandin, K.; Nilsson, C. Mechanical Properties of Lime-Hemp Concrete Containing Shives and Fibres. *Biosyst. Eng.* **2009**, *103*, 474–479. [\[CrossRef\]](#)
21. Mazhoud, B.; Collet, F.; Pretot, S.; Lanos, C. Mechanical Properties of Hemp-Clay and Hemp Stabilized Clay Composites. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *155*, 1126–1137. [\[CrossRef\]](#)
22. Haustein, E. Thermal Insulation Properties of the Lime-Cement Composite with Hemp Shives. *Ecol. Eng.* **2018**, *19*, 72–78. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
23. Brzyski, P. Hemp-Lime Composite as Wall Material Meeting the Requirements for Sustainable Development in Construction Industry. Ph.D. Thesis, Lublin University of Technology, Lublin, Poland, 2018.
24. Dinh, T.M.; Magniont, C.; Coutand, M. Hemp Concrete Using Innovative Pozzolanic Binder. In Proceedings of the First International Conference on Bio-Based Building Materials; RILEM Publications: Bagneux, France, 2015.
25. Piątkiewicz, W.; Narloch, P.; Pietruszka, B. Influence of Hemp-Lime Composite Composition on Its Mechanical and Physical Properties. *Arch. Civ. Eng.* **2020**, *66*, 485–503. [\[CrossRef\]](#)
26. Tronet, P.; Lecompte, T.; Picandet, V.; Baley, C. Study of Lime Hemp Concrete (LHC)—Mix Design, Casting Process and Mechanical Behaviour. *Cem. Concr. Compos.* **2016**, *67*, 60–72. [\[CrossRef\]](#)
27. Arnaud, L.; Gourlay, E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*, 50–56. [\[CrossRef\]](#)
28. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of Constituents on the Properties of the Bio-Aggregate Composite Hemp-Lime. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 9–17. [\[CrossRef\]](#)
29. Brzyski, P.; Gladecki, M.; Rumińska, M.; Pietrak, K.; Kubiś, M.; Lapka, P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. *Materials* **2020**, *13*, 5383. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
30. Williams, J.; Lawrence, M.; Walker, P. The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime. *Mater. Struct.* **2017**, *50*, 108. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
31. Piątkiewicz, W.; Piotrowski, A.; Narloch, P. Determination of Compressive Strength in Hemp—Lime Composites: Comparative Study of Testing Methodologies and Proposal of Improved Approach. *Appl. Sci.* **2025**, *16*, 306. [\[CrossRef\]](#)
32. Bošković, I.; Radivojević, A. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Hemp-Lime Concrete Wall Constructions in Serbia: The Impact of Carbon Sequestration, Transport, Waste Production and End of Life Biogenic Carbon Emission. *J. Build. Eng.* **2023**, *66*, 105908. [\[CrossRef\]](#)
33. Arrigoni, A.; Pelosato, R.; Meli, P.; Ruggieri, G.; Sabbadini, S.; Dotelli, G. Life Cycle Assessment of Natural Building Materials: The Role of Carbonation, Mixture Components and Transport in the Environmental Impacts of Hempcrete Blocks. *J. Clean. Prod.* **2017**, *149*, 1051–1061. [\[CrossRef\]](#)
34. Gołębiowski, M.; Pietruszka, B.; Piątkiewicz, W.; Kubiś, M.; Oleksienko, O. Compressive Strength, Thermal Conductivity, Vapor Permeability and Specific Heat of Hemp-Lime Composites Varying in Density for Wall, Roof and Floor Applications. *Materials* **2025**, *18*, 4958. [\[CrossRef\]](#)
35. Collet, F.; Pretot, S. Thermal Conductivity of Hemp Concretes: Variation with Formulation, Density and Water Content. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 612–619. [\[CrossRef\]](#)

36. Colinart, T.; Glouannec, P.; Chauvelon, P. Influence of the Setting Process and the Formulation on the Drying of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *30*, 372–380. [\[CrossRef\]](#)
37. Pinkos, J. The Effectiveness of Hempcrete as an Infill Insulation in the Prairies Compared to a Standard Building Based on Power Consumption. Master's Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 2014.
38. Abdellatef, Y.; Khan, M.A.; Khan, A.; Alam, M.I.; Kavgić, M. Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials. *Materials* **2020**, *13*, 5000. [\[CrossRef\]](#)
39. Walker, R.; Pavia, S.; Mitchell, R. Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *61*, 340–348. [\[CrossRef\]](#)
40. Sutton, A.; Black, D.; Pete, W. *Hemp Lime: An Introduction to Low-Impact Building Materials*; IHS BRE Press: Watford, UK, 2011; pp. 1–6.
41. Niyigena, C.; Amziane, S.; Chateaufort, A. Multicriteria Analysis Demonstrating the Impact of Shiv on the Properties of Hemp Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *160*, 211–222. [\[CrossRef\]](#)
42. Diquélou, Y.; Gourlay, E.; Arnaud, L.; Kurek, B. Impact of Hemp Shiv on Cement Setting and Hardening: Influence of the Extracted Components from the Aggregates and Study of the Interfaces with the Inorganic Matrix. *Cem. Concr. Compos.* **2015**, *55*, 112–121. [\[CrossRef\]](#)
43. Gołębiowski, M.; Narloch, P.; Piątkiewicz, W.; Wasilewski, I. Trwałość Kompozytów Wapienno-Konopnych w Świetle Różnych Metod Badawczych. *Mater. Bud.* **2023**, *2023*, 2–8. [\[CrossRef\]](#)
44. Amziane, S.; Collet, F. *Bio-Aggregates Based Building Materials*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2017.
45. Evrard, A.; De Herde, A.; Minet, J. *Dynamical Interactions Between Heat and Mass Flows in Lime-Hemp Concrete*; Taylor & Francis: London, UK, 2006; pp. 69–76.
46. Sokółowska, J.J. Utilizing Sakurajima Volcanic Ash as a Sustainable Partial Replacement for Portland Cement in Cementitious Mortars. *Sustainability* **2025**, *17*, 7576. [\[CrossRef\]](#)
47. Narloch, P.; Piątkiewicz, W.; Anysz, H.; Wólczyńska, Z.; Mańczak, J. Digital Image-Based Characterization of Particle Size and Shape Distribution in Industrial Hemp Shives; Zenodo: Geneva, Switzerland, 2025. [\[CrossRef\]](#)
48. EN 408:2010+A1:2012; Timber Structures—Structural Timber and Glued Laminated Timber—Determination of Some Physical and Mechanical Properties. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2012.
49. 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. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2001.
50. Dhakal, U.; Berardi, U.; Gorgolewski, M.; Richman, R. Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings. *J. Clean. Prod.* **2017**, *142*, 3655–3664. [\[CrossRef\]](#)
51. Somé, S.C.; Ben Fraj, A.; Pavoine, A.; Hajj Chehade, M. Modeling and Experimental Characterization of Effective Transverse Thermal Properties of Hemp Insulation Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *189*, 384–396. [\[CrossRef\]](#)
52. Bardouh, R.; Toussaint, E.; Amziane, S.; Marceau, S. Mechanical Behavior of Bio-Based Concrete under Various Loadings and Factors Affecting Its Mechanical Properties at the Composite Scale: A State-of-the-Art Review. *Clean. Eng. Technol.* **2024**, *23*, 100819. [\[CrossRef\]](#)
53. Akkaoui, A.; Caré, S.; Vandamme, M. Experimental and Micromechanical Analysis of the Elastic Properties of Wood-Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *134*, 346–357. [\[CrossRef\]](#)
54. Nguyen, T.; Picandet, V.; Amziane, S.; Baley, C. Influence of Compactness and Hemp Hurd Characteristics on the Mechanical Properties of Lime and Hemp Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2009**, *13*, 1039–1050. [\[CrossRef\]](#)
55. Nguyen, T.T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecomte, T.; Amziane, S.; Baley, C. Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2010**, *14*, 545–560. [\[CrossRef\]](#)
56. Bourdot, A.; Moussa, T.; Gacoin, A.; Maalouf, C.; Vazquez, P.; Thomachot-Schneider, C.; Bliard, C.; Merabtine, A.; Lachi, M.; Douzane, O.; et al. Characterization of a Hemp-Based Agro-Material: Influence of Starch Ratio and Hemp Shive Size on Physical, Mechanical, and Hygrothermal Properties. *Energy Build.* **2017**, *153*, 501–512. [\[CrossRef\]](#)
57. Sheridan, J.; Sonebi, M.; Taylor, S.; Amziane, S. The Effect of a Polyacrylic Acid Viscosity Modifying Agent on the Mechanical, Thermal and Transport Properties of Hemp and Rapeseed Straw Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *235*, 117536. [\[CrossRef\]](#)
58. Bourdot, A.; Magniont, C.; Lagouin, M.; Niyigena, C.; Evon, P.; Amziane, S. Impact of Bio-Aggregates Properties on the Chemical Interactions with Mineral Binder, Application to Vegetal Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* **2019**, *17*, 542–558. [\[CrossRef\]](#)

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.