

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

ORCID: 0000-0001-7206-0369

dr Barbara Pietruszka²⁾

ORCID: 0000-0003-3268-7997

Efektywność energetyczna budynków wykonanych w technologii kompozytów wapienno-konopnych

Energy efficiency of buildings made in the hemp-lime composites technology

DOI: 10.15199/33.2023.01.09

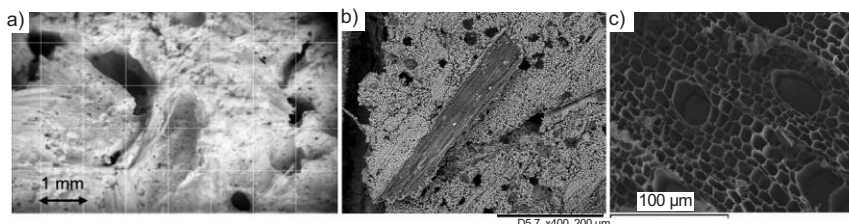
Streszczenie. Kompozyty wapienno-konopne są przedmiotem intensywnych badań ze względu na ich walor proekologiczny oraz potwierdzoną użyteczność w zastosowaniu w budownictwie. Tematem artykułu jest analiza prac naukowo-badawczych prezentujących właściwości tego typu materiałów umożliwiające oszczędność energii podczas użytkowania budynku. Zebrane wyniki potwierdzają wieloaspektowy potencjał kompozytów w omawianym zakresie i skłaniają do podjęcia prac nad implementacją rozwiązań w budownictwie krajowym.

Słowa kluczowe: kompozyt wapienno-konopny; hempcrete; efektywność energetyczna budynków; budownictwo zrównoważone.

Abstract. Hemp-lime composites are the subject of intensive research due to their pro-ecological value and proven usefulness in construction applications. The subject of the article is the analysis of scientific and research works presenting the properties of this type of materials enabling energy saving during the use of the building. The collected results confirm the multifaceted potential of the composites in the discussed scope and prompt to undertake work on the implementation of solutions in domestic construction.

Keywords: hemp-lime composite; hempcrete; energy efficiency of buildings; sustainable construction.

Kompozyt wapienno-konopny (*hempcrete*) wytwarzany jest z paździerza konopnego (rozdrobionych rdzeni łodyg konopi przemysłowych), substancji wiążących (najczęściej wapna hydratyzowanego modyfikowanego cementem, wapnem hydraulicznym i pucolanami) oraz wody [1 ÷ 3]. Materiał ten, początkowo wykorzystywany w renowacji budynków zabytkowych, szybko zyskał popularność we współczesnym budownictwie [1 ÷ 5]. Stosowany jest w formie luźnej zasyпки, natryskiwanych lub ubijanych przegród monolitycznych, bloczków lub wypełnień elementów wielkoformatowych, do wykonywania ścian, warstw izolacyjnych (dachów, ścian i podłóg), a także tynków [1 ÷ 5]. Kompozyt może mieć różną gęstość objętościową (200 ÷ 600 kg/m³ [1 ÷ 5]) i porowatość wynoszącą 72 ÷ 85% [6, 7]. Złożona struktura otwartych i połączonych porów różnej wielkości (fotografia) ma istotny wpływ na właściwości cieplno-wilgotnościowe



Pory w strukturze kompozytu: a) makropory utworzone przez losowe rozmieszczenie cząstek paździerza; b) mikropory powstałe w obrębie spoiwa; c) mikropory w strukturze paździerza [14]

Pores in the structure of the composite: a) macropores reated by random arrangement of the shiv particles; b) micropores formed within the binder; c) micropores in the shiv structure [14]

kompozytu. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie materiału wynosi odpowiednio 0,1 ÷ 0,9 MPa [5, 8 ÷ 12] oraz 0,1 ÷ 0,25 MPa [5, 11]. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ kompozytu to 0,07 ÷ 0,15 W/(m·K) [5, 8 ÷ 11, 13], a współczynnik oporu dyfuzyjnego μ wynosi ok. 5 [5, 6, 13 ÷ 15]. *Hempcrete* określa się jako materiał niepalny/trudno zapalny [16] oraz odporny na korozję biologiczną [12].

Energia wbudowana kompozytu związana jest z małą energochłonnością procesu produkcji paździerza konopnego i znacznym wydatkiem energetycznym przy produkcji wapna. Wykonanie 1 m² ściany o grubości 0,26 m wymaga 370 ÷ 394 MJ [17]. Podczas wzrostu 1 t konopi wiąże

1,84 t CO₂ z atmosfery [2] (a suchy materiał zawiera ok. 50% węgla [18]). Kompozyt w pierwszym roku od wytworzenia może sekwestrować do 76,8% CO₂ uwolnionego na skutek reakcji wypalania wapna [19]. Prognozowany ślad węglowy netto przykładowych przegród o współczynniku przenikania ciepła $U = 0,27$ W/(m²·K) w okresie 100 lat wynosi -15,95 ÷ 8,16 kg CO_{2eq}/m², w zależności od gęstości kompozytu oraz proporcji i składu zastosowanego spoiwa [20].

Ograniczenie strat ciepła przez przegrody

Wpływ omawianego materiału na zużycie energii w budynku związany jest głównie z jego właściwościami termo-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

²⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Ciepłej, Akustyki i Środowiska

^{*} Adres do korespondencji:

michal.golebiowski@pw.edu.pl

izolacyjnymi, wyrażanymi m.in. przez **współczynnik przewodzenia ciepła**. Kompozyt umożliwia efektywne projektowanie jedno- i wielowarstwowych ścian zewnętrznych spełniających obowiązujące w Polsce wymagania dotyczące ochrony cieplnej budynków [8]. Rzeczywisty przepływ ciepła przez przegrody zależy także od zmieniających się parametrów środowiska wewnętrznego i zewnętrznego: temperatury oraz wilgotności powietrza; ruchu powietrza; natężenia promieniowania słonecznego i opadów atmosferycznych. Szczególnie pominięcie transportu wilgoci przez zewnętrzne przegrody budynku przy wykonywaniu analiz energetycznych może generować wyniki obciążone błędem [21].

Wymiana ciepła ma szczególnie złożony charakter w materiałach porowatych i higroskopijnych, do jakich zalicza się kompozyt wapienno-konopny. Zmiana wilgotności powietrza wpływa na zawartość wilgoci w materiale, a więc także na takie parametry kompozytu jak **przewodność cieplna i ciepło właściwe**. Dynamika przepływu ciepła ma zaś wpływ na zawartość i przepływ wilgoci w materiale. Zmienne nasycenie przegrody parą wodną powoduje lokalną kondensację, której towarzyszy pojawienie się ciepła utajonego lub odparowanie kondensatu, co wiąże się z pobraniem ciepła. Przepływ i magazynowanie ciepła oraz wilgoci w materiale zaburza ruch powietrza, powodując zmianę lokalnej entalpii. Modelowanie przepływu wilgoci w kompozycie utrudnia również zjawisko histerezy [22].

Wyniki symulacji numerycznych przepływu ciepła i wilgoci, w których przyjęto skokowe obniżenie/podwyższenie temperatury po jednej stronie przegrody wykazały, że w *hempcrete* przepływ ciepła stabilizuje się po znacznie dłuższym czasie niż w betonie komórkowym czy wełnie mineralnej [22]. Uwzględnienie ciepła utajonego zmniejszyło przepływ ciepła o 2,5 i 9,6% odpowiednio w cyklu wychładzania i nagrzewania przegrody [22]. Podobne efekty zaobserwowano w trakcie testów laboratoryjnych polegających na jednostronnym nagrzewaniu warstwy materiału [23]. Wyniki te ilustrują wpływ małej dyfuzyjności cieplnej (tabela) na ograniczenie przepływu ciepła przez

Właściwości charakteryzujące dynamikę cieplno-wilgotnościową kompozytu w stanie suchym [15]

Properties characterizing the hygrothermal dynamics of the composite in the dry state [15]

Parametr	Hempcrete	Beton cementowy	Wełna mineralna
Dyfuzyjność cieplna [m ² /s]	1,68·10 ⁻⁷	ok. 8,1·10 ⁻⁷	ok. 7,8·10 ⁻⁷
Efuzyjność cieplna [J/(m ² K√s)]	297	ok. 1750	ok. 50
Dyfuzyjność wilgotnościowa [m ² /s]	8,30·10 ⁻⁶	do 100 razy mniejsza	brak danych
Efuzyjność wilgotnościowa [kg/(m ² ·Pa·√s)]	5,39·10 ⁻⁵	ok. 3 razy mniejsza	brak danych

warstwę kompozytu w początkowym okresie po zmianie temperatury z jednej strony przegrody.

Analizy numeryczne, zakładające jedynie oscylację temperatury zewnętrznej ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) w cyklu dobowym, wykazały w przypadku *hempcrete* największe opóźnienie termiczne (14 ÷ 15 h) oraz bardzo dobry efekt tłumienia zmian temperatury, redukując w większym stopniu przepływ ciepła (w stosunku do warunków ustalonych) niż przegroda o konstrukcji szkieletowej izolowana wełną mineralną oraz przegrody z betonu komórkowego i ceramiki izolowane od strony wewnętrznej, lecz w mniejszym stopniu niż przegroda z ceramiką izolowaną od strony zewnętrznej [15].

Symulacja numeryczna uwzględniająca przepływ i magazynowanie zarówno ciepła, jak i wilgoci, a także wpływ opadów, słońca i wiatru na przegrody została przeprowadzona dla okresu rocznego i belgijskich danych klimatycznych. Ilość ciepła, która przeniknęła przez ścianę z *hempcrete*, była o 7% mniejsza niż obliczona na podstawie wartości współczynnika przenikania ciepła U i różnicy temperatury brzegowej (oszczędności wystąpiły głównie w lecie) [15]. Pominięcie wpływu promieniowania słonecznego oraz ciepła utajonego zbliżyło wartość strat ciepła do obliczonej w warunkach ustalonych, wskazując na znaczenie warstw wykończeniowych przegrody [15]. Podobne wyniki otrzymano w przypadku ściany z betonu komórkowego oraz ceramiki z warstwą XPS, a wartości zbliżone do uzyskanych w przypadku warunków ustalonych otrzymano dla przegrody o konstrukcji szkieletowej izolowanej wełną mineralną z zewnętrzną warstwą osłonową. Wyniki wskazują, iż mała dyfuzyjność cieplna kompozytu nie wpływa znacznie na redukcję przepływu ciepła przez przegrodę w cyklu rocznym, w klimacie umiarkowanym, charakteryzującym się niewielkimi amplitudami termicznymi.

Istotnym problemem powodującym zwiększenie strat ciepła w budynku (nawet do 30% [24]) mogą być **mostki termiczne**. W konstrukcji szkieletowej z wypełnieniem wapienno-konopnym możliwe jest uzyskanie ciągłości materiału izolacyjnego na całej powierzchni obudowy, a aplikowany na mokro kompozyt ściśle przylega do powierzchni elementów konstrukcyjnych. Linio- wy współczynnik przenikania ciepła w przypadku naroży czy mocowania stolarki okiennej nie przekracza 0,01 W/(m·K) [25]. Detal połączenia ściana – podłoga może także zostać rozwiązany w taki sposób, aby ograniczyć przenikanie ciepła i ryzyko kondensacji powierzchniowej [26].

Zwiększenie pojemności cieplnej budynku

Przegrody budynku, poza funkcją izolacyjną, stanowią również masę absorbującą i oddającą ciepło, umożliwiającą redukcję zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku przez zmniejszenie okresowych wahań temperatury wewnętrznej. Materiały efektywne w tym zakresie charakteryzują się dużą pojemnością cieplną (zależną od gęstości i ciepła właściwego), ale także umiarkowaną przewodnością cieplną, dzięki czemu ciepło przepływa przez materiał w odpowiednim tempie (efektywny proces powinien przebiegać w czasie zbliżonym do termicznego cyklu budynku – zwykle dobowego [27]). Efuzyjność (aktywność) cieplna kompozytu wapienno-konopnego jest wielokrotnie mniejsza niż materiałów konstrukcyjnych, ale kilkukrotnie większa niż materiałów termoizolacyjnych ze względu na większą gęstość, ciepło właściwe i przewodność cieplną (tabela).

Wyniki pomiarów temperatury środowiska zewnętrznego i wewnętrznego (bez ogrzewania), przez 11 dni w okresie wiosennym, w eksperymentalnym

budynku w Bath (Anglia) wykazały zdolność obudowy obiektu do utrzymywania temperatury we wnętrzu na stabilnym poziomie [28]. Wyniki symulacji numerycznych, bazujące na złożonych modelach wymiany ciepła i masy, wykonanych w przypadku modelowych pomieszczeń w lokalizacjach o wysokiej temperaturze w okresie letnim (płd. Francja) wykazały dużo mniejszą zdolność kompozytu do stabilizowania temperatury wewnętrznej w porównaniu ze zwykłym betonem – niewystarczającą do zapobiegania zjawisku przegrzewania się wnętrza [29].

Ograniczenie strat ciepła związanych z wentylacją i infiltracją powietrza

We współczesnych, dobrze izolowanych budynkach udział strat ciepła przez wentylację może wynosić ponad 50% [30]. Zastosowanie we wnętrzach materiałów umożliwiających cykliczne akumulowanie i oddawanie wilgoci wraz z systemami wentylacji reagującymi na zmianę wilgotności powietrza jest efektywną metodą ograniczania zapotrzebowania budynków na energię [31].

Kompozyt wapienno-konopny charakteryzuje duża dyfuzyjność wilgotnościowa oraz bardzo duża efuzyjność wilgotnościowa (tabela) [14, 15], co wskazuje na potencjał tego materiału do wspomagania procesu naturalnej regulacji wilgotności we wnętrzach. Zmierzona wartość MBV kompozytu (parametr określany laboratoryjnie w warunkach zmieniającej się cyklicznie wilgotności) sąsiadującego z próbką powietrza [32] wynosi $1,94 \div 2,15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \%)$, co klasyfikuje go jako „dobry”, „doskonały” regulator wilgotności powietrza [14]. Stabilizacja wilgotności powietrza we wnętrzu odbywa się także przez usuwanie nadmiaru wilgoci w drodze dyfuzji pary przez przegrodę. Analiza metodą Glasera wykazała **możliwość projektowania otwartych dyfuzyjnych i wolnych od kondensacji międzywarstwowej przegród z hempcrete w polskich warunkach klimatycznych** [8].

Symulacje cieplno-wilgotnościowe w warunkach dynamicznych, z użyciem modelu budynku o przegrodach wykonanych z *hempcrete*, potwierdziły do-

brą zdolność materiału do stabilizowania wilgotności we wnętrzach i wynoszącą do 15% redukcję strat ciepła z zastosowaniem odpowiedniej strategii wentylacji. Otrzymane wyniki wskazują także, że wykończenie ścian tynkiem istotnie ogranicza zdolność buforowania wilgoci przez kompozyt [33]. Podobnie, wyniki symulacji wykonanej w przypadku pomieszczeń zlokalizowanych w południowej Francji wykazały lepszą zdolność do stabilizowania wilgotności względnej powietrza przez ściany z *hempcrete* niż ze zwykłego betonu (efekt był mniejszy w przypadku zastosowania tynków) [29]. Analiza obiektów zrealizowanych w technologii *hempcrete* dostarcza jednak wielu przykładów pozostawiania ścian nieotynkowanych od wewnątrz lub zabezpieczonych jedynie powłoką „farby glinianej” (do najczęstszych rozwiązań należy zastosowanie tynku glinianego) [4].

Technologia *hempcrete* umożliwia również ograniczenie strat ciepła związanych z infiltracją powietrza. Próba szczelności wykonana w eksperymentalnym budynku Uniwersytetu w Bath wykazała, że przy różnicy ciśnienia 50 Pa liczba wymian powietrza na godzinę wyniosła 0,55 [28].

Efektywność energetyczna

Ocenę efektywności energetycznej budynku można wykonać na podstawie symulacji numerycznych na modelach lub przez badania obiektów eksperymentalnych. Symulacje numeryczne w duńskich warunkach klimatycznych dla okresu jednego roku wykazały porównywalne zużycie energii w budynkach o przegrodach z *hempcrete* i z ceramiki izolowanej wełną skalną. Uzyskane wartości były mniejsze niż w przypadku budynku z przegrodami o konstrukcji szkieletowej izolowanej wełną skalną, lecz większe niż w budynku o przegrodach z betonu izolowanego takim samym materiałem termizolacyjnym [34]. Pomiar zużycia energii w eksperymentalnym budynku na Uniwersytecie w Manitoba o ścianach z kompozytu wapienno-konopnego w okresie ok. 4,5 miesiąca wykazał minimalnie mniejszą ilość energii potrzebnej do utrzymania stałej temperatury wewnętrznej, niż w identycznym obiek-

cie o ścianach izolowanych wełną szklaną, pomimo większej infiltracji powietrza przez obudowę [35].

W pracy [36] zaprezentowano wyniki kompleksowych symulacji numerycznych zużycia energii w budynkach, uwzględniając dynamikę warunków brzegowych dla rzeczywistych scenariuszy użytkowania i danych klimatycznych (Vancouver – klimat mokry, łagodny oraz Toronto – mroźna zima, ciepłe lato). Porównano dwa obiekty o ścianach o konstrukcji drewnianej szkieletowej: H (wypełnienie z *hempcrete*, obustronny tynk) oraz C (wypełnienie z wełny szklanej, paroizolacja od wewnątrz; wiatroizolacja, pustka powietrzna i warstwa osłonowa od zewnątrz). Przyjęto ustaloną ilość wymienianego powietrza. Utrzymanie założonej temperatury wewnętrznej wynoszącej $21 \div 24^\circ\text{C}$ w budynku H wymagało zużycia o 1,1% więcej energii niż w budynku C, zimą o 1,8 \div 2,1% więcej (głównie na skutek większego przewodnictwa cieplnego *hempcrete* przy większych wartościach RH), zaś latem o 34,6 \div 37,4% mniej (głównie na skutek większej „masy termicznej” kompozytu). W budynku H w okresie zimowym wystąpiło większe zapotrzebowanie na ciepło, a latem mniejsze zapotrzebowanie zarówno na ciepło, jak i chłód. Gdy przyjęto stałą wartość współczynnika przewodzenia ciepła kompozytu, odpowiadającą 50% RH, zużycie energii w budynkach H i C zrównało się. Przy braku chłodzenia budynków H wykazał o 21,7 \div 26,9% mniej dni z temperaturą wewnętrzną $> 24^\circ\text{C}$. Budynek H w porównaniu z C charakteryzował się większą zdolnością do regulowania wilgotności powietrza (mniejsze dzienne amplitudy, mniejsze wartości maksymalne), bez ryzyka wystąpienia kondensacji międzywarstwowej. Wskazuje to ponownie na możliwość oszczędności energii związanej z wentylacją (nierozpatrywanej w omawianej analizie).

Obliczenia śladu węglowego budynku H uwzględniające zarówno fazę budowy, jak i użytkowania w okresie 50 lat wykazały redukcję emisji gazów cieplarnianych o 23,2 i 9,9% (odpowiednio dla Vancouver i Toronto) w stosunku do budynku C [36].

Podsumowanie

Analiza literatury wskazuje na potencjał technologii *hempcrete* do zwiększenia efektywności energetycznej budynków, szczególnie konstrukcji szkieletowych wykonywanych z wypełnieniem z lekkich materiałów termoizolacyjnych. Mała dyfuzyjność cieplna kompozytu ogranicza przepływ strumienia ciepła w warunkach dużych dobowych wahań temperatury zewnętrznej, a zwiększona pojemność cieplna powoduje efektywne wykorzystanie zysków ciepła oraz utrzymanie stabilnej temperatury wewnętrznej, co umożliwia ograniczenie zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie.

Możliwość projektowania otwartych dyfuzyjnie przegród wraz z dużą dyfuzyjnością i efuzyjnością wilgotnościową kompozytu stanowi potencjał do ograniczania strat energii związanych z wentylacją budynku. Omawiane właściwości przegród z *hempcrete* w dużym stopniu zależą od warstw wykończeniowych, które zarówno regulują wnikanie wilgoci w przegrodę (od wewnątrz i od zewnątrz), jak i zmieniają ich wewnętrzną pojemność cieplną, szczelność oraz możliwość absorpcji promieniowania słonecznego. Technologia *hempcrete* umożliwia także redukcję mostków termicznych i strat ciepła związanych z infiltracją powietrza.

Pewnym ograniczeniem omawianego materiału jest konieczność stosowania dużej grubości przegród w celu spełnienia wymagań określonych przepisami krajowymi. W takim przypadku rozwiązaniem może być dodatkowe izolowanie warstwy kompozytu od zewnątrz materiałem termoizolacyjnym, mając na uwadze, że główne zalety *hempcrete* wynikają z jego bezpośredniego kontaktu ze środowiskiem wewnętrznym budynku.

Do wykazania zalet technologii *hempcrete* w przypadku efektywności energetycznej budynku niezbędne są badania uwzględniające lokalne uwarunkowania klimatyczne oraz wpływ warstw wykończeniowych przegród.

Literatura

- [1] Allin S. *Building with Hemp*. 2nd ed. Ireland: Seed Press; 2012.
- [2] Bevan R, Woolley T. *Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites*. Bracknell: Ihs Bre Press; 2010.
- [3] Stanwix W, Sparrow A. *The Hempcrete Book: Designing and building with hemp-lime*. Green Books; 2014.
- [4] Gołębiwski M. Aspekty zastosowania kompozytów wapienno-konopnych w budownictwie indywidualnych domów mieszkalnych w architekturze proekologicznej. Praca doktorska. Politechnika Warszawska; 2020.
- [5] Brzyski P. Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający zasady zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Praca doktorska. Politechnika Lubelska; 2018.
- [6] Arnaud L, Gourlay E. Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>.
- [7] Collet F, Pretot S. Thermal Conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Constr Build Mater*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>.
- [8] Gołębiwski M, Pietruszka B. Risk of interstitial condensation in outer walls made of hemp-lime composite in Polish climatic conditions. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138489>.
- [9] Piątkiewicz W, Narloch P, Pietruszka B. Influence of hemp-lime composite composition on its mechanical and physical properties. <https://doi.org/10.24425/ace.2020.134409>.
- [10] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete („hempcrete”) manufactured by a projection process. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.
- [11] Benfratello S, Capitano C, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G, Sorrentino G. Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>.
- [12] Walker R, Pavia S, Mitchell R. Mechanical properties and durability of hemp – lime concretes. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.
- [13] Walker R, Pavia S. Moisture transfer and thermal properties of hemp – lime concretes. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>.
- [14] Collet F, Chamoin J, Pretot S, Lanos C. Comparison of a hygric behaviour of three hemp concretes. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.
- [15] Evrard A. *Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp material*. Thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain; 2008.
- [16] Daly P, Ronchetti P, Woolley T. *Hemp Lime Bio-composite as a Building Material in Irish Construction* STRIVE Report 2009-ET-DS-2-S2. Environmental Protection Agency. Ireland; 2009.
- [17] Boutin M-P, Flamin C, Quinton S, Gosse G. *Analyse du cycle de vie de: Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et, Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois*. Lille; 2015.
- [18] Pervaiz M, Sain MM. Carbon Storage Potential in Natural Fibre Composites. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8).
- [19] Hirst E. *Characterisation of Hemp-Lime as a Composite Building Material*. Ph. D. thesis. University of Bath; 2013.
- [20] Arehart JK, Nelson WS, Sruar WV. On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>.
- [21] Mendes N, Winkelmann FC, Lamberts R, Philippi PC. Moisture effects on conduction loads. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00171-8).
- [22] Evrard A, de Herde A, Minet J. Dynamical interactions between heat and mass flows in lime-hemp concrete. Third International Building Physics Conference. Montreal; 2006.
- [23] Kinnane O, McGranaghan G, Walker R, Pavia S, Byrne G, Robinson A. Experimental investigation of thermal inertia properties in hemp-lime concrete walls. Proceedings of the 10th Conference on Advanced Building Skins. Bern; 2015.
- [24] Pawłowski K. *Analiza ścian zewnętrznych i ich złączy w aspekcie cieplno-wilgotnościowym*. Aparatura badawcza i dydaktyczna. 2010; 2: 15-22.
- [25] Grudzińska M, Brzyski P. The Occurrence of Thermal Bridges in Hemp-Lime Construction Junctions. <https://doi.org/10.3311/PPci.13377>.
- [26] Brzyski P, Grudzińska M, Majerek D. Analysis of the Occurrence of Thermal Bridges in Several Variants of Connections of the Wall and the Ground Floor in Construction Technology with the Use of a Hemp-Lime Composite. <https://doi.org/10.3390/ma12152392>.
- [27] Haglund B, Rathmann K. *Thermal mass in passive solar and energy-conserving buildings*. Vital Signs Curriculum Materials Project. Berkeley; 1996.
- [28] Shea A, Lawrence M, Walker P. Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>.
- [29] Maalouf C, Tran Le AD, Umurigirwa SB, Lachi M, Douzane O. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>.
- [30] Knaack U, Koenders E (red.). *Building Physics of The Envelope*. Basel: Birkhäuser; 2018.
- [31] Woloszyn M, Kalamees T, Abadie MO, Steeman M, Kalagasis AS. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>.
- [32] Rode C, Peuhkuri R, Tíme B, Svennberg K, Ojanen T. Moisture Buffer Value of Building Materials. <https://doi.org/10.1520/STP45403S>.
- [33] Tran Le A, Maalouf C, Mai TH, Wurtz E, Collet F. *Transient Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016>.
- [34] Antonov Y, Jensen RL, Pomianowski M. *Hemp-Lime Performance in Danish Climatic Context*. Thermal Conductivity as a Function of Moisture Content. CLIMA 2016 – proceedings of the 12th REHVA World Congress vol. 2. Aalborg; 2006.
- [35] Pinkos J. *The Effectiveness of Hempcrete as an Infill Insulation in the Prairies Compared to a Standard Building Based on Power Consumption*. M. Sc. thesis. University of Manitoba; 2014.
- [36] Shang Y, Tariku F. *Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108377>.

Przyjęto do druku: 13.12.2022 r.