

dr inż. Jarosław Strzałkowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-7001-9303

inż. Wojciech Stawowy¹⁾

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszyczaruk^{1)*}

ORCID: 0000-0003-0840-5048

Wpływ spoiwa na strukturę i właściwości mechaniczne kompozytów konopnych o dużej zawartości spoiwa

Effect of binder on the structure and mechanical properties of hemp composites with a high binder content

DOI: 10.15199/33.2023.06.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu spoiwa cementowego i wapiennego na strukturę i wytrzymałość kompozytów, w których jako kruszywo zastosowano paździerz konopne. Celem badań było uzyskanie lekkiego kompozytu o klasie wytrzymałości na ściskanie zbliżonej do najniższej klasy wytrzymałości betonu lekkiego LC8/9. Jak pokazały przeprowadzone badania, zastosowanie paździerzy konopnych jako zamiennika kruszywa pozwala na uzyskanie kompozytów konopnych o wytrzymałości na ściskanie ok. 10 MPa. Poprawa właściwości mechanicznych betonów konopnych wymagała jednak znacznego zwiększenia ilości spoiwa. Zastosowanie dodatku wapna jako mineralizatora wpływa pozytywnie na kształtowanie strefy kontaktowej paździerz – spoiwo.

Słowa kluczowe: beton konopny; paździerz konopne; wytrzymałość na ściskanie; strefa kontaktowa.

Abstract. The paper analyses Portland cement and lime's impact on the structure and strength of the composites containing hemp shives as an aggregate. The research aim was to obtain a lightweight material with a compressive strength class close to the lowest strength class of lightweight concrete, i.e. LC8/9. The tests show that using the hemp shives as the aggregate's substitute allows for manufacturing the hemp composite with a compressive strength of about 10 MPa. However, improving the composite's mechanical performance has required substantially increasing the binder's volume. Using lime as a mineraliser positively shapes the contact zone between hemp shives and binder.

Keywords: hemp concrete; hemp shives; compressive strength; interfacial transition zone.

Materiałem naturalnym stosowanym jako zamiennik kruszywa w kompozytach wapiennych i cementowych mogą być konopie włókniste (*Cannabis sativa L.*) zwane również konopiami siewnymi lub przemysłowymi. Włókna konopne, które znalazły nowe zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, odzieżowym czy budowlanym, stanowią 20 – 35% masy łądygi [1], podczas gdy surowych materiałów na bazie zdrewniałego rdzenia sekcji łądygi (paździerzy konopnych) jest średnio dwa razy więcej i kosztują one połowę mniej niż surowe włókna konopne [2]. Badania nad zastosowaniem konopi w materiałach budowlanych koncentrują się na betonie konopnym jako tzw. zielonym betonie, w którym paździerz konopne są zamiennikiem kruszywa mi-

neralnych i stosowane ze spoiwem (głównie wapnem) oraz rzadziej z dodatkowymi związkami [3 – 5]. Prekursorem zastosowania betonu konopnego w Unii Europejskiej na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku była Francja [6]. Beton konopny zaczął być stosowany jako wypełnienie izolacyjne w ścianach, w płytach do izolacji podłóg i dachów oraz materiał do wykonywania tynków [7 – 9].

W Polsce wzrost zainteresowania zastosowaniem konopi do wyrobu materiałów budowlanych spowodowany jest nie tylko zwiększeniem świadomości ekologicznej społeczeństwa, ale także ilości upraw konopi przemysłowych [10]. Beton konopny popularnie nazywany hempcrete (nazwa pochodzi z języka angielskiego od słów „hemp” – czyli konopie oraz „concrete” – czyli beton), to materiał, który wpisuje się w trend wykorzystywania odnawialnych zasobów. Hempcrete jest materiałem naturalnym i ekologicznym, ponieważ po zakończeniu użytkowania w pełni pod-

lega recyklingowi. Ponadto w porównaniu z innymi wyrobami budowlanymi jego produkcja jest mniej energochłonna. W Polsce wykonuje się całe domy w szkielecie drewnianym z wykorzystaniem betonu konopnego. Przykładem najnowszych rozwiązań mogą być modułowe domy kopułowe z betonu konopnego [11]. Paździerz konopne wykorzystywane w połączeniu ze spoiwem wapiennym i wodą stanowią świetne wypełnienie ścian jako naturalny materiał izolacyjny o średniej gęstości i współczynniku przewodności cieplnej λ poniżej 0,1 W/m·K [12]. Cechuje się również bardzo dobrą izolacyjnością akustyczną [13, 14], natomiast wadą betonu konopnego jest mała wytrzymałość mechaniczna. Wytrzymałość na ściskanie przy udziale paździerzy konopnych, średnio 80% objętości betonu, nie przekracza zwykle 1 MPa. Jednym z rozwiązań, które umożliwiają zwiększenie tego parametru, jest zastosowanie cementu jako spoiwa oraz zwiększenie jego ilości. W celu osiągnięcia przez be-

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska;

^{*}) Adres do korespondencji: elzbieta.horszyczaruk@zut.edu.pl

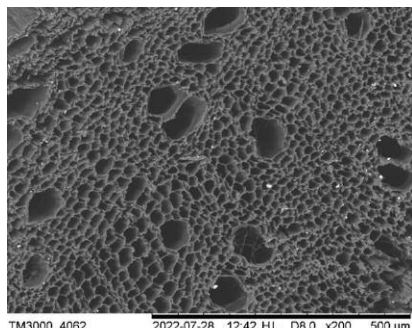
ton konopny wytrzymałości porównawczej do cegły ceramicznej należy użyć do formowania elementów prasy wysokociśnieniowej [15].

Celem badań było uzyskanie kompozytu konopnego o wytrzymałości zbliżonej do najniższej klasy betonu lekkiego LC8/10. Na podstawie danych z literatury zaprojektowano betony konopne na bazie cementu, wapna oraz mieszanki wapna i cementu przy zwiększonym udziale spoiwa w kompozycie. Współczynnik spoiwo/konopie s/k w badanych betonach wyniósł 5,3 (wagowo). Wartość tego współczynnika przyjęto na podstawie próbnych badań betonów konopnych na bazie cementu o $s/k = 4,0 - 5,5$. Wyniki badań porównano z betonem konopnym o „tradycyjnym” składzie i współczynniku spoiwo/konopie równym 2,0. Analizie poddano również strefę kontaktową paździerz – spoiwo.

Zastosowane materiały i metoda badań

Zaprojektowano 4 różne betony konopne (*ang. hemp concrete, HC*), w których jako kruszywo zastosowano paździerz konopne (*ang. hemp shives, HS*) otrzymane z polskiej odmiany konopi siewnych. Po wysuszeniu, przesianiu i odpyleniu uzyskano produkt w postaci paździerzy konopnych o uziarnieniu 0,5 – 16 mm, a największy udział (66,2%) stanowiła frakcja 4 – 10 mm. Średnia gęstość nasypowa paździerzy wyniosła 98 kg/m³. Analiza paździerzy z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej SEM potwierdziła ich włóknistą i porowatą strukturę (fotografia 1).

Do wykonania HC użyto dwóch spoiw: wapna hydratyzowanego CL 90-S oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. W składzie mieszank HC wykonanych



Fot. 1. Zdjęcie SEM paździerzy konopnych
Photo 1. SEM image of hemp shives

na spoiwie cementowym zastosowano sodowe szkło wodne (ST) w ilości 2% objętości wody całkowitej w celu mineralizacji HS. Aby poprawić urabialność mieszank HC z cementem, dodano superplastyfikator (SP) na bazie eteru polikarboksylogowego. Betonem porównawczym był beton na spoiwie cementowym H0, którego skład został opracowany na podstawie danych zawartych w pracy [16]. Współczynnik spoiwo/konopie (wagowo) tego betonu wyniósł 2,0, a udział HS w całej objętości kompozytu 15%. W celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej pozostałych trzech betonów, zgodnie z badaniami [15], zwiększono współczynnik spoiwo/konopie do 5,3. Proporcje składników mieszank HC oraz wyniki pomiarów gęstości objętościowej HC zestawiono w tabeli.

Proporcje składników i gęstość objętościowa badanych betonów konopnych

Proportions of components and apparent densities of the tested hemp concretes

Oznaczenie betonu	Spoiwo (masowo)	Spoiwo/konopie (masowo)	Woda/spoiwo (masowo)	SP (% masy cementu)	ST (% masy cementu)	Gęstość objętościowa [kg/m ³] w stanie:	
						naturalnym	suchym
HC0	100% C	2,0	1,3	1,5	2,0	637	382
HC1	100% W	5,3	0,7	–	–	1138	655
HC2	30% W 70% C	5,3	0,7	1,5	–	1292	988
HC3	100% C	5,3	0,7	1,5	2,0	1304	1026

C – cement; W – wapno; SP – superplastyfikator; ST – szkło wodne

Mieszanki HC wykonano zgodnie z procedurą podaną w pracy [16]. Paździerz konopne mieszano przez 1 min w mieszarce laboratoryjnej w celu rozbicia aglomeratów. Następnie dolano 1/3 wody i mieszano przez 3 min. W kolejnym etapie dodano spoiwo i mieszano przez minutę oraz pozostałą ilość wody wraz z superplastyfikatorem (w przypadku mieszank z cementem) i mieszano przez 2 min. Tak powstałą mieszankę układano w formach sześciennych o boku 100 mm i zagęszczano na stoliku wibracyjnym. Z każdej serii wykonano po 6 próbek. Po 48 h próbki rozformowano i przechowywano w komorze klimatycznej o wilgotności 50% w temperaturze 20±2°C do czasu badania wytrzymałości. Przed badaniem (po 28 i 56 dniach) próbki zostały umieszczone na 48 h w suszarce w temperaturze 50°C, aby zapobiec zakłóceniu pomiarów właściwości mechanicznych przez wodę nasycającą, zgodnie z zaleceniami [17]. Próbki do wyznaczenia gęstości objętościowej były sezo-

nowane razem z próbkami do badań wytrzymałościowych. Po 28 dniach sezonowania suszono je w suszarce laboratoryjnej do stałej masy i poddano badaniu, a następnie te same próbki wykorzystano do badań SEM.

Wytrzymałość na ściskanie próbek HC była badana po 28 i 56 dniach dojrzewania zgodnie z PN-EN 826 [18] na maszynie wytrzymałościowej o maksymalnym obciążeniu 100 kN. Wytrzymałość próbek oznaczono z dokładnością 0,1 MPa.

Mikrostrukturę i morfologię powierzchni próbek paździerzy konopnych analizowano z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Hitachi TM 3000. Analizę SEM wykorzystano również przy ocenie strefy kontaktu między HS a spoiwem betonów HC oraz do oceny porów

powstałych w poszczególnych kompozytach HC. Do badań przygotowano próbki HC o powierzchni ok. 2 cm² i grubości do 3 mm. Następnie napyłono je złotem w komorze próżniowej, w celu zwiększenia przewodności elektrycznej powierzchni poddanej testom. Zdjęcia SEM wykonano w zakresie powiększeń 100 – 500 razy.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań gęstości objętościowej HC zestawiono w tabeli. Zastosowanie paździerzy konopnych jako kruszywa pozwoliło na znaczne zmniejszenie gęstości objętościowej badanych HC w porównaniu z betonem zwykłym. Nawet po zwiększeniu ilości spoiwa przeszło 2,5-krotnie (spoiwo w HC1, HC2 i HC3 stanowiło ok. 40% objętości kompozytu), jego gęstość objętościowa w stanie naturalnym była prawie dwukrotnie mniejsza niż betonu zwykłego.

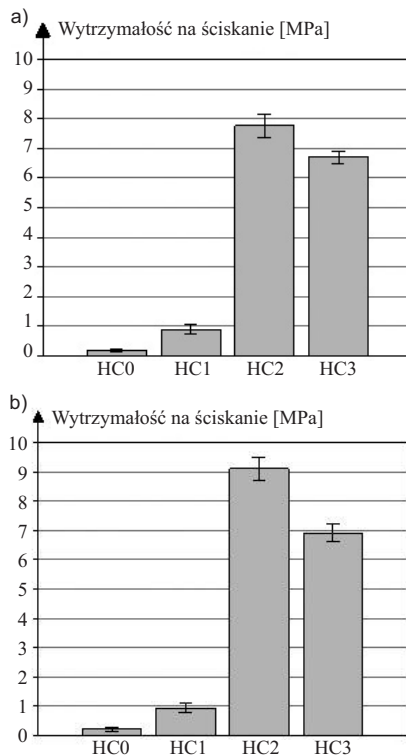
Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie włóknistych kompozytów cementowych, do których zaliczamy betony ko-

nopne, jest zagadnieniem bardzo złożonym. Jak wynika z badań [14, 19] nie można jednoznacznie określić naprężeń niszczących ściskane próbki, na podstawie których można obliczyć wytrzymałość na ściskanie kompozytu konopnego. Podobnie jak w betonach cementowych w pierwszej fazie obciążenia kompozyty konopne zachowują się sprężysto, a poziom odkształceń jest niewielki. W drugiej fazie odkształcenia gwałtownie się zwiększają przy wzroście naprężeń. Następuje zerwanie sił przyczepności pomiędzy paździerzami a spoiwem, a paździerz kompresują się, eliminując pory powietrzne powstałe w trakcie wykonywania próbek [14]. W prowadzonych badaniach przyjęto w przypadku większości betonów zwiększony udział spoiwa w objętości kompozytu (z wyjątkiem próbek HC0) i stałą wartość odkształcenia na poziomie 2,5%, przy którym oznaczono wytrzymałość na ściskanie badanych HC. Jak wynika z badań [20], odkształcenia przy ściskaniu, w zależności od składu badanych betonów konopnych, mogą osiągać wartość nawet 10–20%. Ograniczenie wartości odkształceń w badaniach do 2,5% wynikało z planowanego zastosowania badanych betonów do produkcji prefabrykatów.

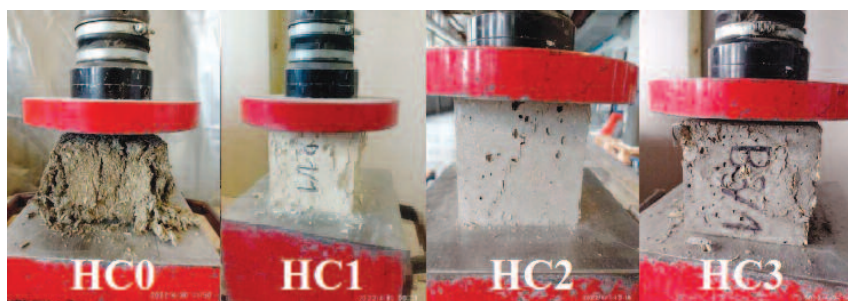
Na rysunku zestawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek betonów HC po 28 i 56 dniach dojrzewania. Największą wytrzymałość na ściskanie uzyskano w przypadku próbek HC2 na spoiwie cementowo-wapiennym. Ich średnia wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach wyniosła 9,1 MPa. W porównaniu z wytrzymałością po 28 dniach (7,8 MPa) uzyskano wzrost o 16,7%. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach uzyskały próbki HC0 – 0,23 MPa, a przyrost wytrzymałości w porównaniu z wytrzymałością po 28 dniach (0,19 MPa) wyniósł 11,5%.

Przy dużej zawartości HS w objętości próbki, zastosowane spoiwo skleja paździerz między sobą, a cienka warstwa spoiwa nie jest wystarczająca do przeniesienia obciążenia. Próbki HC0 rozpadają się po przyłożeniu niewielkiego obciążenia. W przypadku betonów konopnych zawierających większą ilość spoiwa (HC1, HC2 i HC3) zaobserwowano inny rodzaj zniszczenia niż w przypadku próbek betonu HC0 zawierającego 85% HS w swojej

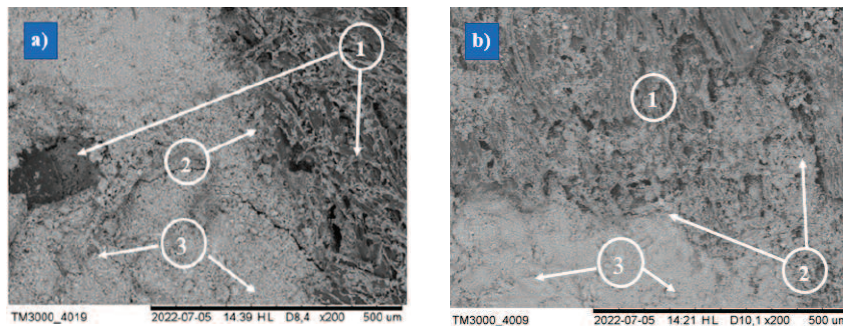
objętości. Rysy na próbkach przy ściskaniu pojawiały się równoległe do kierunku ściskania, a próbki po zakończeniu badania zachowywały swój kształt i nie rozsypywały się tak, jak próbki HC0 (fotografia 2).



Wytrzymałość na ściskanie betonów konopnych: a) po 28 dniach, b) po 56 dniach
Compressive strength of hemp concrete: a) after 28 days, b) after 56 days



Fot. 2. Obraz próbek HC uszkodzonych po badaniu wytrzymałości na ściskanie
Photo 2. Image of damaged HC samples after the compressive strength test

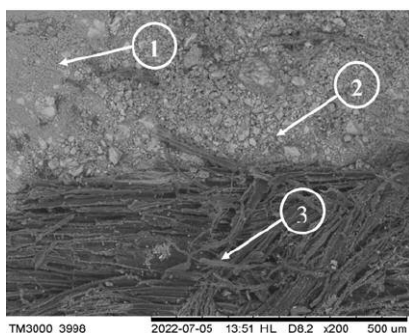


Fot. 3. Zdjęcia SEM betonów konopnych: a) HC1; b) HC2; 1 – HS; 2 – ITZ; 3 – spoiwo
Photo. SEM image of hemp concrete: a) HC1; b) HC2; 1 – HS; 2 – ITZ; 3 – binder

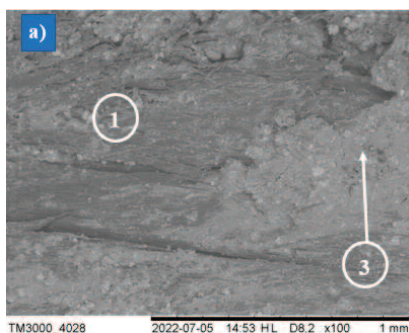
Beton HC3 na bazie cementu uzyskał o 13,7% i 25% mniejszą wytrzymałość na ściskanie po 28 i 56 dniach niż beton HC2. Można to tłumaczyć zwiększonym zapotrzebowaniem na wodę cementu, który ma większą powierzchnię właściwą niż wapno. Przyrost wytrzymałości na ściskanie próbek HC3 po 56 dniach wyniósł tylko 4% w porównaniu z wytrzymałością po 28 dniach. Powodem nieznacznego zwiększenia wytrzymałości po 56 dniach jest zastosowanie cementu CEM 42,5R.

Analizę mikrostruktury próbek HC przeprowadzono za pomocą SEM. W próbkach HC1 i HC2 wyraźnie można wyodrębnić strefę kontaktową (ITZ) między HS a spoiwem (fotografia 3). Na granicy SH – spoiwo często widoczne są wyraźne pory, których szerokość dochodzi do 50 μm . W przypadku próbek HC3 wykonanych z dużą ilością cementu obserwowana szerokość ITZ była prawie dwukrotnie większa niż próbek HC1 i HC2 (fotografia 4).

Próbki HC0, których obrazy SEM pokazano na fotografii 5, wykazały nieco odmienną strukturę od pozostałych badanych betonów HC. W obrazach SEM nie wyodrębniono wyraźnej strefy kontaktowej pomiędzy HS a zaczynem cementowym. Stwierdzono bardzo dużą porowatość w obszarze paździerz HS



Fot. 4. Zdjęcie SEM próbki HC3: 1 – zaczyn cementowy; 2 – ITZ; 3 – HS
 Photo 4. SEM image of HC3 specimen: 1 – cement paste; 2 – ITZ; 3 – HS



Fot. 5. Zdjęcie SEM próbki HC0: 1 – HS; 2 – pustka powietrzna; 3 – zaczyn cementowy
 Photo 5. SEM image of HC0 specimen: 1 – HS; 2 – air void; 3 – cement paste

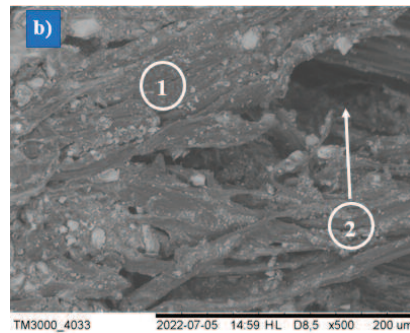
(fotografia 5b), co może być spowodowane brakiem prasowania ciśnieniowego. Z najnowszych badań [21] wynika, że właściwości mechaniczne betonów konopnych są gorsze niż niektórych innych materiałów, ponieważ międzyfazowa strefa przejściowa (ITZ) wokół paździerzki nie ulega hydratacji, jak reszta matrycy, ze względu na obecność cukrów i innych ekstraktów. Domieszka szkła wodnego okazała się niewystarczającym mineralizatorem w przypadku betonów HC0 i HC3 z cementem. Dodatek wapna degraduje hemicelulozę zawartą we włóknach i skutecznie wzmacnia połączenie cement – paździerz [22].

Podsumowanie

Celem badań było przeanalizowanie, jak wpływa rodzaj i ilość spoiwa na właściwości mechaniczne betonów konopnych. Analizowano wytrzymałość na ścislenie oraz strukturę kompozytów konopnych, a przede wszystkim strefę kontaktową paździerz – spoiwo. Przeprowadzone badania pokazały, że zwiększenie ponad 2,5-krotne ilości spoiwa w kompozycie konopnym pozwala uzyskać wytrzymałość na ścislenie zbliżoną do naj-

niższej klasy lekkich betonów kruszywowych LC8/9. Należy podkreślić, że wszystkie badane betony konopne wykonano z zastosowaniem zagęszczenia tylko na stoliku wibracyjnym bez prasowania ciśnieniowego. Największą wytrzymałość na ścislenie uzyskał kompozyt na bazie spoiwa cementowo-wapiennego.

Analiza SEM strefy kontaktowej paździerz – spoiwo wykazała istotne różnice w jej szerokości oraz morfologii (porowatość) w przypadku poszczególnych próbek betonów konopnych. W betonie z dużą ilością spoiwa cemen-



towego zaobserwowano prawie dwukrotnie szerszą strefę kontaktową niż w betonach ze spoiwem wapiennym. Dodatek wapna pozwala na neutralizację pektyn zawartych w paździerzach konopnych i wzmacnia połączenie włókno – spoiwo. Jak pokazały przeprowadzone badania, zastosowanie paździerzki konopnych, jako zamiennika kruszywa, pozwala na uzyskanie kompozytów konopnych o wytrzymałości na ścislenie ok. 10 MPa. Poprawa właściwości mechanicznych betonów konopnych wymaga jednak znacznego zwiększenia ilości stosowanego spoiwa, co niewątpliwie wpłynie na pogorszenie właściwości izolacyjnych kompozytu.

Literatura

- [1] Ingrao C, Giudice A. L., Bacenetti J, Tricase C, Dottelli G, Fiala M, Siracusa V, Mbohwa C. Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002>.
- [2] Amaducci S, Scordia D, Liu FH, Zhang Q, Guo H, Testa G, Cosentino SL. Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Ind. Crop. Prod.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>.
- [3] Brzyski P, Gładki 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.* 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13235383>.

[4] 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; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>.

[5] Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>.

[6] Allin S. *Building with Hemp*, second ed., Seed Press. 2012. Ireland.

[7] Klementowski I, Pochwała S, Król A. Beton konopny do zastosowania w zrównoważonym budownictwie. *Materiały Budowlane.* 2020. 12: 16 – 17.

[8] Kosiński P, Brzyski P, Tunkiewicz M, Suchorab Z, Wiśniewski D, Palczyński P. Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction. *Ind. Energies.* 2022; <https://doi.org/10.3390/en15072461>.

[9] Latif E, Lawrence M, Shea A, Walker P. Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Build. Environ.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>.

[10] Wielgus K. *Uprawa konopi włóknistych i oleistych.* Centrum Doradztwa Technicznego w Brwinowie, 2020.

[11] Bies D. *Ekologiczne kopuły do mieszkania. Modułowe domy z betonu konopnego.* 2023; <https://www.architekturaibiznes.pl/modulowe-domy-kopulowe,24940.html>.

[12] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete („hemperete”) manufactured by a projection process. *Constr. Build. Mater.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.

[13] Glé P, Gourdon E, Arnaud L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Appl. Acoust.* 2011; <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>.

[14] Brzyski P, Gładki 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.* 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13235383>.

[15] Tronet P, Lecompte T, Picandet V, Baley C. Study of lime hemp concrete (LHC) e Mix design, casting process and mechanical behaviour. *Cem. Conc. Comp.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>.

[16] Gourlay E, Glé P, Marceau S, Foy C, Moscardelli S. Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Constr. Build. Mater.* 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>.

[17] Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>.

[18] PN-EN 826:2013. *Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie – Określanie zachowania przy ścisaniu.*

[19] Williams J, Lawrence M, Walker P. The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime. *Constr. Build. Mater.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109>.

[20] Piątkiewicz W, Narloch 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.

[21] Delhomme F, Prud'homme E, Julliot C, Guillot T, Amziane S, Marceau S. Effect of hemp on cement hydration: Experimental characterization of the interfacial transition zone. *Results in Chemistry.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100440>.

[22] Sedan D, Pagnoux C, Kowalski A, Chotard T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>.

Przyjęto do druku: 30.05.2023 r.