

dr inż. arch. Michał Gołębiewski^{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: 10.15199/33.2023.09.04

Streszczenie. Kompozyt wapienno-konopny (hemcrete) stosowany jest w budownictwie od ponad 30 lat. Głównymi jego zaletami są właściwości ciepłno-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 (hemcrete) 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]. Mieszanka paździerza, wapna hydratyzowanego (najczęściej modyfikowanego cementem, wapnem hydraulicznym i pucolanami) oraz wody tworzy kompozyt wapienno-konopny (hemcrete), 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

względu 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 Łądowej

^{*}) Adres do korespondencji: michal.golebiewski@pw.edu.pl

wynosi $89 \div 148\%$ [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 hemprete 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 nasycaniu 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 biologiczna	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.

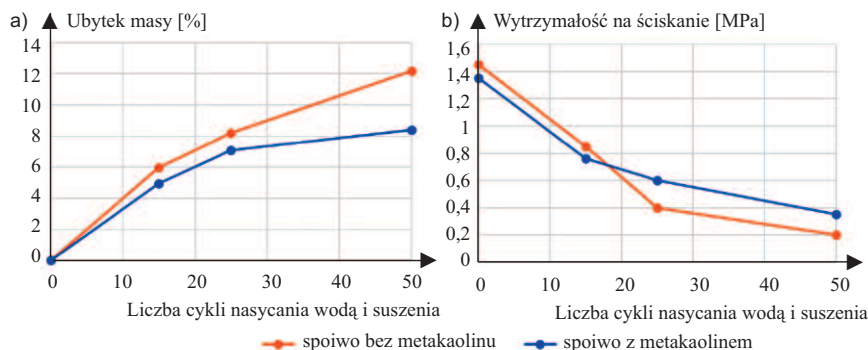
Podobna ocena trwałości została zastosowana w pracy [21]. Badanie obejmowało cykle składające się z nasycania próbek wodą przez 48 h, a następnie suszenia w temperaturze 50°C przez 72 h. Zaobserwowano zmiany mikrostrukturalne, spowodowane zjawiskami pęcznienia i skurczu oraz słabą przyczepnością paździerzki do spoiwa. Zmierzony współczynnik rozszerzalności materiału wyniósł 0,95 (% ϵ /%w), czyli znacznie więcej niż współczynnik rozszerzalności drewna (ok. 0,4 % ϵ /%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 sezonowania [dni]	liczba cykli	średnia wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych [MPa]	średnia wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych wszystkim cyklom [MPa]	zmiana wytrzymałości
[20]	Tradical PF70*	37% 11% 52%	530 (po 28 dniach)	28	250	50	1,45	0,20	-86%
	80% Tradical PF70*, 20% Metakaolin	35% 11% 54%	520 (po 28 dniach)				1,35	0,35	-74%
[21]	Tradical PF70*	34% 16% 50%	nie podano	–	40	8	0,94	0,46	-51%
[22]	Naturalny cement	17% 33% 50%	nie podano	–	220	20	ok. 0,5	ok. 0,3	ok. -40%
	Vicat Prompt	16% 32% 47%**			260		ok. 1,25	ok. 0,95	ok. -24%

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



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 paździerzy 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 uwidoczniała, że mikrostruktura kompozytu została uszkodzona, a duża część spoiwa wypłukana, zwiększając porowatość i umożliwiając większą absorpcję wody przez paździerz. Próbki 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. Próbki sezonowano 7 dni w formach, 83 dni w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej

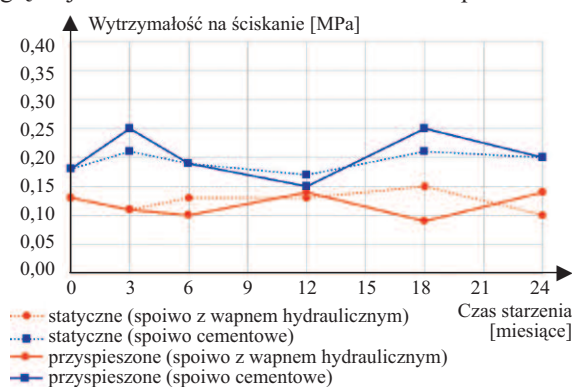
$50 \pm 10\%$ oraz przez 10 dni suszono w temperaturze 40°C . Następnie poddano je ośmiu cyklom zmiany wilgotności otoczenia pomiędzy 40 a 90/98% przy stałej temperaturze 30°C . Po 75 dniach testu gęstość próbek nieznacznie zwiększyła się, a porowatość zmniejszyła, co wytłumaczono postępującą hydratacją spoiwa, karbonatyzacją oraz spęcznieniem 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%. Próbki badano po utwardzeniu oraz po 3, 6, 12, 18 i 24 miesiącach starzenia. Badaniem poddano dwie serie próbek 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 róż-

nych warunków kondycjonowania próbek nie zaobserwowano istotnej zmiany wytrzymałości na ściskanie w długim okresie (rysunek 2). Próbki zawierające spoiwo cementowe uzyskały większą wytrzymałość w porównaniu z pozostałymi analizowanymi.

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 paździerzy konopnych. W badaniu [20] przy długim czasie sezonowania/wielu cyklach nasycania, próbki bez metakaolinu (tabela 2) wykazały niebezpiecznie wysoki współczynnik $\text{pH} = 13,0$ (pH próbek referencyjnych 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 poro-



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie próbek hempcrete w funkcji czasu badania [24]

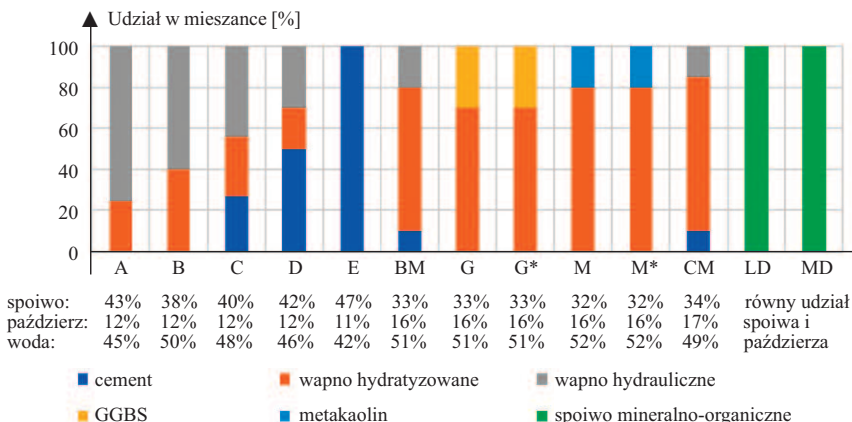
Fig. 2. Compressive strength of hempcrete samples as a function of test time [24]

wego: w wyniku cykli 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 kompozycie z metakaolinem [20]. Inne wyniki prezentuje praca [21], gdzie próbki poddane i niepoddane cykлом postarzania (tabela 2) wykazały podobną wartość pH, odpowiednio 11,64 i 11,84.

W pracy [29] wykonano pomiary pH kompozytów niepoddawanych cyklem postarzania. W przypadku materiałów o zróżnicowanych proporcjach komponentów, spoiwie i gęstości otrzymano zbliżone wyniki w zakresie 11,74 ÷ 12,32. Natomiast w badaniu [23] w kompozytach, w których zastosowano spoiwo z cementu naturalnego, zauważono spadek współczynnika pH z 10,4 ÷ 10,5 do 9,2 ÷ 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. Próbki 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).

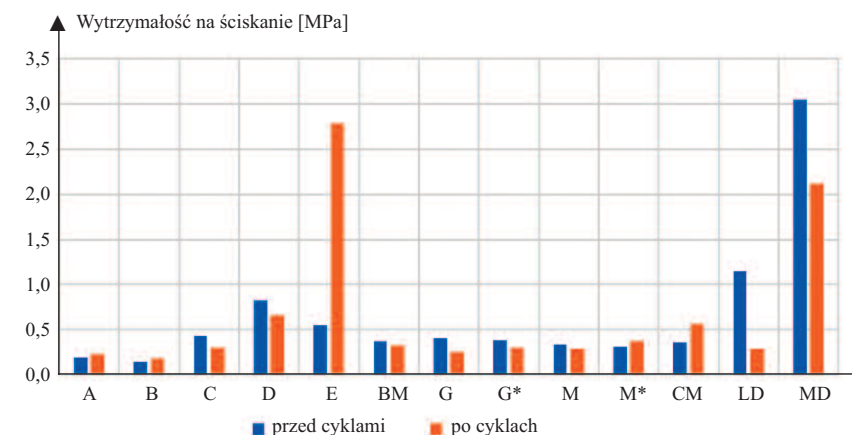
W badaniu [26] wykorzystano normę EN 15304:2010 dotyczącą autoklawizowanego betonu komórkowego. Pomiar wytrzymałości na ściskanie próbek wykonano po poddaniu ich dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania w temperaturze od -15 do 20°C, z jednoczesnym nasycaniem wodą (początkowo przez 48 h do uzyskania 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% CO₂) [27] i dziewięćmiesięczne [26].



Symbole A, B, C, D, E, BM, G, G*, M, M*, CM, LD, MD – oznaczenia próbek o różniącym się składzie

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 retainers)*



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-pucolanowymi (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 wapna hydratyzowanego 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 wytłumaczono 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 i 640 kg/m³. Procedura badania wg normy EN 321 dotyczącej płyt drewnopochodnych składała się z 3 cykli obejmujących: zanurzenie w wodzie o temperaturze 20 ± 1°C na 70 h, zamrożenie w temperaturze -20 ± 5°C przez 24 h, wysuszenie w temperaturze 70 ± 2°C przez 70 h, kondycjonowanie w temperaturze 23 ± 2°C i wilgotności względnej 50 ± 5% przez 4 h. 28 dni po zakończeniu cykli 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 spoiwo – 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 w zastosowaniu termoizolacyjnym [28]. Testy wytrzymałości na rozciąganie i zginanie kompozytu o gęstości 1210 kg/m³ 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). Próbki 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 cyklem 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 po 14 lub 120 dniach 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/m³ oraz 3 kompozyty o proporcjach odpowiednio 53; 10; 37%: HC1 – 655 kg/m³ (100% wapna hydratyzowanego), HC2 – 988 kg/m³ (60% wapna hydratyzowanego i 40% cementu) oraz HC3 – 1026 kg/m³ (100% cementu). 1,5% masy spoiwa w kompozytach zawierających cement stanowił superplastyfikator. 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 wymywana 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 $44,2 \div 76,8\%$. 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 paździerz 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 wypłukiwanie zarówno nieorganicznych, jak i organicznych składników kompozytu, przy czym w pierwszym przypadku dodatek kwasu poliakrylowego zmniejszył ten efekt. Podczas zanurzania 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 waterytu – szczególnie w próbkach narażonych na bardziej wilgotne warunki, co sugeruje, że niewystarczająca ilość wody nie jest jedyną przyczyną dużego występowania waterytu. 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 węglanu 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 wodożądność 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 wbudowywany w strefie przemarzania, test mrozoodporności ma szczególne znaczenie przy określaniu trwałości materiału. Zaleca się, aby przeprowadzić badania mrozoodporności, które uwzględniają 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 chlorku 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/rilemtechlett.v1.9.
- [3] Cierpucha W. (red.) Technologia uprawy i przetworstwa konopi włóknistej. Poznań: IWNiRZ; 2013.
- [4] Khan BA, Wang J, Warner P, Wang H. Antibacterial Properties of Hemp Hurd Powder against E. Coli. Journal of Applied Polymer Science. 2015; DOI:10.1002/app.41588.
- [5] Gołębiwski M. Kompozyty konopno-wapienne (Hempcrete). Materiały Budowlane. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.07.29.
- [6] Barbhuiya S, Bhusan 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] Gołębiwski 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, 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.
- [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] Gołębiwski 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] Arehart JH, Nelson WS, Srubar 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] Stanwix W, Sparrow A. The Hempcrete Book: Designing and Building with Hemp-Lime. Green Books; 2014.
- [16] Gołębiwski 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, Diafi D, Nour I, Amziane S, Farcas F. Aging of Hemp Shiv 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, Chamoin 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] Zerrouki R, Benazzouk A, Courty M, Ben Hamed H. 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. 2022; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127389.
- [21] Benmahiddine F, Bennai F, Cherif R, Belarbi R, Tahakourt A, Abahri 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 I, Cultrone G. 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. 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, Sandin 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, Manzi 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] Horszczaruk E, Strzałkowski J, Głowacka A, Paszkiewicz O, Markowska-Szczupak 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)00092-5.
- [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, 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 and Buildings. 2014; DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.033.
- [36] Shirakawa MA, Tavares RG, Gaylarde CC, Taqueda MES, 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] Sedan D, Pagnoux C, Chotard T, Smith A, Lejolly D, Gloaguen V, Krausz 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, Diafi D, Amziane S, Farcas F. Impact of Hemp Shiv 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, Kubiś M, Łapka P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. Materials. 2020; DOI: 10.3390/ma13235383.

Przyjęto do druku: 10.08.2023 r.