

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszcharuk<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0003-0840-5048  
 mgr inż. Piotr Rychtowski<sup>2)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-7317-3012  
 prof. dr hab. inż. Paweł Łukowski<sup>3)\*)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-4636-1034

# Właściwości mechaniczne i struktura betonów konopnych w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury

## *Mechanical performance and structure of hemp concrete exposed to high temperature*

DOI: 10.15199/33.2023.05.01

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę wpływu wysokiej temperatury na wytrzymałość mechaniczną i strukturę betonów konopnych. Jako kruszywo zastosowano paździerz konopne. Ich udział objętościowy w betonach był stały – współczynnik spoiwo/konopie wynosił 1,3. Betony wykonano przy użyciu trzech różnych spoiw: wapiennego, cementowo-wapiennego i cementowego. Program badawczy obejmował badania wytrzymałości na ściskanie i ubytku masy próbek betonów konopnych po wygrzewaniu w piecu do temperatury 450°C. Wykonano również analizę termogravimetryczną paździerzy i badanych betonów. Wykazano, że wytrzymałość betonów konopnych w temperaturze 450°C i wyższej zależy od zastosowanego spoiwa.

**Słowa kluczowe:** beton konopny; paździerz konopne; wysoka temperatura; wytrzymałość na ściskanie.

**Abstract.** The paper presents an analysis of the influence of high temperature on the mechanical strength and structure of hemp concrete. Hemp shives were used as an aggregate. The volumetric content of the hemp shives in concrete was constant; the binder-to-hemp shives ratio was 1.3. Concrete specimens were prepared using three types of binders: lime, cement-lime and Portland cement. The research program covered testing the concrete's compressive strength and mass loss after heating up to 450°C. The thermogravimetric analysis of the hemp shives and tested concrete specimens have also been carried out. It has been demonstrated that the hemp concrete's strength at the temperature up to 450°C depends on the binder used.

**Keywords:** hemp concrete; hemp shiv; high temperature; compressive strength.

Coraż większe wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków oraz aspekty ekologiczne związane z potrzebami ludzkimi i czystością produkcji materiałów budowlanych spowodowały wzrost zainteresowania zastosowaniem odpadów z produkcji rolniczej w przemyśle materiałów budowlanych. Takim materiałem są m.in. konopie siewne (*Cannabis sativa L*) zwane również przemysłowymi, które w Polsce uprawiane są przede wszystkim ze względu na włókno przemysłowe oraz ziarno [1]. Największe zastosowanie w budownictwie znalazły paździerz konopne, które wraz ze spoiwem wa-

piennym wykorzystywane są jako kruszywo lekkie do produkcji tzw. betonu konopnego. Kompozyty, w których ilość paździerzy wynosi 70 – 80% objętości, są wykorzystywane do renowacji istniejących przegród zewnętrznych budynków lub do wykonywania nowych [2, 3]. Głównymi zaletami betonu konopnego ze spoiwem wapiennym są dobre właściwości termoizolacyjne i akustyczne [4 – 6], mały wpływ na środowisko naturalne [7] oraz możliwość wykorzystania jako efektywnego regulatora higrotermicznego [8, 9]. Właściwości mechaniczne betonów konopnych na spoiwach wapiennych są jednak często niezadowalające. Wytrzymałość na ściskanie nie przekracza 1 MPa [9], co nie wystarcza do wykonywania z nich konstrukcji nośnych. Większą wytrzymałość na ściskanie można uzyskać w przypadku betonu konopnego, gdy jako spoiwo stosuje się cement portlandzki. Wówczas konieczny jest proces mineralizacji kruszywa. Najczęściej

jako mineralizatory stosuje się domieszkę wapna lub siarczan glinu [10]. Przy odpowiedniej obróbce paździerzy konopnych można uzyskać wytrzymałość na ściskanie do 8 razy większą niż kompozytu bez zmineralizowanych kruszyw [11]. Jak wynika z przeprowadzonych badań [6, 12], problemem pozostaje nadal uzyskanie odpowiednio dużej wytrzymałości przy zachowaniu dobrej izolacyjności termicznej. Oprócz minimalnej wytrzymałości mechanicznej, betony konopne stosowane jako materiały izolacyjne w ścianach lub płytach powinny mieć określoną odporność na ogień i wysoką temperaturę. Odporność ognia betonu konopnego jest głównym ograniczeniem jego stosowania w budownictwie. Jak pokazują badania [2], aby uzyskać klasę odporności ogniowej FRL – 60/60 (co odpowiada klasie EI 60), panel z betonu konopnego na spoiwie wapiennym powinien mieć grubość 400 mm. Z badań [13] wynika, że odporność betonu konopnego

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>2)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

<sup>3)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

\*) Adres do korespondencji: pawel.lukowski@pw.edu.pl

na działanie ognia i wysokiej temperatury może być zwiększona przez zastosowanie większej ilości spoiwa oraz grubości elementu lub innego spoiwa.

Celem badań opisanych w artykule była analiza wpływu spoiwa na zmianę wytrzymałości i struktury betonów konopnych pod wpływem wysokiej temperatury. Badaniom poddano trzy betony konopne, w których zastosowano jako spoiwo cement, wapno oraz mieszankę wapna i cementu. Wyniki badań pokazały, że o wytrzymałości betonów konopnych w temperaturze wyższej niż 300°C decyduje przede wszystkim zastosowane spoiwo.

## Materiały i metody badań

Do wykonania betonów konopnych (ang. *hemp concrete*, HC) zastosowano wapno hydratyzowane i cement portlandzki CEM I 42.5N, a jako kruszywo paździerz konopne wyprodukowane z polskiej odmiany konopi siewnych. Po wysuszeniu, przesianiu i odpyleniu paździerzy frakcja 0,5 – 2 mm wynosiła 25%, frakcja 2 – 4 mm – 8,7%, frakcja 4,0 – 8 mm – 65%, a frakcja 8 – 16 mm – 1,3% masy. Zmierzona gęstość nasypowa paździerzy to 98±3 kg/m<sup>3</sup>. Zaprojektowano trzy betony konopne charakteryzujące się stałą wartością współczynnika spoiwo/konopie (objętościowo) wynoszącą 1,3 (tabela). Pierwszy beton HC1 zawierał wyłącznie spoiwo wapienne, drugi HC2 30% wapna i 70% cementu (masowo), a trzeci HC3 zaprojektowano wyłącznie na spoiwie cementowym. W celu poprawy urabialności mieszanek na bazie cementu dodano superplastyfikator (SP) zawierający eter polikarboksylowy; zawartość domieszki wynosiła 1,5% masy cementu. Jako mineralizator w betonie HC3 zastosowano szkło wodne w ilości 1,5% masy cementu. W przypadku wszystkich badanych betonów oznaczono gęstość objętościową. Proporcje składników i gęstość objętościową betonów konopnych zestawiono w tabeli.

### Proporcje składników i gęstość objętościowa badanych betonów konopnych

*Proportions of components and apparent densities of the tested hemp concrete*

Oznaczenie betonu	Spoiwo (masowo)	Spoiwo/konopie (objętościowo)	Woda/spoiwo (masowo)	SP <sup>1)</sup> [% masy cementu]	Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]
HC1	wapno 100%	1,3	0,70	–	705
HC2	wapno 30% cement 70%	1,3	0,55	1,5	998
HC3	cement 100%	1,3	0,45	1,5	1030

<sup>1)</sup> SP – superplastyfikator

Procedurę dozowania i mieszania składników betonów HC przyjęto na podstawie badań [14]. W mieszarce laboratoryjnej mieszano paździerz konopne przez 1 min w celu rozbicia aglomeratów. Następnie dolano 1/3 całkowitej ilości wody i mieszano 3 min (fotografia 1), dodano spoiwo i mieszano przez minutę, po czym dodano pozostałą ilość wody wraz z superplastyfikatorem (dla mieszanek z cementem) i mieszano przez kolejne 2 min. Tak powstałą mieszankę układano w formach 300 x 300 x 50 mm i zagęszczano. Po 48 h próbki rozformowywano i przechowywano w komorze klimatycznej o wilgotności względnej 80% w temperaturze 20±2°C przez kolejne 54 dni. Następnie próbki wyjmowano z komory i za pomocą piły do betonu wycinano z nich próbki sześciennie o boku 50 mm do dalszych badań, wyznaczając ich masę.



Fot. 1. Paździerz konopne w trakcie mieszania z wodą

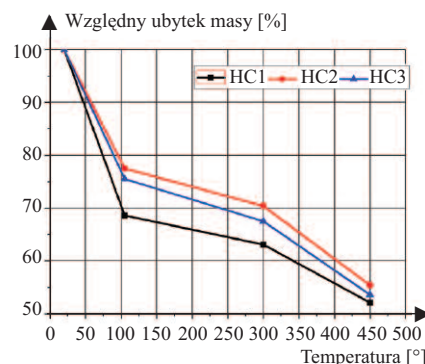
*Photo 1. Hemp shives during mixing with water*

W przypadku każdego betonu zbadano trzy próbki sześciennie o boku 50 mm, zgodnie z EN-13791 [15]. Wyrzwanie próbek w temperaturze 105, 300 i 450°C przeprowadzono w piecu średniotemperaturowym PP140/85 firmy LAC (Czechy). Zakres wygrzewania próbek betonu HC ustalono na podstawie badań [16]. Procedura wygrzewania próbek była zgodna z wytycznymi RILEM [17]. W pierwszym etapie temperatura w piecu zwiększała się z prędkością 1°C/min do chwili osiągnięcia założonej temperatury.

Temperaturę końcową wygrzewania utrzymywano przez 60 min, tak by próbki w całej swojej wysokości uzyskały żadaną temperaturę. Po upływie 60 min rozpoczynano proces chłodzenia próbek z prędkością 1°C/min. Próbki po wyjęciu z pieca ważono, analizowano makroskopowo zmianę ich powierzchni oraz poddawano badaniu wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 826 [18] na maszynie wytrzymałościowej o maksymalnym obciążeniu 100 kN z prędkością 5 mm/min. Wykonano również analizę termogravimetryczną (TG) badanych betonów i paździerzy konopnych. Analizę TG przeprowadzono za pomocą termowagi Netzsch STA 449 C w strumieniu azotu o czystości 99,99% (szybkość przepływu 90 ml/min) w tyglu ceramicznym. Przed pomiarem wykonano kalibrację pustego tygla. Szybkość ogrzewania wynosiła 10°C/min do temperatury 1000°C, a masa zmielonej próbki 20 mg. W przypadku konopi próbkę najpierw suszono w temperaturze 50°C przez co najmniej 2 dni, zgodnie z zaleceniami RILEM [19].

## Wyniki badań i ich analiza

Wyniki względnego ubytku masy próbek betonów konopnych wygrzewanych w zadanym zakresie temperatury przedstawiono na rysunku 1. Po wygrzaniu próbek w temperaturze 105°C zaobserwowano znaczny ubytek masy wszystkich próbek, który wyniósł w przypadku próbek HC1, HC2 i HC3 odpowiednio 31,5, 24,5 i 22,5%. Tak duży spadek masy związany jest z odparowaniem wolnej wody, którą pochłonęły włókna konopne podczas wykonywania mieszanek betonowych. Największy ubytek

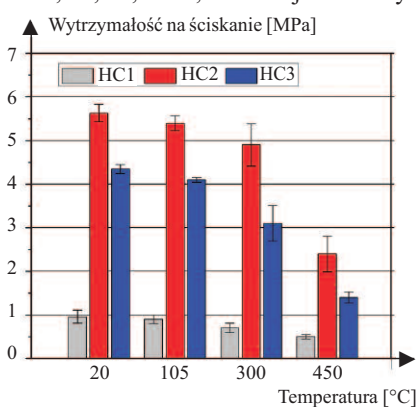


Rys. 1. Względny ubytek masy betonów konopnych w funkcji temperatury wygrzewania

*Fig. 1. Relative mass losses of hemp concrete as a function of heating temperature*

masy zaobserwowano w przypadku próbek betonu na spoiwie wapiennym HC1, które po stwardnieniu mają właściwości higroskopijne. Zastosowany w składzie betonów HC2 i HC3 cement spowodował zmniejszenie szybkości wchłaniania wody przez paździerz konopne podczas dojrzewania próbek i uszczelnienia strukturę betonów. W przedziale temperatury 105 – 300°C zmniejszenie masy wszystkich próbek jest proporcjonalne do wzrostu temperatury, a krzywe są równoległe. Próbki betonów HC1, HC2 i HC3 w temperaturze 300°C zachowały odpowiednio 63, 67,5 i 70,4% swojej masy początkowej. Struktura spoiw cementowych i wapiennych w temperaturze do 300°C nie ulega większym zmianom, dlatego też ubytek masy próbek wywołany jest wyłącznie procesami zachodzącymi w paździerzach konopnych pod wpływem temperatury.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonów konopnych wygrzewanych w badanym zakresie temperatury. Dodatek cementu w znacznym stopniu zwiększył wytrzymałość na ściskanie badanych betonów; największą uzyskały próbki z betonu HC2 na spoiwie cementowo-wapiennym. Ich wytrzymałość była pięciokrotnie większa niż próbek z betonu HC1 na spoiwie wapiennym w zadanej temperaturze, a wytrzymałość na ściskanie próbek betonu z HC3 była średnio cztery razy większa niż próbek z betonu HC1. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu HC3 na spoiwie cementowym była natomiast o 33, 24, 36,8 i 41,7% mniejsza niż wy-

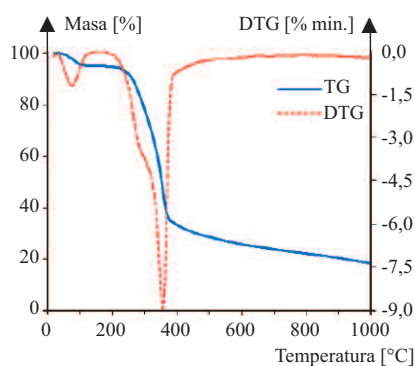


**Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonów konopnych w funkcji temperatury wygrzewania**

Fig. 2. Compressive strength of hemp concrete as a function of heating temperature

trzymałość próbek z betonu HC2 w temperaturze odpowiednio 20, 105, 300 i 450°C. Mniejszą wytrzymałość na ściskanie betonu HC3 w porównaniu z betonem HC2 można tłumaczyć większą porowatością zaczynu cementowego wynikającą z wilgotnej konsystencji mieszanki HC3. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po wygrzaniu próbek do 105°C nie było tak znaczne (5 – 7% w porównaniu z wytrzymałością próbek w temperaturze 20°C) jak spadek masy (22,5 ÷ 31,5%).

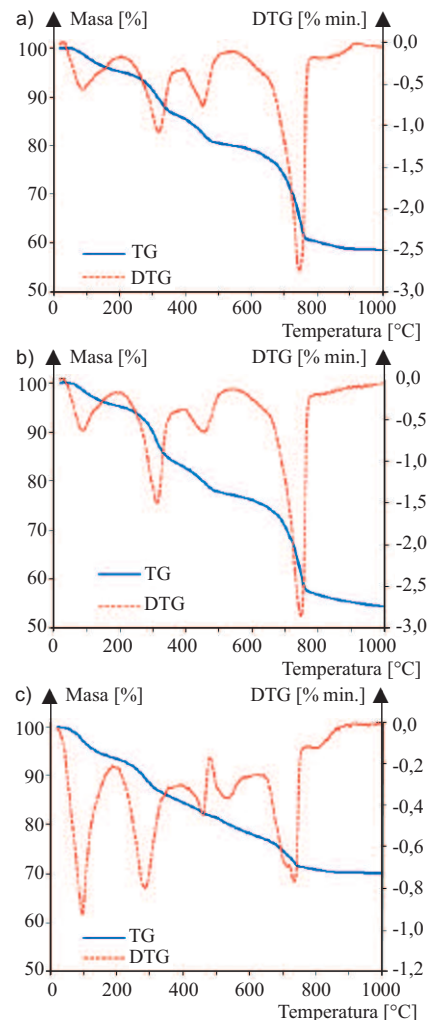
Na rysunku 3 przedstawiono krzywe TG (odzworowujące zmianę masy próbki w funkcji temperatury) i DTG (termogravimetryczna krzywa różnicowa) próbki paździerzy konopnych. Rozkład termiczny konopi przebiegał w trzech etapach, które odpowiadały odparowaniu śladowej zawartości wilgoci (75°C), depolimeryzacji hemicelulozy i pektyn (285°C) [13] oraz ich rozkładowi termicznemu (350°C) [20]. Po obróbce cieplnej uzyskano jedynie 3,6% masy wyjściowej w postaci popiołu.



**Rys. 3. Krzywe TG i DTG paździerzy konopnych**

Fig. 3. TG and DTG curves of hemp shives

Rozkład termiczny mieszanki wapna i konopi (rysunek 4a) przebiegał z wydzielaniem wilgoci (90°C) i rozkładem konopi w temperaturze ok. 320°C. Ponadto zaobserwowano dwa główne piki DTG przy 455°C (rozkład  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i 750°C (rozkład  $\text{CaCO}_3$ ), które są charakterystyczne dla rozkładu termicznego wapna [21]. Całkowita utrata masy wyniosła 41,4%. Analiza TG próbki betonu HC2 (rysunek 4b) oraz próbki betonu HC3 (rysunek 4c) przebiegała z występowaniem podobnych etapów termicznych jak poprzednio, przy całkowitym ubytku masy odpowiednio 45,5 i 29,9%. Oznacza to, że najbardziej sta-

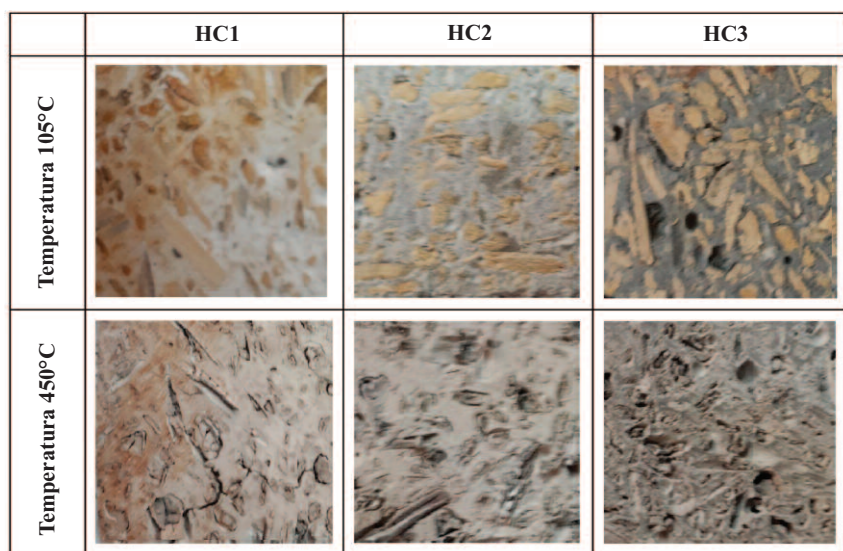


**Rys. 4. Krzywe TG i DTG betonów konopnych: a) HC1; b) HC2; c) HC3**

Fig. 4. TG and DTG curves of hemp concrete: a) HC1, b) HC2, c) HC3

bilna termicznie okazała się próbka betonu HC3 zawierająca cement i paździerz konopne.

Na fotografii 2 zamieszczono obrazy powierzchni próbek betonów konopnych po wygrzewaniu w temperaturze 105 i 450°C. W przypadku próbki HC3 (temperatura 105°C) widoczne są duże pory powietrzne (do 5 mm długości), zlokalizowane przy krawędzi paździerzy oraz w samej matrycy cementowej. Tak duża liczba porów spowodowana jest zbyt małą ilością wody do hydratacji cementu. Znaczna część wody została wchłonięta przez paździerz. Występowanie porów tłumaczy uzyskanie mniejszej wytrzymałości na ściskanie betonu HC3 niż betonu HC2. Temperatura 450°C spowodowała znaczne spękanie próbek betonu HC1 (pęknięcia na granicy spoiwo-paździerz), co skutkowało spadkiem wytrzy-



**Fot 2. Powierzchnia próbek betonów konopnych po wygrzewaniu**  
 Photo 2. Hemp concrete specimens surface after heating

małości na ściskanie o 50%. Dzięki zastosowaniu cementu uzyskano znacząco poprawę wytrzymałości na ściskanie, również w wysokiej temperaturze.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań betonów konopnych, wykonanych na różnych spoiwach, poddanych działaniu wysokiej temperatury. Betony konopne ze spoiwem wapiennym, zawierające 70 – 80% konopi, mają dobre właściwości termoizolacyjne i akustyczne. Ze względu na słabe właściwości mechaniczne nie stosuje się jednak betonu konopnego na spoiwie wapiennym do wykonywania elementów nośnych. W literaturze dostępnych jest niewiele wyników badań betonu konopnego narażonego na ogień lub podwyższoną temperaturę, mimo że odporność ogniowa ma istotne znaczenie zarówno w przypadku elementów nośnych, jak i nienośnych. Jak pokazano w artykule, zwiększenie wytrzymałości na ściskanie można uzyskać, zastępując wapno cementem. Październie konopne nie wpłynęły na wzrost zarysowania i wytrzymałość badanych betonów w wysokiej temperaturze. Rozkład termiczny konopi zaobserwowano w temperaturze ok. 320°C. O wartości resztkowej wytrzymałości na ściskanie w warunkach wysokiej temperatury (powyżej 300°C) decyduje spoiwo zastosowane w betonie konopnym. Cement zwiększa jego wytrzymałość na ściskanie i odporność

ogniową, ale jednocześnie powoduje zwiększenie gęstości objętościowej i pogorszenie właściwości termoizolacyjnych. Z tego powodu prowadzone są obecnie badania nad spoiwami do zastosowania w betonie konopnym, alternatywnymi w stosunku do wapna, o niższym śladzie węglowym i energii w budowania, a zarazem pozwalającymi na zwiększenie wytrzymałości i odporności ogniowej przy zachowaniu dobrej izolacyjności termicznej i możliwie najmniejszej gęstości.

## Literatura

- [1] Wielgus K. Uprawa konopi włóknistych i oleistych. Centrum Doradztwa Technicznego w Brwinowie, 2020.
- [2] Sassoni S, Manzi A, Motori M, Montecchi M, Canti M. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: physical, thermal and mechanical characterization. *Energy Build.* 2014; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>.
- [3] Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Impact of hemp shiv on cement setting and setting: influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *CemConcr Compos.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>.
- [4] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goulet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete („hempcrete”) manufactured by a projection process. *Constr Build Mater.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.
- [5] 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>.
- [6] 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>.

[7] Hirst EAJ, Walker P, Paine KA, Yates T. Characteristics of low-density hemp-lime building materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials.* 2012; <https://doi.org/10.1680/coma.1000021>.

[8] Collet F, Chamoin J, Pretot S, Lanos C. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy Build.* 2013; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.

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

[10] Balciunas G, Pundiene I, Boris R, Kairyte A, Zvironaitė J, Gargasas J. Long-term curing impact on properties, mineral composition and microstructure of hemp shive-cement composite. *Constr Build Mater.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.126>.

[11] Balciunas G, Pundiene I, Lekunaite-Lukosiune L, Vejelis S, Korjajins A. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical-mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. *Ind. Crops Prod.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.011>.

[12] 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>.

[13] Baduge SK, Mendis P, San Nicolas R, Nguyen K., Hajimohammadi A. Performance of lightweight hemp concrete with alkali-activated cenosphere binders exposed to elevated temperature. *Constr Build Mater.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.069>.

[14] 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>.

[15] PN-EN 13791:2019. Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.

[16] 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>.

[17] RILEM Technical Committees 129-MHT. Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 1: Introduction, Part 2: Stress-strain relation, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions. *Mater Struct.* 1995; 28.

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

[19] Amziane S, Collet F, Lawrence 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; <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.

[20] Le Troedec M, Sedan D, Peyratout C, Bonnet JP, Smith A, Guinebreiere R, Gloaguen V, Krausz P. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. *Composites: Part A.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.12.001>.

[21] Balcerowiak W. Phase analysis of high-calcium lime by TG. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2000; <https://doi.org/10.1023/A:1010168401224>.

Przyjęto do druku: 14.04.2023 r.