

Właściwości termoizolacyjne kompozytu wapienno-cementowego z udziałem paździerzy konopnych

Elżbieta Haustein¹

¹ Katedra Wytrzymałości Materiałów, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: haustein@pg.edu.pl

STRESZCZENIE

Przedstawiono wyniki badań kompozytów wykonanych na bazie wapna budowlanego, cementu i dolomitu - spoiwa wiążącego z udziałem paździerzy konopi. Określono ich podstawowe właściwości, tj.: gęstość objętościową, współczynnik przewodzenia ciepła oraz wytrzymałości na ściskanie. Otrzymane wyniki dowodzą, że wytworzone kompozyty wapienno-cementowe z udziałem paździerzy konopnych są lekkie i charakteryzują się niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz małą gęstością pozorną. Cechują je bardzo niskie parametry wytrzymałościowe w porównaniu z tradycyjnymi materiałami budowlanymi.

Słowa kluczowe: paździerze konopne, kompozyt, wapno, przewodnictwo termiczne.

Thermal insulation properties of the lime-cement composite with hemp shives

ABSTRACT

The paper presents the results of research composites produced on the basis of binder (building lime, cement and dolomite) with the participation of hemp shives. Their main of properties were determined, i.e.: bulk density, thermal conductivity and compressive strength. The results show that the lime-cement composites with participation of hemp shives produced are lightweight and have low thermal conductivity and apparent density. They are characterized by very low strength properties compared to traditional building materials.

Keywords: hemp shives, composite, lime, thermal conductivity.

WSTĘP

Stosowanie surowców naturalnych w budownictwie wymusza konieczność poszukiwania alternatywnych rozwiązań, które ograniczą stopień degradacji środowiska naturalnego. Przykładem jest budownictwo ekologiczne. Od szeregu lat widoczny jest wzrost zagospodarowywania włókien lub paździerzy np. lnu, konopi, odpadów ze słomy roślin naturalnych. Ich wykorzystywanie poprawia m.in. parametry izolacyjne, termiczne i wentylacyjne w stosunku do materiałów tradycyjnych stosowanych w budownictwie [Brzyski et al. 2017].

W Polsce zgodnie z ustawą (Dz. U. nr 0, poz. 783, art. 45, pkt. 3) uprawę konopi włóknistych (*Cannabis sativa L.*) można prowadzić wyłącznie

na potrzeby przemysłu włókienniczego, chemicznego, celulozowo-papierniczego, spożywczego, kosmetycznego, farmaceutycznego, materiałów budowlanych oraz nasiennictwa. W krajowym rejestrze (COBORU) zarejestrowanych jest sześć odmian konopi jednopiennej: Białobrzeskie, Beniko, Rajan, Wojko, Tygra i Wielkopolskie. Wszystkie odmiany zawierają mniej niż 0,2% suchej masy substancji psychoaktywnej (THC) w kwiatowych lub owocujących wierzchołkach roślin, z których nie usunięto żywicy. Ich uprawa wymaga odpowiedniego pozwolenia na wysiew z certyfikowanych nasion od uprawnionego sprzedawcy.

Polskie odmiany są przystosowane do warunków klimatu umiarkowanego. Właściwa agrotechnika pozwala uzyskać wysoki plon biomasy,

około 10–15 t/ha. Przykładowo, 10 ton słomy konopnej z 1 hektara pozwala uzyskać około 3 tony włókna i 7 ton paździerzki [Brzyski i Fic 2015].

O przydatności odpadów z roślin włóknistych w budownictwie decyduje ich skład chemiczny oraz parametry fizyczno-mechaniczne które mogą ulegać zmianie wraz z ich fazą rozwojową. Ich właściwości zależą od gatunku rośliny, odmiany, struktury oraz budowy komórkowej. Przykładowo, paździerzki konopne wykazują większą zawartość ligniny oraz hemicelulozy w stosunku do włókna konopnego (tab. 1).

Wysoka porowatość paździerzki konopnych (60% ich objętości to powietrze) ma istotne znaczenie dla właściwości termicznych kompozytów z ich udziałem. Ich gęstość mieści się w przedziale od 112 do 148 kg/m³ [Dinh et al. 2015]. Ich powierzchnia właściwa oraz porowatość wynoszą odpowiednio od 13,8 m²/g do 29 m²/g oraz od 2,2 cm³/g do 3,4 cm³/g. Obecność porów w ich strukturze, o kształcie cylindrycznym (od 70 do 400 μm), zapewnia im dobre właściwości izolacyjne, rys.1. Przewodnictwo cieplne paździerzki konopnych wynosi około $\lambda = 0,04 \div 0,06$ W/m·K i jest zbliżone do wartości jakie wykazują tradycyjne

materiały termoizolacyjne np. styropian ($\lambda = 0,04$ W/m·K) czy wełna mineralna ($\lambda = 0,034 \div 0,050$ W/(m·K) [Kremensas et al. 2017].

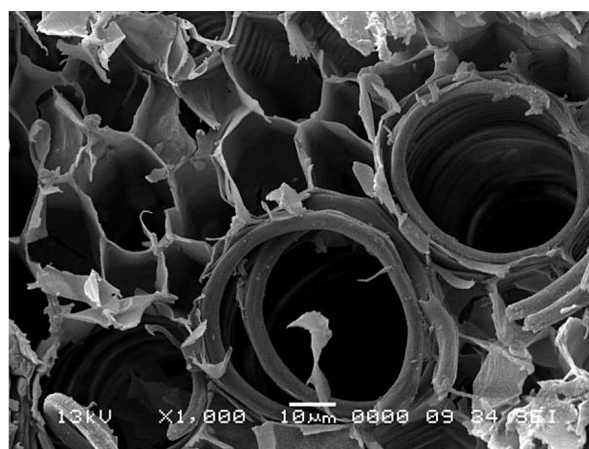
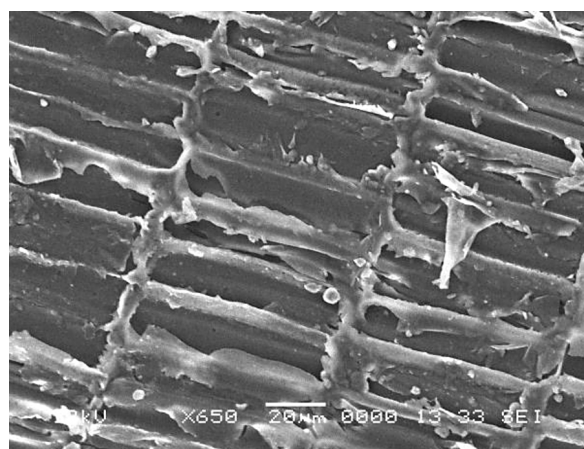
Paździerzki konopne absorbują znaczną ilość wody. Ich budowa strukturalna na poziomie komórkowym zawiera celulozę oraz ligninę, związki bogate w wiązania wodorowe. W kontakcie z wodą, wiązania zostają wzbogacone grupami hydroksylowymi (OH) obecnymi w wodzie. Wyniki badań Hirsh [2013] wykazują, że ilość pochłanianej wody przez paździerzki po 20 minutach wynosi około 98% od momentu ich zanurzenia w wodzie. Ich średni czas nasycenia (95%) wynosi 5 minut, przy przyroście masy 230% [Stevulova et al. 2015, Fourmentin et al. 2016]. Paździerzki konopne wykazują wysoką plastyczność, ściśliwość oraz podatność do zagęszczania. Ich duża odporność na rozkład biologiczny – zawierają mało składników odżywczych, sprawia że stanowią gorsze środowisko dla rozwoju grzybów.

Wśród środków wiążących paździerzki konopne najczęściej wymienia się wapno powietrzne i/lub wapno hydrauliczne oraz materiały pułcolanowe z małą ilością dodatków mineralnych [Ingrao et al. 2015]. Kompozyty wykonane na ba-

Tabela 1. Skład chemiczny włókien oraz paździerzki konopnych [Thomsen et al. 2005]

Table 1. Chemical composition of fibers and shives hemp [Thomsen et al. 2005]

| Rodzaj składnika, % wag. | Włókna konopne | Paździerzki konopne |
|--------------------------|----------------|---------------------|
| Celuloza | 55 ÷ 72 | 34 ÷ 44 |
| Hemiceluloza | 7 ÷ 19 | 18 oraz 31 ÷ 37 |
| Lignina | 2 ÷ 5 | 19 ÷ 28 |
| Pektyna | 4 ÷ 8 | 4 |
| Tłuszcze i sub. woskowe | 0,7 ÷ 1,3 | 1 |



Rys. 1. SEM. Widok ogólny struktury przekroju a) podłużnego b) poprzecznego paździerzki konopnych [Nguyen et al. 2010]

Fig. 1. SEM. General view of the structure of a) longitudinal b) and cross section of a hemp shives [Nguyen et al. 2010]

zie paździerz konopnych przy ograniczeniu spoiwa cementowego na rzecz ekologicznego wapna wykazują charakter materiałów lekkich [Sassoni et al. 2014, Fic i et al. 2015]. Ich zaletą jest niski współczynnik przewodzenia ciepła oraz mała gęstość pozorna porównywalna do gęstości np. betonu komórkowego. Dzięki swojej strukturze kompozyty wykazują dobre właściwości izolacyjne: nie przepuszczają ciepła, a jednocześnie – w przeciwieństwie do styropianu – są materiałem przenikalnym, który nie zamyka dostępu powietrza. Ich parametry wytrzymałościowe wynoszą poniżej 1,2 MPa i są stosunkowo niskie w porównaniu do tradycyjnych materiałów budowlanych [Murphy et al. 2010]. Właściwości kompozytów zależą m.in. od sposobu obciążenia, zorientowania w matrycy oraz połączenia paździerz z spoiwem [Balčiūnas et al. 2013].

Jak podają Boltryk i Krupa [2015], kompozyty wapienno-cementowe z wypełniaczem organicznym są narażone procesy chemisorpcyjne związane z karbonatyzacją. Zastosowanie wapna jako materiału wiążącego sprzyja powstawaniu w spoiwie, znacznej ilości wodorotlenku wapnia. Powstały produkt wchodzi w reakcję chemiczną z atmosferycznym CO_2 – poprzez przenikanie przez porowatą powierzchnię kompozytu - powodując powstawanie węglanu wapnia (CaCO_3). Narastanie coraz większej jego ilości w strukturze kompozytu, stanowi przyczynę zmiany jego odczynu z wysoko alkalicznego na obojętne.

Kolejność dozowania poszczególnych składników wchodzących w skład kompozytów nie jest ściśle określona. Jedną z możliwości jest wstępne moczenie paździerz, a następnie dodanie materiałów wiążących wymieszanych uprzednio z wodą. Innym rozwiązaniem jest zmieszanie suchych paździerz ze spoiwem, uprzednio rozpuszczonym w wodzie. Duża nasiąkliwość paździerz wymusza konieczność ustalenia odpowiedniej ilości wody zarobowej w mieszankach. Obszar kontaktowy (stref ciągłych) wzmocniony paździerzami, w zależności od rodzaju spoiwa wiążącego ma wpływ na parametry wytrzymałościowe kompozytów.

Proponowanym kierunkiem wykorzystania kompozytów zawierających w swoim składzie paździerz konopne jest budownictwo niskie (do dwóch kondygnacji) w postaci wypełnienia ścian, dachu, stropu konstrukcji szkieletowej drewnianej lub jako warstwy podłogi [Fic i Brzyski 2015].

W pracy przedstawiono wyniki badań własnych. Celem jest określenie termoizolacyjności

utworzonych kompozytów wapienno-cementowych z udziałem paździerz konopnych w zależności od ilości wapna hydratyzowanego w spoiwie.

MATERIAŁ I RODZAJ BADAŃ

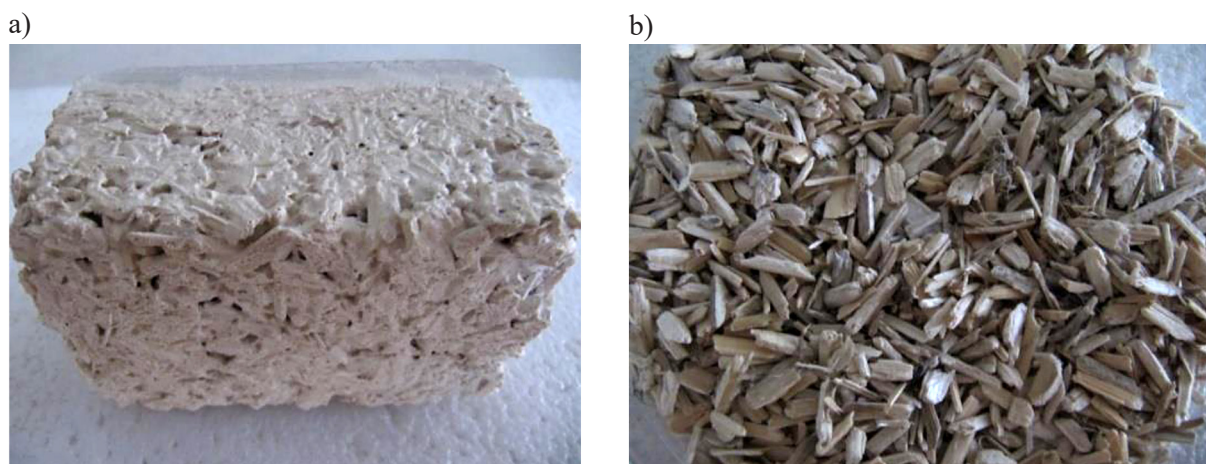
Do sporządzenia kompozytów wapienno-cementowych z udziałem materiału roślinnego wykorzystano:

- cement portlandzki CEM II/B-V 32,5 R (klinkier portlandzki (65-79%), popiół lotny krzemionkowy, kamień wapienny o łącznej ilości 21-35% oraz siarczan wapnia, jako regulator czasu wiązania) zgodny z PN-EN 197-1:2012, producent ARTCEM;
- wapno hydratyzowane (CL-90S) zgodne z PN-EN 459-1:2015-06, producent Bielik;
- dolomit Microdol 5 (mieszanka węglanu wapnia oraz magnezu), producent Norwegia;
- zaprawę szamotową zduńską ZZSz 0-2 (mieszanka gliny i kruszywa szamotowego), producent CHEMOBUD;
- paździerz konopne o frakcji 2,0-2,5 mm, (rys. 2b);
- oraz wodę wodociągową.

Skład spoiwa modyfikowano zmniejszając udział (%) wapna hydratyzowanego przy zachowaniu stałego udziału pozostałych składników (cementu, dolomitu oraz szamotu) w całkowitej masie. Procentowy skład wagowy sporządzonych kompozytów podano w tabeli 2.

Suche paździerz konopne mieszano ze składnikami spoiwa, uprzednio rozpuszczonego w wodzie zarobowej. Stosunek wody do paździerz konopnych, uwzględniał ich zdolność do nasiąkliwości. Sporządzony kompozyt zagęszczano w formach, poprzez ubijanie ręczne.

Badania wybranych właściwości utworzonych kompozytów wapienno-cementowych z udziałem paździerz konopnych zrealizowano po 28 dniach przechowywania w warunkach laboratoryjnych (temp. $20 \pm 2^\circ\text{C}$). Współczynnik przewodzenia ciepła oraz współczynnik paroprzepuszczalności wykonano zgodnie z PN-EN 12667:2002 oraz PE-EN 12752: 2004. Badania zrealizowano przy wykorzystaniu aparatu (model FOX314) firmy LaserComp zgodnego z normą PN-ISO 8301:1998. W przypadku wytrzymałości na ściskanie, ze względu na zmienny udział wapna hydratyzowanego w stosunku do pozostałych składników spoiwa, badania zrealizowano dodatkowo po 90 dniach dojrzewania kompozytów.



Rys. 2. Widok ogólny a) kompozytu wapienno-cementowego (o wymiarach $95 \times 60 \times 55 \text{ mm}^3$) z udziałem b) paździerzy konopnych, (Fot. E. Haustein)

Fig. 2. General view of a) lime-cement composite (size of the block $95 \times 60 \times 55 \text{ mm}^3$) with b) hemp shives, (Photo E. Haustein)

Tabela 2. Skład kompozytu wapienno-cementowego z udziałem paździerzy konopnych, % wag.

Table 2. Composition of lime-cement composite with the participation of hemp shives, % by weight

| Seria | Skład spoiwa mineralnego: (S = C + M + Z + W), % wag. | | Paździerze konopne | H ₂ O |
|-------|---|-------------|--------------------|------------------|
| | Rodzaj składnika | CL-90 S (W) | % wagowo | |
| 1 | 10% CEM II/B-V 32,5 R (C) | 12% | 30% | 28% |
| 2 | 10% Microdol 5 (M) | 11% | | 29% |
| 3 | 10% ZZSz 0-2 (Z) | 10% | | 30% |

Badania wytrzymałości oraz gęstość pozorną w stanie powierzchniowo-suchym zrealizowano zgodnie z PN-EN 12390-3: 2011 oraz PN-EN 12390-7: 2011.

WYNIKI BADAŃ

Średnie wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej, w tym opór ciepła oraz gęstość sporządzonych kompozytów przedstawiono w Tabeli 3. Badania zrealizowane w temperaturze $+10 \text{ }^\circ\text{C}$, wykonano na próbkach o wymiarach $300 \times 300 \text{ mm}^2$ oraz grubości do 102 mm, uprzednio wyciętych z próbek o wymiarach $200 \times 500 \times 295 \text{ mm}^3$. Średnie wyniki badań współczynnika paro-przepuszczalności, w tym oporu dyfuzyjnego przedstawiono w tabeli 4.

Badania wytrzymałości na ściskanie stanowią średnią z trzech pojedynczych wyników wytrzymałości na ściskanie, uzyskaną po 28 i 90 dniach dojrzewania. Badania zrealizowano na próbkach wymiarach $95 \times 60 \times 55 \text{ mm}^3$ (rys. 2a) wyciętych z próbek o wymiarach $200 \times 500 \times 295 \text{ mm}^3$. Zależność wytrzymałości na ściska-

nie (MPa) od czasu dojrzewania (seria nr 1-3) przedstawiono na rysunku 3.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Spadek udziału procentowego wapna hydratyzowanego w sporządzonych kompozytach przy zachowaniu stałego udziału procentowego paździerzy konopnych obniża współczynnik przewodzenia ciepła oraz opór cieplny (tab. 3). Użytkana wartość dla próbki z udziałem 10% wapna hydratyzowanego (seria nr 3) wynosi $0,0733 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ i jest niższa o 28,3% niższa w stosunku do wartości uzyskanej dla kompozytu z udziałem 12% wapna (seria nr 1). Widoczna jest zależność pomiędzy gęstością, współczynnikiem przewodzenia ciepła, w tym oporu cieplnego badanych materiałów. Kompozyt o niższej gęstości wykazuje niższy współczynnik przewodzenia ciepła, co za tym idzie, wyższy opór cieplny, czyli lepszą izolacyjnością. W przypadku gęstości wynoszącej 335 kg/m^3 (seria nr 3) opór cieplny wynosi $0,683 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, i jest wyższy o 9,1% w stosunku do kompozytu o gęstości 501 kg/m^3 (seria nr 1).

Tabela 3. Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytów z paździerzami konopnymi, seria nr 1-3**Table 3.** Thermal conductivity coefficient of composites with hemp shives, series 1-3

| Nr serii | Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)] | Opór cieplny [m ² K/W] | Gęstość próbki [kg/m ³] |
|----------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0,1018 | 0,621 | 506 |
| 2 | 0,0852 | 0,632 | 435 |
| 3 | 0,0732 | 0,683 | 335 |

Tabela 4. Współczynnik przepuszczalności pary wodnej (d) i współczynnik oporu dyfuzji (m) kompozytów, seria nr 1-3**Table 4.** Coefficient of water vapor permeability (d) and factor of diffusion resistance (m) of composites, series 1-3

| Nr serii | Współczynnik paroprzepuszczalności (δ) | | Opór dyfuzyjny [-] |
|----------|--|------------------------|--------------------|
| | [g/(m·h·hPa)] | [kg/(m·s·Pa)] | |
| 1 | 208×10^{-4} | $5,775 \times 10^{-6}$ | 3,6 |
| 2 | 185×10^{-4} | $5,166 \times 10^{-6}$ | 3,8 |
| 3 | 180×10^{-4} | $5,000 \times 10^{-6}$ | 4,0 |

Przewodność cieplna materiałów zależy od ich porowatości. Wartość współczynnika przewodności cieplnej (λ) kompozytu zależy od jego gęstości, która z kolei związana jest ze sposobem układania i zagęszczania mieszanki oraz z proporcją spoiwa do wypełniacza organicznego. Wpływ na przewodnictwo cieplne ma rozmiar paździerzy konopnych, w tym ich rozkład (orientacja) w strukturze kompozytu. Kompozyt z udziałem 10% wapna hydratyzowanego w spoiwie (seria nr 3) wykazuje większą ilość porów w stosunku do kompozytu z udziałem 12% wapna (seria nr 1). Biorąc pod uwagę, że powietrze zamknięte w porach materiału wykazuje najniższą przewodność cieplną, to wzrost porowatości, powoduje spadek gęstości materiału, w tym obniża jego przewodność cieplną oraz ma wpływ na wytrzymałość na ściskanie (rys. 3).

Średni opór dyfuzyjny badanych kompozytów, w zależności od ilości wapna hydratyzowanego w ogólnej masie, przy zachowaniu stałego udziału procentowego paździerzy konopnych mieści się w przedziale od 3,6 (12% CL-90S) do 4,0 (10% CL-90S). Jego wartości są zbliżone i porównywalne z oporem dyfuzyjnym, jakim osiąga gips oraz płyta gipsowo-kartonowa w stanie wilgotnym (wartość 4) lub mur z pustaków ceramicznych drążonych szczelinowych na zaprawie cementowo-wapiennej lub na zaprawie ciepłochronnej: wartości 3–5 [Pogorzelski 2005].

Sporządzone kompozyty wapienno-cementowe z paździerzami konopnymi zawierające w swoim składzie 12% CL-90 S (12%) uzyskują średnią gęstość wyższą o około 34% w stosunku do kompozytu z mniejszą jego ilością (10%) –

tabela 3. Uzyskane średnie wyniki mieszczą się w przedziale od 335 kg/m³ (serii nr 3) do 506 kg/m³ (serii nr 1).

Średnia wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania sporządzonych kompozytów przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych mieści się w przedziale od 0,94 MPa (12% CL-90 S) do 0,81 MPa z udziałem 10% CL-90 S. Ograniczony udział cementu (10%) przy udziale wapna hydratyzowanego w ilości od 10% do 12% powoduje słabą przyczepność paździerzy konopnych w sporządzonych kompozytach skutkując ich niską wytrzymałością. Dalszy upływ czasu dojrzewania (90 dni) powoduje nieznaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach. Uzyskane wartości są wyższe odpowiednio o 20,3% (12% wapna) oraz o około 11% dla 10% udziału wapna hydratyzowanego w spoiwie przy zachowaniu stałego udziału procentowego paździerzy konopnych. Powolny proces wiązania układu: wapno-cement-paździerze-woda ogranicza stopień zagęszczania produktami reakcji strukturę sporządzonych kompozytów. W efekcie, paździerze konopne pokryte jest nierównomiernie spoiwem z widocznymi przestrzeniami powietrznymi (rys. 2a).

PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój technologii materiałowej w budownictwie wymusza konieczność poszukiwań nowych rozwiązań, które sprzyjają środowisku naturalnemu. Materiały z udziałem

wypełniaczy organicznych (roślinnych) stanowią alternatywę dla budownictwa ekologicznego, którego intensywny rozwój obserwuje się na całym świecie.

Kompozyty wapienno-cementowe z udziałem paździerzy konopnych należy zaliczyć do materiałów charakteryzujących się małą gęstością objętościową, dobrą izolacyjnością cieplną oraz stosunkowo niewielką wytrzymałością na ściskanie. Uzyskanie optymalnych parametrów związanych z ich termoizolacyjnością zależy od proporcji oraz rodzaju poszczególnych składników pełniących rolę spoiwa. Udział wapna hydraulicznego z jednoczesnym ograniczeniem udziału cementu pozwala pozyskać ekologiczny materiał izolacyjny. Wzrost zainteresowania materiałami organicznymi w krajowym budownictwie, w dalszej perspektywie czasu, stwarza możliwość wzrostu podmiotów gospodarczych produkcją tego typu kompozytów.

BIBLIOGRAFIA

- Balčiūnas G., Vėjelis S., Vaitkus S. and Kairytė A. 2013. Physical properties and structure of composite made by using hemp hurds and different binding materials, *Procedia Engineering*, 57, 159-166.
- Bołtryk M. and Krupa A. 2015. Ocean podatności kompozytów cementowych z wypełniaczami organicznymi na oddziaływanie CO₂. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, 1(15), 33-40.
- Brzyski P., Barnat-Hunek D., Suchorab Z. and Łągód G. 2017. Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials*, 10(5), ss. 23.
- Brzyski P. and Fic S. 2015. Charakterystyka kompozytu wapienno-konopnego i jego zastosowanie w budownictwie. *Budownictwo i Architektura*, 14(2), 11-19.
- Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych (COBORU). 2016. Lista odmian roślin rolniczych wpisanych do krajowego rejestru w Polsce. Słupia Wielka.
- Dinh T.M., Magniont C., Coutand M. And Escaille G. 2015. Hemp concrete using innovative pozzolanic binder. *First International Conference on Bio-based Building Materials*. June 22nd - 24th, Clermont-Ferrand, France, 265-270.
- Fic S. and Brzyski P. 2015. O technologii wykonywania ścian z wykorzystaniem kompozytu zawierającego paździerz konopne. *Inżynieria i Budownictwo*, 7, 356-358.
- Fic S., Brzyski S., Szewczak A. and Jarosz-Hadam M. 2015. Wybrane właściwości lekkich kompozytów na bazie wypełniaczy celulozowych do zastosowania w budownictwie ekologicznym. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, 62(2), 61-70.
- Fourmentin M., Faure P., Pelupessy P., Saroukian V., Peter U., Lesueur D., Rodts S., Daviller D. and Coussot P. 2016. NMR and MRI observation of water absorption/uptake in hemp shives used for hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 405-413.
- Hirsh E.A.J. 2013. Characterisation of hemp-lime as a composite building material. Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath.
- Ingrao C., Lo Giudice A., Bacenetti J., Tricase C., Dotelli G., Fiala M., Siracusa V. and Mbohwa Ch. 2015. Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29-42.
- Kremensas A., Vaitkus S., Vėjelis S., Kairytė A. and Balčiūnas G. 2017. Investigation of energy efficient thermal insulating composites from hemp shives and starch. *International Journal of Engineering Science Invention (ISSN)*, 6(6), 20-2.
- Murphy F., Pavia S. and Walker R. 2010. An assessment of the physical properties of lime-hemp concrete. *BCRI Bridge Infrastructure Concrete Research Ireland*, University College Cork, Ni Nuallain, Walsh, West, Cannon, Caprani, McCabe. 431-438.
- Nguyen T.T., Picandet V., Carre P., Lecompte T., Amziane S. and Baley Ch. 2010. Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(5), 545-560.
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskie z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o przeciwdziałaniu narkomanii (Dz.U. nr 0, poz.783, art.45, pkt.3).
- Pogorzelski J. 2005. Fizyka budowli. Część X. wartości obliczeniowe właściwości fizycznych. *Materiały Budowlane*, 3(391), 79-81.
- PN-EN 197-1: 2012. Cement . Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 459-1: 2015-06. Wapno budowlane. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności (wersja angielska).
- PN-EN 12667:2002. Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych – określenie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzewczej i czujnika strumienia cieplnego – wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym.

20. PN-EN 12752: 2004. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie wilgotności związanych z transportem pary wodnej.
21. PN-ISO 8301: 1998. Izolacja cieplna. Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym. Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego
22. PN-EN 12390-7:2011. Badania betonu. Część 7. Gęstość betonu.
23. PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania.
24. Sassoni E., Manzi S., Motori A., Montecchi M. and Canti M. 2014. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization, *Energy and Buildings*, 77, 219-226.
25. Stevulova N., Cigasova J., Purcz P., Schwarzova I., Kacik F. and Geffer A. 2015. Water absorption behavior of hemp hurds composites. *Materials*, 8(5), 2243-2257.
26. Thomsen A.B., Rasmussen S., Bohn V., Nielsen K.V. and Thygesen A. 2005. Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres. Risø. National Laboratory, Roskilde, Denmark 2005.

