



Przemysław Brzyski

Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający wymagania zrównoważonego rozwoju w budownictwie



M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Kompozyt wapienno-konopny
jako materiał ścienny spełniający
wymagania zrównoważonego
rozwoju w budownictwie

Monografie – Politechnika Lubelska

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:
Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CIN-T:
Katarzyna WEINPER

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK
Jarosław GAJDA
Anna KOŁTUNOWSKA
Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA
Małgorzata FRANUS
Arkadiusz GOLA
Paweł KARCZMAREK
Beata KOWALSKA
Anna KUCZMASZEWSKA
Jarosław LATAŁSKI
Tomasz LIPECKI
Zbigniew ŁAGODOWSKI
Joanna PAWŁAT
Lucjan PAWŁOWSKI
Natalia PRZESMYCKA
Magdalena RZEMIENIAK
Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny
Miroslav GEJDOŠ, Słowacja
Karol HENSEL, Słowacja
Hrvoje KOZMAR, Chorwacja
Frantisek KRCMA, Czechy
Sergio Lujan MORA, Hiszpania
Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan
Sirgii PAWŁOW, Ukraina
Natalia SAVINA, Ukraina
Natia SHENGELIA, Gruzja
Daniele ZULLI, Włochy

Przemysław Brzyski

Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający wymagania zrównoważonego rozwoju w budownictwie



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2022

Recenzeci:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Paweł Ogrodnik, prof. Szkoły Głównej Służby Pożarniczej

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający wymagania zrównoważonego rozwoju w budownictwie”, napisanej pod kierunkiem dr hab. inż. Danuty Barnat-Hunek, prof. PL oraz dr hab. inż. Magdaleny Grudzińskiej, prof. PL, która została obroniona w roku 2018 na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2022

ISBN: 978-83-7947-533-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Soft Vision Mariusz Rajski

www.printone.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenia	7
Spis symboli.....	9
1. Wprowadzenie	11
2. Problem naukowy, cele i zakres pracy.....	14
3. Zrównoważony rozwój w budownictwie.....	15
4. Zastosowanie konopi przemysłowych w budownictwie.....	18
5. Kompozyt wapienno-konopny.....	21
5.1. Ogólna charakterystyka.....	21
5.2. Wapno jako spoiwo w kompozycie wapienno-konopnym.....	23
5.3. Paździerz konopne jako wypełniacz w kompozycie wapienno-konopnym	26
5.4. Techniki wznoszenia ścian z kompozytu wapienno-konopnego.....	33
5.5. Techniki wykonywania pozostałych przegród	37
5.6. Wybrane właściwości kompozytu wapienno-konopnego	39
6. Wpływ środowiskowy wykorzystania konopi w budownictwie	44
7. Materiały wykorzystane w badaniach.....	52
7.1. Wypełniacze	52
7.2. Spoiwo.....	55
8. Receptury	61
9. Przygotowywanie mieszanki wapienno-konopnej.....	66
10. Przygotowywanie próbek do badań.....	68
11. Metoda analizy statystycznej wyników	70
12. Badania materiału	72
12.1. Program badań.....	72
12.2. Gęstość objętościowa	73
12.3. Porowatość całkowita.....	76
12.4. Przewodnictwo cieplne	78
12.5. Nasiąkliwość wagowa	85
12.6. Podciąganie kapilarne	90

12.7.	Współczynnik przepuszczalności pary wodnej	96
12.8.	Wytrzymałość na ściskanie	100
12.9.	Wytrzymałość na zginanie	109
13.	Charakterystyka kompozytu wapienno-konopnego w przegrodach ściennych	116
13.1.	Ogólne założenia przyjęte w analizie	116
13.2.	Ocena możliwości wystąpienia kondensacji w przegrodzie	118
13.3.	Analiza występowania mostków termicznych w ścianie	129
14.	Podsumowanie	139
15.	Wnioski końcowe	142
	Literatura	147

Kompozyt wapienno-konopny jako materiał ścienny spełniający wymagania zrównoważonego rozwoju w budownictwie

Streszczenie

Problemem naukowym pracy jest ocena możliwości zastosowania kompozytu wapienno-konopnego w ścianach zewnętrznych budynków.

W części studialnej opisano m.in. wpływ środowiskowy wykorzystania konopi w budownictwie. Scharakteryzowano kompozyt wapienno-konopny oraz techniki budowania. W części badawczej wykazano zależności pomiędzy zmiennym składem kompozytów, a ich właściwościami. Zbadano także wpływ częściowego zastąpienia paździerzy konopnych perlitem ekspandowanym i paździerzami lnianymi na właściwości kompozytu.

Kompozyty wykazały niską gęstość objętościową, wysoką porowatość, niską przewodność cieplną, wysoką nasiąkliwość oraz niskie parametry mechaniczne. Rodzaj oraz frakcje paździerzy, a także obecność innych wypełniaczy wpływają na właściwości kompozytu. Możliwe jest wyeliminowanie ryzyka kondensacji w przegrodzie. Elementy drewniane stanowiące konstrukcję w przegrodach wykonanych z kompozytu stanowią niewielki mostek termiczny.

Słowa kluczowe: kompozyt, przewodnictwo cieplne, wytrzymałość, kondensacja, mostek cieplny

Hemp-lime composite as wall material meeting the requirements of sustainable development in construction industry

Abstract

The scientific problem of the work is the assessment of the possibility of using a hemp-lime composite in the external walls of buildings.

The theoretical part describes environmental impact of hemp use in construction. The hemp-lime composite and building techniques were characterized. The research part concerns the relationships between the variable composition of composites and their properties. The effect of partial replacement of hemp shives with expanded perlite and flax shives on properties was also investigated.

Composites showed low bulk density, high porosity, low thermal conductivity, high water absorption and low mechanical parameters. The type and fraction of shives, as well as the presence of other fillers affect the properties of the composite. It is possible to eliminate the risk of condensation in the wall. Timber structural elements in the walls made of composite form a small thermal bridges.

Keywords: composite, thermal conductivity, strength, condensation, thermal bridge

Spis symboli

Symbole zostały uszeregowane alfabetycznie zgodnie z alfabetem łacińskim oraz greckim (małe, a następnie wielkie litery):

- d_1 i d_2 – wymiary przekroju poprzecznego próbki (szerokość, wysokość) [cm]
- d_m – grubość warstwy materiału [m]
- dT/dx – gradient temperatury na izotermicznej płaskiej powierzchni próbki [K/m]
- e – grubość próbki [m]
- f_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa]
- f_t – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]
- g_g – gęstość strumienia wilgoci [kg/(m²·s)]
- l – rozstaw podpór belki [cm]
- l_i – długość przypisana do wartości współczynnika U_i [m]
- m_s – masa próbki wysuszonej do stałej masy [g]
- m_w – masa próbki nasyconej wodą [g]
- n – liczba elementów w próbie
- n_w – nasiąkliwość wagowa [%]
- p_e – ciśnienie rzeczywiste pary wodnej na powierzchni zewnętrznej [Pa]
- p_i – ciśnienie rzeczywiste pary wodnej na powierzchni wewnętrznej [Pa]
- p_{sat} – ciśnienie pary wodnej nasyconej [Pa]
- q – gęstość strumienia ciepła przechodzącego przez próbkę [W/m²]
- t – temperatura [K]
- \bar{x} – średnia arytmetyczna w próbie
- x_i – kolejna wartość danej zmiennej w próbie
- A – pole powierzchni próbki [m²]
- A_c – pole przekroju poprzecznego próbki, na które działa siła ściskająca obliczane na podstawie wymiaru deklarowanego próbki [mm²]
- F_c – maksymalne obciążenie przy niszczeniu (ściskanie) [N]
- F – maksymalne obciążenie przy niszczeniu (zginanie) [kN]
- L^{2D} – współczynnik sprzężenia cieplnego uzyskany z analizy 2D modelowanego elementu [W/(m·K)]
- R – opór cieplny [(m²·K)/W]
- $R_{si,min}$ – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody [0,25 (m²·K)/W]
- $R_{T,min}$ – najniższy opór cieplny sekcji wydzielonej z komponentu budowlanego [(m²·K)/W]
- T_1, T_2 – temperatury ścianek ograniczających warstwę izolacji [K]

U_i	– współczynnik przenikania ciepła i -tego komponentu modelowanego elementu [W/(m ² ·K)]
δ_0	– opór powietrza, równy $2 \cdot 10^{-10}$ [kg/(m·s·Pa)]
$\theta_{si,min}$	– temperatura powierzchni wewnętrznej [°C]
θ_i	– temperatura powietrza wewnętrznego [°C]
θ_e	– średnia miesięczna temperatura powietrza zewnętrznego [°C]
λ	– współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]
μ	– współczynnik oporu dyfuzyjnego [-]
φ_e	– średnia miesięczna wilgotność względna powietrza zewnętrznego [%]
Δm	– zmiana masy [kg]
Δm_w	– masa zabsorbowanej wody [kg]
Δp	– nadwyżka ciśnienia atmosferycznego [Pa]
ΔP_g	– gradient ciśnienia pary wodnej [Pa]
ΔT	– zmiana temperatury [°C]

1. Wprowadzenie

Zrównoważony rozwój jest modelem rozwoju, w którym zaspokajanie bieżących potrzeb społecznych i potrzeb przyszłych pokoleń jest traktowane równoprawnie. Potrzeby te zaspokajane są w sposób harmonijny z troską o zachowanie dziedzictwa przyrodniczego i kulturowego narodu, jak również z postępowaniem cywilizacyjnym i ekonomicznym, będącym udziałem wszystkich grup społecznych.

Budownictwo jest energochłonną dziedziną gospodarki. Budowa i eksploatacja budynków stanowią ok. 40% końcowego zużycia energii w UE oraz 35% emisji gazów cieplarnianych. W związku z tym, obecnie zwracana jest uwaga na zrównoważony rozwój w budownictwie – na wpływ środowiskowy, który związany jest przede wszystkim z emisją dwutlenku węgla w całym cyklu życia budynku. Zaostrzane są wymagania związane z izolacyjnością cieplną przegród zewnętrznych. Celem zmian jest obniżenie ilości energii niezbędnej do pokrycia zapotrzebowania budynków na ciepło. Spełnienie tych wymagań wiąże się z zastosowaniem wydajnych izolacji termicznych, wysoce przetworzonych, np. styropian, pianka poliuretanowa lub wełna mineralna. Materiały te zredukują emisję dwutlenku węgla w fazie użytkowania z uwagi na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Jednak są one produkowane są przy wykorzystaniu paliw kopalnych, a także innych nieodnawialnych zasobów przyrody. Ich produkcja wiąże się z dużym zużyciem energii oraz emisją dwutlenku węgla (I.Z. Bribian i in. 2011; D. Anastaselos i in. 2009; F. Asdrubali 2006; F. Asdrubali 2009; S. Schiavoni i in. 2016). Pojawia się również problem utylizacji tych materiałów po zakończeniu cyklu życia, wiążący się ze znacznym nakładem energii. Zasadne jest wykorzystanie materiałów termoizolacyjnych, które wykazują aspekt ekologiczny w całym cyklu życia. Przykładem są niskoprotworzone materiały termoizolacyjne, których główny składnik stanowią materiały pochodzenia roślinnego. Rośliny w czasie wzrostu pochłaniają z atmosfery dwutlenek węgla w procesie fotosyntezy. Zestawiając emisję dwutlenku węgla wynikającą z procesu produkcji materiałów izolacyjnych na bazie składników roślinnych i absorpcję dwutlenku węgla przez rośliny podczas wzrostu, otrzymuje się ujemny ślad węglowy. Poza fazą produkcji materiałów zastosowanych w danym budynku, istotna jest też faza zakończenia cyklu życia, np. rozbiórka budynku. Materiały zawierające składniki organiczne pochodzenia roślinnego są biodegradowalne, ulegają rozkładowi w sposób naturalny pod wpływem oddziaływania warunków atmosferycznych oraz mikroorganizmów. Mogą być również przydatne w rolnictwie, jako nawóz (kostki słomy, kompozyt wapienno-konopny, glina lekka). W przypadku materiałów wysoko przetworzonych takich jak styropian lub wełna mineralna, problemem jest ich składowanie lub energochłonna utylizacja. Można je wykorzystać ponownie jednak zwykle są one zanieczyszczone tynkiem lub klejem, co ogranicza takie działania.

Budownictwo zrównoważone zakłada wykorzystanie materiałów lokalnych, dostępnych, w jak najmniejszym stopniu przetworzonych, ale również takich, które nie będą wpływały negatywnie na jakość życia i zamieszkania. Jako materiał ścienny spełniający powyższe założenia, w Polsce w ostatnich latach stosowane są kostki słomy (*ang. Strawbale*). Jest to materiał nieobjęty w Polsce normami. Ogólnopolskie Stowarzyszenie Budownictwa Naturalnego podjęło się przeprowadzenia badań dotyczących przewodności cieplnej kostek słomy oraz odporności ścian z kostek słomy na działanie ognia. Obecnie, zgodnie z prawem budowlanym taki materiał może być stosowany w budownictwie mieszkaniowym jako wyrób jednostkowego zastosowania.

Kolejnym materiałem pochodzenia roślinnego, który stosowany jest w budownictwie jako m.in. materiał ścienny jest kompozyt wapienno-konopny. Materiał oparty na paździerzach konopnych oraz spoiwie wapiennym stosowany jest jako wypełnienie przegród w konstrukcji drewnianej szkieletowej i służy głównie jako izolacja termiczna. Materiał był i ciągle jest badany pod kątem różnych właściwości, np. mechanicznych (L. Arnaud i in. 2012; S. Benfratello i in. 2013; S. Elfordy i in. 2008; P. Brzyski i in. 2017a), wilgotnościowych (B.P. de Bruijn i in. 2009; R. Walker i in. 2014a,c), cieplnych (R. Walker i in. 2014a,c, Stevulova i in. 2013, S. Benfratello i in. 2013; F. Collet i in. 2014; P. Brzyski i in. 2017a). Badania te dotyczą jednak kompozytu opartego na paździerzach z konopi pozyskanych lokalnie, w krajach, w których prowadzono badania. Zgodnie z ideą budownictwa zrównoważonego, wykorzystując tą technologię w Polsce należałoby stosować również lokalne plony konopi. Istotna jest wiedza dla projektantów, inwestorów i wykonawców czy paździerze produkowane lokalnie będą właściwym wypełniaczem w kompozycie i nie będą wykazywały gorszych właściwości niż te, wysokiej jakości produkowane we Francji. Analogiczna zależność dotyczy spoiwa wapiennego. Istnieją gotowe spoiwa przeznaczone do zastosowania z tym materiałem, produkowane we Francji. W Polsce są trudno dostępne, dlatego też chcąc uzyskać materiał ekologiczny, zrównoważony, bardzo istotne jest opracowanie spoiwa z materiałów dostępnych w polskich składach budowlanych. Wszelkie, wieloaspektowe badania w zróżnicowanych warunkach – głównie cieplno-wilgotnościowych są istotne z uwagi na ocenę możliwości szerokiego zastosowania kompozytu w budownictwie i w przyszłości stworzenia stosownych norm. Modyfikacje składu służą polepszeniu konkretnych właściwości. Stosowanie dodatków, domieszek, częściowych zamienników jest ciągle badane w celu zoptymalizowania różnych składowych, przede wszystkim zwracając uwagę na dostępność materiału, jego koszt, wpływ środowiskowy oraz skuteczność w otrzymaniu pożądaney właściwości.

Materiały naturalne, składające się z materiałów organicznych są wrażliwe na niekorzystne warunki wilgotnościowe. Ściana wykonana z takich materiałów powinna pozostać otwarta dyfuzyjnie, aby gromadzona wilgoć mogła zostać odprowadzona bez ryzyka rozwoju korozji biologicznej. Przegrody ścienne powinny być projektowane jako wolne od kondensacji pary wodnej. Zjawisko to

uzależnione jest od wielu czynników. Przede wszystkim od budowy, układu warstw w ścianie, ale również od warunków ciepłno-wilgotnościowych panujących po dwóch stronach przegrody. Aby projektanci mogli kształtować przegrody z tego materiału uwzględniając lokalne, miesięczne warunki ciepłno-wilgotnościowe, potrzebne są analizy możliwości wystąpienia kondensacji w przegrodzie.

W celu zwiększenia efektywności wykorzystania materiałów termoizolacyjnych bardzo ważne jest projektowanie bez mostków termicznych. W przypadku organicznych materiałów mogą być one zagrożeniem z uwagi na zwiększone zawilgocenie takich miejsc. Brakuje analiz numerycznych przegród wykonanych z kompozytu wapienno-konopnego pod kątem rozkładu temperatury w przegrodach. Jest to wiedza niezbędna dla projektantów. Rozkład temperatury można modyfikować poprzez zmianę składu kompozytu, skutkującą zmianą przewodności cieplnej materiału.

Z uwagi na złożoność problematyki wykorzystania naturalnych materiałów w budownictwie, jakimi są kompozyty wapienno-konopne, celowym jest jej rozwiązanie poprzez przeprowadzenie stosownych badań i analiz, a także wskazanie korzyści z zastosowania zaproponowanego w pracy kompozytu na bazie konopi włóknistych i spoiwa wapiennego modyfikowanego dodatkami. Rozpatrywana w pracy technologia jest istotna w budownictwie opartym o idee zrównoważonego rozwoju, gdyż wykazuje pozytywny aspekt środowiskowy w ciągu cyklu życia materiału, tj. ujemny ślad węglowy oraz brak problemu z odpadami po rozbiórce budynku, z uwagi na biodegradowalność materiału.

Zamierzeniem prac ujętych w monografii jest ocena możliwości zastosowania paździerzy konopnych oraz spoiwa wapiennego wraz z wybranymi dodatkami do wykonywania zewnętrznych przegród ściennych w budownictwie. W pracy wyszczególniono istotne problemy, które wymagają podejścia naukowego, a ich rozwiązanie może wnieść wkład w rozwój technologii wykorzystania konopi w budownictwie.

2. Problem naukowy, cele i zakres pracy

2.1. Problem naukowy i cele pracy

Problemem naukowym pracy jest ocena możliwości zastosowania kompozytu wapienno-konopnego w ścianach zewnętrznych budynków na przykładzie wieloaspektowych badań.

Rozwiązanie problemu naukowego, będącego celem głównym pracy, wymaga osiągnięcia następujących celów szczegółowych:

- opracowanie receptur kompozytów
- określenie zależności pomiędzy zmiennym składem kompozytów, a ich właściwościami
- określenie wpływu rodzaju, zawartości oraz długości frakcji paździerzy, na właściwości kompozytów
- ustalenie wpływu dodatku innych wypełniaczy (paździerze lniane, perlit ekspandowany) na wybrane właściwości kompozytów
- ocena przydatności wykorzystania kompozytu wapienno-konopnego jako materiału ściennego na podstawie analizy cieplno-wilgotnościowej przegród.

2.2. Zakres pracy

Pracę podzielono na następujące elementy:

- dokonanie przeglądu literatury przedmiotu, w tym: problem zrównoważonego rozwoju w budownictwie, zastosowanie konopi w budownictwie, charakterystyka kompozytu wapienno-konopnego, wpływ środowiskowy wykorzystania konopi w budownictwie
- opracowanie metodyki badań własnych
- opracowanie zestawu receptur kompozytów wapienno-konopnych stosując różne zależności w składzie, a także wykorzystując częściowe zamienniki paździerzy konopnych w postaci paździerzy lnianych oraz perlitu ekspandowanego
- analiza wybranych właściwości kompozytów i dobór 4 różnych receptur do dalszych badań
- przeprowadzenie analizy możliwości wystąpienia kondensacji w ścianie zewnętrznej wykonanej z 4 wybranych kompozytów, różniących się właściwościami
- przeprowadzenie analizy występowania mostków termicznych w ścianach zewnętrznych i narożach wykonanych z 4 wybranych kompozytów, różniących się właściwościami, w dwóch wariantach konstrukcyjnych
- podsumowanie, wnioski końcowe.

3. Zrównoważony rozwój w budownictwie

Budownictwo opierające się o zasady zrównoważonego rozwoju realizuje metody oszczędzania zasobów naturalnych, przeciwdziałania zanieczyszczeniu powietrza, wody oraz gleby. Metody te mogą polegać na oszczędzaniu surowców naturalnych, poszukiwaniu alternatyw dla nich; redukcji zużycia energii podczas produkcji, procesów technologicznych; wykorzystywaniu w budownictwie materiałów niskoprzetworzonych; dążeniu do ograniczenia ilości odpadów powstałych podczas produkcji materiałów budowlanych lub procesów ich wykorzystania, wbudowania; zagospodarowaniu lub utylizacji powstałych odpadów; odzyskiwaniu materiałów i ich ponownym wykorzystaniu.

Zgodnie z tą ideą, aby ograniczyć wpływ sektora budownictwa na środowisko naturalne poddaje się ocenie materiały, wyroby budowlane oraz proces technologiczny ze względu na ich oddziaływanie na środowisko. Oprócz materiałów ocenie poddaje się cykl życia obiektu budowlanego, z naciskiem na jego fazę użytkowania – zużycie energii oraz wody. W szczegółowej ocenie wpływu budynku w cyklu życia uwzględnia się cały proces budowlany, począwszy od wydobycia surowców potrzebnych do produkcji materiału budowlanego, aż po okres rozbiórki i utylizacji odpadów, wraz z rekultywacją terenu porozbiórkowego.

Do ceny oddziaływania budynku na środowisko w całym cyklu życia stosuje się różne metody analityczne. Jedną z nich jest metoda LCA (*Life Cycle Assessment*), której wytyczne zawarte są w normie PN-EN 15804. Polega ona na zidentyfikowaniu wzajemnego oddziaływania rozpatrywanego procesu i środowiska oraz określeniu ilościowym strumieni masy i energii przekazywanych i pobieranych ze środowiska. Zgodnie z wyżej wymienioną normą, w ocenie cyklu życia rozpatrywane są następujące moduły:

- Faza wyrobu:
 - wydobywanie, wytwarzanie i transport surowców
 - produkcja wyrobu i jego transport
 - instalacja, wbudowanie
- Faza użytkowania:
 - użytkowanie
 - konserwacja
 - naprawa
 - wymiana
 - odnowienie
- Faza końca cyklu życia:
 - rozbiórka/ wyburzenie
 - transport
 - recykling/ ponowne użycie
 - składowanie

Deklaracje środowiskowe III-go rodzaju (EPD) dla wyrobu budowlanego powinny uwzględniać wszystkie fazy cyklu istnienia wyrobu. Deklaracja ta stanowi zbiór danych charakteryzujących energochłonność i emisje w poszczególnych fazach istnienia wyrobu budowlanego.

Budownictwo ma znaczący wpływ na wyczerpanie zasobów nieodnawialnych i na emisję gazów cieplarnianych, wynikające ze spalania paliw kopalnych. Podkreśla to potrzebę oszczędności energii w budynkach i przyjęcia bardziej zrównoważonych rozwiązań, w szczególności poprzez zmniejszenie zużycia energii i emisji gazów cieplarnianych. Stosowanie materiałów termoizolacyjnych doprowadza do zmniejszenia zużycia energii w fazie użytkowania budynku, jednak cykl życia danego materiału niekoniecznie musi wywierać pozytywny wpływ na środowisko. Kiedy budynek osiąga standard energooszczędnego w fazie użytkowania to istotna jest wtedy również energia wbudowana każdego materiału w budynku. Produkcja takich materiałów może opierać się na zużyciu paliw kopalnych oraz wiązać się z emisją zanieczyszczeń. Problemem może być także ich utylizacja.

Budynki są odpowiedzialne za znaczną część światowego zużycia energii. Zużycie energii w budownictwie stanowi około 40% światowego zapotrzebowania na energię, a około 60% z całkowitego zapotrzebowania na energię w budynkach stanowią potrzeby na cele ogrzewania oraz chłodzenia (O. Kaynakli 2012). W przypadku danych statystycznych dotyczących zużycia energii w Europie, budynki stanowią prawie jedną trzecią całkowitej emisji dwutlenku węgla, związanej z energią (D. Anastaselos i in. 2009). W danych tych uwzględniony jest przede wszystkim wbudowany dwutlenek węgla, ale również ilości wyemitowane podczas produkcji materiałów, w procesach budowy, a także w procesach rozbiórki i ewentualnej utylizacji. W celu ograniczenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania, częstym działaniem jest docieplanie budynków, które już są w należyтым stopniu izolowane termicznie. Efekt takiego działania może okazać się odwrotny do założonego, gdyż ilość wyemitowanego CO₂ w czasie produkcji, montażu oraz późniejszej utylizacji tego dodatkowego materiału termoizolacyjnego może przewyższyć tą, która zostałaby wyemitowana w cyklu życia budynku, gdyby nie dokonano termomodernizacji. Omer Kaynakli (O. Kaynakli 2012) przeanalizował dotychczasowe badania na temat doboru grubości ocieplenia elewacji i jej wpływu na zużycie energii w cyklu życia budynku. Autor dowiódł, że optymalna grubość izolacji termicznej i związane z nią zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia są ściśle uzależnione od temperatury ogrzewania i chłodzenia w ciągu roku, które z kolei związane są ze strefą klimatyczną, w której znajduje się budynek.

Zauważyć można rosnące zainteresowanie odnawialnymi materiałami wykazującymi różne aspekty ekologiczne. Tradycyjne i powszechne materiały budowlane coraz częściej zastępuje się zrównoważonymi, niskoprzetworzonymi, co pozwala zmniejszyć wpływ przemysłu budowlanego w zakresie zużycia energii pierwotnej i emisji gazów cieplarnianych. Francesco Asdrubali

(F. Asdrubali i in. 2012) stwierdził, że zrównoważone materiały to takie, które są zazwyczaj wykonane z materiałów naturalnych lub poddanych recyklingowi, a ich produkcja ma niewielki wpływ na środowisko, wymagając niewielkich nakładów energii i nieodnawialnych zasobów. W szczególności produkcja materiałów z recyklingu jest zjawiskiem rosnącym, które według Pranee Lertsutthiwong i in. (P. Lertsutthiwong i in. 2008) dotyczy zapobiegania zanieczyszczeniom środowiska pochodzącym z odpadów przemysłowych i rolniczych. W ciągu ostatnich kilku lat powstało wiele publikacji, w których analizie poddane zostały systemy izolacji cieplnej budynków (z odpadów i materiałów poddanych recyklingowi) w celu obniżenia ich energii wbudowanej i poprawy jakości środowiska (P. Lertsutthiwong i in. 2008; C. Ingrao i in. 2014).

Wpływ niskoprzetworzonych materiałów budowlanych na poziom zużycia energii w cyklu życia budynku analizowała Luisa F. Cabeza (L.F. Cabeza i in. 2013), podkreślając trudności w jednoznacznym określeniu poziomu wpływu. Ellis Gartner (E. Gartner 2004) badał możliwości zastąpienia cementu portlandzkiego innymi cementami, w celu ograniczenia ilości wyemitowanego CO₂ na jednostkę wyprodukowanego z tych cementów betonu, przy zachowaniu właściwości. Venkatarama Reddy B. (V.B. Reddy 2009) badał możliwości zastąpienia wypalanych cegieł, stabilizowanymi bloczkami z gliny (niewypalnymi), które mogą ograniczyć ilość wbudowanej energii, która jest w ceglach wypalanych o 60–70% większa niż w tych, badanych przez niego. Według Anabela Paiva (A. Paiva i in. 2012), wykorzystując zrównoważone materiały i technologie możliwe jest wykonanie zrównoważonej, również ekonomicznie, konstrukcji, nie naruszając standardów komfortu i wymaganych warunków technicznych.

Som S. Shrestha (S.S. Shrestha i in. 2014) opisał czynniki związane z cyklem życia materiałów izolacyjnych, które należy wziąć pod uwagę przy ocenie bezpośredniego i pośredniego oddziaływania na środowisko. Wyniki badania zachęcały do stosowania zaawansowanych materiałów izolacyjnych w celu zapewnienia wyższych oszczędności energii i mniejszego wpływu środowiskowego.

Badania literatury dowodzą, iż aby stworzyć możliwości osiągnięcia neutralnego lub korzystnego wpływu środowiskowego w budownictwie należałoby stosować się do kilku alternatyw takich jak wykorzystanie materiałów recyklingowych, a także odnawialnych surowców pochodzenia roślinnego takich jak drewno, słoma czy konopie przemysłowe. Zastosowanie materiałów roślinnych w budownictwie może doprowadzić do korzystnego eko-bilansu. Dwutlenek węgla pochłonięty i zmagazynowany w tkankach roślin w czasie wzrostu może przewyższyć ten wyemitowany podczas produkcji oraz utylizacji pozostałych materiałów wykorzystanych w budynku. W ostatnich latach przedmiotem zainteresowań w sektorze budownictwa ekologicznego stały się konopie przemysłowe, a dokładnie materiał budowlany z nich wykonany, jakim jest kompozyt wapienno-konopny.

4. Zastosowanie konopi przemysłowych w budownictwie

Istnieją dowody na to, że konopie były stosowane w budownictwie co najmniej od kilku wieków, czego przykładem może być dom rodziny Nakamura wybudowany w 1698 roku w japońskiej wsi Miasa (W. Stanwix i in. 2014). Przy jego budowie wykorzystano m.in. łodygi konopi jako strzechę oraz konopne liny do jej zamocowania.

Wykorzystanie konopi przemysłowych w budownictwie jako składnik kompozytu wapienno-konopnego miało swój początek we Francji na przełomie lat 80. i 90. Podczas renowacji historycznych budynków wykonanych w technologii drewnianej konstrukcji szkieletowej zaczęto stosować eksperymentalne rozwiązania w celu uzupełnienia ubytków w ścianach wykonanych z naturalnych materiałów takich jak wiklina, słoma, sierść zwierzęca (S. Allin 2012, R. Bevan i in. 2010). Starano się dobrać materiał trwały oraz nieograniczający paroprzepuszczalności. Trwałym spoiwem i niezastąpionym w wielu obszarach budownictwa jest cement portlandzki, będący spoiwem hydraulicznym, szybkowiążącym, osiągającym wysoką wczesną wytrzymałość. Jednak pokrycie drewna lub organicznego wypełniacza szczelnym spoiwem cementowym, doprowadzi do zablokowania swobodnego przepływu gazów, utrudniając wysychanie materiałem organicznym, czego efektem może być rozwój pleśni, a w końcu szybszy rozkład materiałów w środowisku nadmiernej, długotrwałej wilgotności. Potrzebne było spoiwo, które zapewni paroprzepuszczalność, dobre warunki zdrowotne zamieszkania, a także wieloletnią trwałość. Spoiwem spełniającym te wymagania jest wapno, czego dowodem są stojące do dziś starożytne budynki i budowle wykonane przy użyciu spoiwa wapiennego z tzw. „betonu wapiennego” np. Koloseum, Panteon, rzymskie akwedukty (E. Osiecka 2005). Jako wypełniacz w masie uzupełniającej ubytki poszukiwano materiału, który będzie paroprzepuszczalny, będzie zapewniał zdrowy mikroklimat w budynku, a także wykazywał dobre parametry termoizolacyjne. Odkryto, że lokalny materiał, jakim są konopie przemysłowe, a konkretnie ich zdrewniałe części łodygi pocięte na kawałki będą właściwym materiałem. Pomysłodawcą wykorzystania konopi w tym celu był Charles Rasetti – ekspert w dziedzinie renowacji zabytkowych budynków. Po raz pierwszy wykorzystał ten pomysł przy remoncie budynku zwanego „Dom Turka” (oryg. La Maison de la Turquie) (Rys.4.1), zlokalizowanego w miejscowości Nogent-sur-Seine, znajdującej się w historycznej prowincji we Francji – Szampanii (S. Allin 2012).



Rys. 4.1. La Maison de la Turquie
[Allin 2012]



Rys. 4.2. Maison d'Adam
[www.spottinghistory.com]

Ważnym przedsięwzięciem była renowacja budynku datowanego na XV wiek, zwanego Domem Adama (oryg. Maison d'Adam), zlokalizowanego w mieście Angers we Francji (Rys. 4.2). Jest to sześciopiętrowy budynek, którego konstrukcję stanowi drewniany szkielet. Mieszanka słomy i gliny stanowiąca wypełnienie ścian w połowie XX wieku, została naprawiana materiałem na bazie cementu, który nie sprawdził się w połączeniu z istniejącym, organicznym wypełnieniem. W 1995 roku przystąpiono do renowacji budynku, wykorzystując kompozyt wapienno-konopny jako wypełnienie ścian. Budynek jest obecnie użytkowany (S. Allin 2012).

Pierwszy zbudowany od podstaw dom z wykorzystaniem konopi w ścianach został zbudowany blisko Tours we Francji na przełomie lat 80. i 90. (Rys.4.3).



Rys. 4.3. Dom z konopi zbudowany blisko Tours we Francji [Allin 2012]

Pierwsze zastosowania w nowobudowanych budynkach kompozyt odnalazł w wypełnieniu drewnianych konstrukcji szkieletowych ścian. Mieszanka paździerzy konopnych i wapna hydratyzowanego aplikowana była w sposób monolityczny, w deskowanie ścienne, otaczając słupy drewniane. Dalsze próby

dowodły, że mieszanka może znaleźć zastosowanie również, jako warstwa dachu lub podłogi.

Budowanie z konopi stało się coraz bardziej popularne. Wiele profesjonalnych oraz amatorskich ekip budowlanych we Francji próbowało wykorzystać ten materiał w renowacji starych budynków lub w nowych projektach. W końcu problemem stało się zbyt wiele eksperymentów i brak jasnych instrukcji odnośnie dobrych praktyk w budowaniu z konopi. W tym celu powstały stowarzyszenia skupiające sympatyków tej technologii, oceniające różne rozwiązania i promujące te najlepsze, najbardziej poprawne technicznie. We Francji powstało w 1998 roku stowarzyszenie Construire en Chanvre, natomiast w Irlandii w 2009 roku stowarzyszenie The International Hemp Building Association, skupiające członków z całego świata. We Francji wyznaczone są ściśle wytyczne odnośnie uprawy dla rolników zajmujących się uprawą konopi przemysłowych na cele budowlane, mające zapewnić wysoką jakość surowca, a w konsekwencji wyrobu budowlanego.

5. Kompozyt wapienno-konopny

5.1. Ogólna charakterystyka

Materiał budowlany składający się z paździerzy konopnych, spoiwa wapiennego oraz wody nazywany jest w literaturze obcej: *hemp-lime*, *hempcrete*, *hemp concrete* (S. Allin 2012, R. Bevan i in. 2010, Stanwix i in. 2014). W pracy przyjęto określenie materiału jako „kompozyt wapienno-konopny”. Definicja kompozytu wg Lawrence'a J. Broutmana i Richarda H. Krocka, podana w 1967 roku (L.J. Broutman i in. 1967) podaje cztery kryteria, które materiał musi spełnić, aby możliwe było określenie go jako kompozyt:

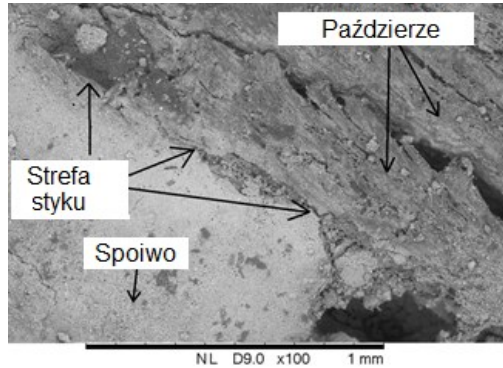
- kompozyt jest materiałem wytworzonym sztucznie,
- kompozyt musi się składać z co najmniej dwóch różnych pod względem chemicznym materiałów z wyraźną granicą rozdziału między komponentami (fazami),
- komponenty charakteryzują kompozyt swymi udziałami objętościowymi,
- kompozyt charakteryzuje się takimi właściwościami, jakich nie mają komponenty osobno.

Z kolei wg Encyklopedii Powszechnej PWN z 1988 roku (PWN 1988), kompozytem nazywa się „materiał wytworzony z co najmniej dwóch komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma on właściwości lepsze i (lub) właściwości nowe (dodatkowe) w stosunku do komponentów użytych osobno, lub wynikające z prostego sumowania tych właściwości; kompozyt jest materiałem zewnętrznie monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami”.

Omawiany materiał oparty na konopiach przemysłowych składa się z co najmniej trzech składników, różniących się pod względem chemicznym oraz posiadających różne funkcje i właściwości. Spoiwo materiału stanowi wapno hydratyzowane modyfikowane dodatkami. Możliwe są inne spoiwa jak np. glina (G. Balčiūnas i in. 2013; B. Mazhoud i in. 2017), spoiwo magnezjowe (L. Kidalova i in. 2011; N. Stevulova i in. 2013). Wypełniaczem są paździerze konopne oraz opcjonalnie, w mniejszym udziale paździerze lniane lub perlit ekspandowany. Woda zapewnia zajście i prawidłowe przeprowadzenie procesów wiązania spoiwa, a także prawidłowe wykonanie mieszanki (uzyskanie właściwej konsystencji, układanie, zagęszczanie). Paździerze konopne są izolatorem termicznym, jednak w połączeniu z wapnem uzyskuje się materiał monolityczny, sztywny, o wysokiej pojemności cieplnej, odporny na korozję biologiczną oraz oddziaływanie ognia. Połączone składniki (wapno i paździerze) tworzą monolityczny materiał o wyraźnych granicach (strefach styku) między sobą (Rys. 5.1, 5.2).



Rys. 5.1. Przekrój przez próbkę kompozytu wapienno-konopnego [P. Brzyski]

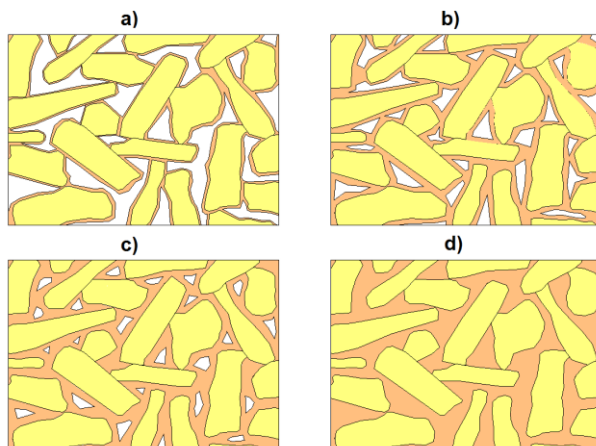


Rys. 5.2. Obraz SEM styku pomiędzy spoiwem a wypełniaczem [P. Brzyski]

Zauważyć można analogię do tradycyjnego materiału konstrukcyjnego, jakim jest beton zwykły, czyli materiał kompozytowy, który składa się ze spoiwa w postaci cementu w miejsce wapna oraz wypełniacza w postaci kruszywa mineralnego zamiast organicznego (paździerzy). Dodatkowo, potocznie ten materiał w nawiązaniu do analogii z betonem zwykłym nazywany jest „betonem konopnym” (*hemp concrete*) (P.B. de Bruijn i in. 2009, W. Stanwix i in. 2014).

Kompozyt wapienno-konopny pełni funkcję wypełnienia ścian, których konstrukcję stanowi zwykle drewniany szkielet. Nie jest przeznaczony do przenoszenia obciążeń ze stropu oraz dachu. Przy odpowiedniej grubości ściany (zwykle około 350–500 mm) spełnione zostają wymagania cieplne stawiane przez Warunki Techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, bez konieczności stosowania dodatkowych warstw izolacji termicznej. Poza zastosowaniem w ścianach, kompozyt wapienno-konopny może być wykorzystywany, jako izolacja termiczna podłóg oraz dachów. Zaletą wykorzystania mieszanki do izolowania wszystkich wymienionych przegród jest zachowanie ciągłości izolacji termicznej po obwodni budynku. W ten sposób zredukowane mogą zostać mostki termiczne, które często występują w takich miejscach jak węzły – połączenia przegród, np. dach ze ścianą lub podłoga na gruncie ze ścianą.

W zależności od miejsca zastosowania (ściany, dach, podłoga, tynk) wymagany jest odpowiedni udział spoiwa oraz stopień zagęszczenia mieszanki. W dachach i podłogach stosowana jest luźna zasyпка, więc spoiwo wykorzystywane jest w małym stopniu. W ścianach istotna jest siła wiązania, dlatego udział spoiwa jest zwiększony. Jeszcze większą zawartość spoiwa stosuje się w przypadku receptur wykorzystywanych jako warstwy podłogi. Z kolei największy udział spoiwa charakteryzuje mieszanki tynkowe. Rysunek 5.3 przedstawia schematy pokrycia paździerzy wapnem w zależności od miejsca wbudowania kompozytu.



Rys. 5.3. Schemat pokrycia paździerzy wapnem w przypadkach wykorzystania kompozytu w: a) dachach i stropach; b) ścianach; c) podłogach; d) tynkach [Opr. własne na podst. Allin 2012]

5.2. Wapno jako spoiwo w kompozycie wapienno-konopnym

5.2.1. Otrzymywanie wapna i procesy wiązania

Wapno określane jest często jako spoiwo naturalne i ekologiczne. Związane jest to z pełnym cyklem życia, który przechodzi wapno w budowlanych zastosowaniach. Produkcja wapna powietrznego składa się z następujących etapów:

- wydobywanie skały wapiennej – węglanu wapnia CaCO_3
- wypalenie skały w temperaturze około $800\text{--}900^\circ\text{C}$. Produktem reakcji (1) jest tlenek wapnia oraz dwutlenek węgla.



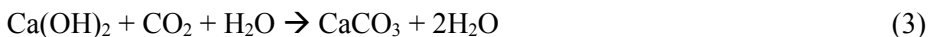
- gaszenie tlenku wapnia CaO , czyli tzw. wapna palonego. Gaszenie może odbywać się za pomocą dużej lub małej ilości wody, a także za pomocą pary wodnej. Gaszenie można opisać równaniem reakcji chemicznej (2):



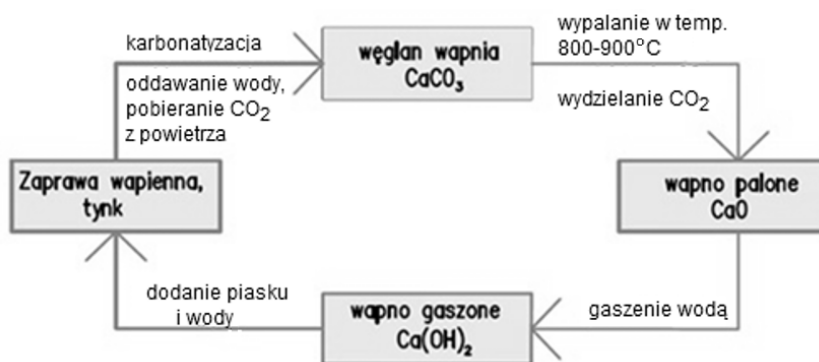
- otrzymany w wyniku procesu gaszenia wodorotlenek wapnia Ca(OH)_2 , zwany wapnem gaszonym lub hydratyzowanym jest wykorzystywany w budownictwie jako spoiwo w zaprawach, tynkach, a także w kompozycie wapienno-konopnym.

Proces wiązania i twardnienia wapna jest procesem złożonym i długotrwałym. Po zmieszaniu wapna z wodą następuje proces krystalizacji, polegający na zrastaniu się ze sobą uwodnionych kryształków wodorotlenku wapnia wraz z postępującą utratą wody na skutek jej odparowywania. Proces ten jest

odwracalny. Kolejny proces wiązania i twardnienia to karbonatyzacja. Ta reakcja chemiczna polega na przyłączeniu dwutlenku węgla z atmosfery do wodorotlenku wapnia w obecności wilgoci. Reakcja ma postać (3):



Produktem reakcji karbonatyzacji jest węglan wapnia. Spoiwo powraca do swojej postaci wyjściowej, zatacza krąg w swoim cyklu życia (Rys. 5.4). Jest to główny powód, za sprawą którego wapno nazywane jest spoiwem naturalnym. Natomiast pochłanianie dwutlenku węgla w czasie wiązania i twardnienia jest ekologicznym aspektem wykorzystania tego spoiwa w budownictwie.



Rys. 5.4. Cykl życia wapna w budownictwie [P. Brzyski]

5.2.2. Właściwości wapna

Wapno jest spoiwem o wysokim odczynie pH, wynoszącym około 12, tworzącym wysoce zasadowe (alkaliczne) środowisko. Właściwość ta wykorzystywana jest np. w celu przeciwdziałania rozwojowi pleśni. Jest to właściwość pożądana w przypadku kompozytu wapienno-konopnego, w którym dominującym składnikiem jest materiał organiczny – paździerz konopne. Dokładne otoczenie spoiwem wapiennym paździerzy konopnych zabezpiecza je przed rozwojem korozji biologicznej. Powłoka wapna dodatkowo poprawia ognioodporność kompozytu wapienno-konopnego.

Istotną właściwością wapna, przy zastosowaniu go w kompozycie wapienno-konopnym jest paroprzepuszczalność. Według normy PN-EN ISO 10456, współczynnik oporu dyfuzyjnego tynku wapiennego wynosi 10. Przegroda budowlana wykonana z materiałów zawierających składniki organiczne, powinna być otwarta dyfuzyjnie, a tym samym wolna od kondensacji, która mogłaby doprowadzić do obniżenia trwałości materiału budowlanego, głównie przez możliwość rozwoju pleśni. Kompozyt wapienno-konopny zawierający spoiwo

na bazie wapna hydratyzowanego charakteryzuje się współczynnikiem oporu dyfuzyjnego rzędu 5–6 (R. Walker i in. 2014c).

Właściwości higroskopijne wapna pozwalają na regulację poziomu wilgotności względnej w pomieszczeniu, utrzymując ją na poziomie optymalnym dla człowieka. Spoiwo wapienne charakteryzuje się mniejszą sztywnością w porównaniu z cementowym. Tynki wapienne są bardziej podatne na odkształcenia bez ryzyka pęknięcia, aniżeli tynki cementowe. Spoiwo wapienne, w połączeniu z paździerzami konopnymi po zakończeniu cyklu życia kompozytu wapienno-konopnego, np. po rozbiórce budynku, może być wykorzystane jako nawóz.

5.2.3. Modyfikowanie spoiwa wapiennego

Wapno powietrzne jest materiałem wiążącym o niskich parametrach mechanicznych. Wytrzymałość wapna można zwiększyć stosując m.in. dodatki pucolanowe, hydrauliczne, a także organiczne. Przyspieszą one wiązanie oraz podwyższą wytrzymałość. Pucolana jest materiałem naturalnym lub sztucznym, zawierającym krzemionkę i/lub tlenek glinu w postaci reaktywnej. Samodzielnie nie wykazuje właściwości wiążących, lecz w postaci drobnoziarnistej, amorficznej i w obecności wilgoci reaguje chemicznie z wodorotlenkiem wapnia, tworząc związki mające właściwości wiążące: uwodniony krzemian wapnia lub uwodniony glinokrzemian wapnia (A. Neville 2012). Reakcję pucolanową z udziałem krzemionki opisuje równanie (Jasiczak i in. 2003) (4):



W Politechnice Warszawskiej przeprowadzono badania zapraw wapiennych z dodatkiem modyfikatorów, m.in. pucolanowych (P. Łukowski 2010). Wykorzystano następujące modyfikatory: mączka wapienna, zmielony piasek kwarcowy, metakaolin, popiół lotny, pył krzemionkowy, szkło wodne. Dodatek (w ilości 5% masy spoiwa) metakaolinu, pyłu krzemionkowego oraz szkła wodnego doprowadził do dwukrotnego wzrostu wytrzymałości zaprawy (po 5 dniach dojrzewania), natomiast dodatek w ilości 20%, spowodował trzykrotny wzrost wytrzymałości w przypadku szkła wodnego oraz niemal czterokrotny, w przypadku pyłu krzemionkowego.

Badania nad modyfikacją zapraw wapiennych prowadził również Przemysław Brzyski (P. Brzyski 2017). Jako modyfikatory zastosował pucolany: metakaolin oraz mikrokrzemionka. Dodatkowo, porównawczo zbadał wpływ dodatku cementu CEM I 32,5 R na właściwości zaprawy wapiennej. Wpływ pucolan na wytrzymałość zaprawy wapiennej był większy niż modyfikacja spoiwem cementowym. Dodatek 20% metakaolinu i mikrokrzemionki spowodował 10-krotny wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy wapiennej (po 28 dniach dojrzewania), natomiast 30% dodatek metakaolinu 15-krotny wzrost wytrzymałości. Najskuteczniejszy w przypadku ściskania okazał się 30% dodatek

mikrokrzemionki – efektem był 20-krotny wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy wapiennej. W przypadku testu zginania niemal dwukrotnie bardziej skutecznym był dodatek metakaolinu niż pyłu krzemionkowego.

Materiałami hydraulicznymi stosowanymi w modyfikacji spoiwa wapiennego są cement portlandzki, wapno hydrauliczne lub cement romański. Cement portlandzki dodawany jest do spoiwa wapiennego w kompozycie wapienno-konopnym w niewielkich ilościach, w celu przyspieszenia wiązania, aby rozformowana ściana była zdolna do przeniesienia swojego ciężaru własnego. Wapno hydrauliczne stosowane jest w kompozycie jako samodzielne spoiwo lub częściowo wymieszane z wapnem hydratyzowanym, np. w ilości wagowej 15% (K. Ip i in. 2012), a także jako dodatek w różnych ilościach (P.B. de Bruijn i in. 2009). Cement romański, otrzymywany ze skał marglistych charakteryzujących się doskonałym geochemicznym wymieszaniami tlenków, pod wpływem ściśle określonego czasu oraz temperatury wypału (H. Szelaż i in. 2009), stosowany jest jako samodzielne spoiwo w kompozycie wapienno-konopnym (www.vicat.com).

W zachodniej Europie produkowane są gotowe spoiwa, które przeznaczone są do stosowania wraz z paździerzami konopnymi. Najpopularniejsze wyroby budowlane na rynku zachodnim dedykowane do zastosowania z tym materiałem to: wytwarzany w Wielkiej Brytanii Tradical PF 70, wykorzystany np. w badaniach (M. Rahim i in. 2015), Tradical HB, wykorzystany m.in. w pracach badawczych (A. Shea i in. 2012) oraz francuski Batichanvre (www.c-e-s-a.fr). Spoiwa te, oprócz wapna zawierają m.in. składniki hydrauliczne oraz dodatki pucolanowe, których proporcje stanowią tajemnicę handlową. Mieszanki te nie są w Polsce ogólnodostępne. Zasadne jest zatem opracowanie własnych mieszanek z lokalnych materiałów, zgodnie z ideą zrównoważonego budownictwa.

5.3. Paździerz konopne jako wypełniacz w kompozycie wapienno-konopnym

5.3.1. Budowa konopi włóknistych

Zgodnie z obowiązującą Ustawą o Przeciwdziałaniu Narkomani, która weszła w życie w 2005 roku (ze zmianą w 2022 roku), konopie włókniste to rośliny z gatunku konopie siewne (*Cannabis sativa L.*), zawierające mniej niż 0,3% THC (tetrahydrocannabinol) w kwiatowych lub owocujących wierzchołkach roślin, z których nie usunięto żywicy, w przeliczeniu na suchą masę. W myśl Ustawy uprawa konopi zawierających powyżej > 0,3% THC jest zabroniona.

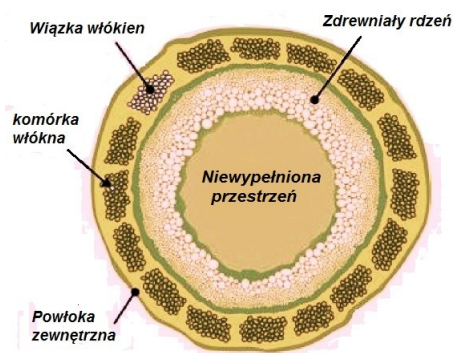
Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu wyhodował odmianę konopi włóknistych o nazwie „Białobrzeskie”, przystosowaną do polskich warunków glebowo-klimatycznych. Jest to odmiana wysoka, o znacznym przyroście włókna i jest obecnie najbardziej popularna wśród polskich upraw. W 1967 roku konopie odmiany „Białobrzeskie” zostały wpisane na listę Krajowego Rejestru Odmian w Polsce (www.cobor.pl).

Konopie włókniste charakteryzują się szybkim przyrostem. Ich wysokość może sięgać do 4 metrów w ciągu czteromiesięcznego okresu uprawy, przy małym zapotrzebowaniu na nawozy oraz nawadnianie. Uprawy nie wymagają stosowania herbicydów z uwagi na szybki przyrost i gęsty wysiew (ograniczony dostęp słońca dla rozrostu chwastów), są odporne na choroby i insekty.

Na rysunku 5.5 i 5.6 przedstawiono konopie włókniste z upraw w województwie podlaskim oraz przekrój przez łodygę.



Rys. 5.5. Konopie włókniste odmiany Białobrzeskie – sierpień 2016 [P. Brzyski]



Rys. 5.6. Przekrój poprzeczny przez łodygę konopi włóknistych [P. Brzyski]

Łodyga konopi składa się z drewnianego rdzenia oraz z włókna ułożonego wzdłużnie. Po skoszeniu rośliny, słoma poddawana jest procesowi roszenia. Procesy te zachodzą na skutek działalności mikroorganizmów oraz odpowiednich warunków pogodowych. W przypadku roszenia na polu, współdziałanie bakterii, słońca, powietrza i rosy powoduje procesy fermentacyjne, rozkładając w ten sposób kleje roślinne (głównie pektyny) otaczające wiązki włókien, umożliwiając oddzielenie włókien od zdewniałego rdzenia łodygi. Włókna poddane roszeniu w rosie charakteryzują się ciemniejszym kolorem z uwagi na rozpoczęte procesy biologiczne. Inny sposób roszenia polega na zanurzeniu wiązek słomy w wodzie. Woda w tym przypadku dociera do wnętrza łodygi, powodując pęcznienie komórek i pęknięcie zewnętrznych warstw łodygi. Przez powstające spękania przedostaje się wilgoć oraz bakterie, które powodują rozkład pektyn (C. Ingrassia i in. 2015; P. Tahir i in. 2011).

Po zebraniu wyroszonej oraz wysuszonej słomy poddaje się ją międleniu, czyli łamaniu łodygi na krótkie kawałki (paździerz) oraz dekortacji, czyli oddzieleniu włókien od paździerzy wykorzystując przystosowane do tego zmechanizowane linie produkcyjne.

Produktem przerobu słomy konopnej są włókna (Rys. 5.7) oraz paździerz (Rys. 5.8). W wyniku dekortacji słomy konopnej uzyskać można przeciętnie

ok. 20–40% włókna (B.A. Thomsen i in. 2005), z czego ok. 20% stanowią włókna odpowiednie dla przemysłu tkaninowego (długie włókna), natomiast ok. 8–10% stanowią włókna odpowiednie do zastosowania w przemyśle papierniczym (krótkie włókna).



Rys.5.7. Surowe włókna konopne
[P. Brzyski]



Rys. 5.8. Paździerz konopne do zastosowania
w budownictwie [P. Brzyski]

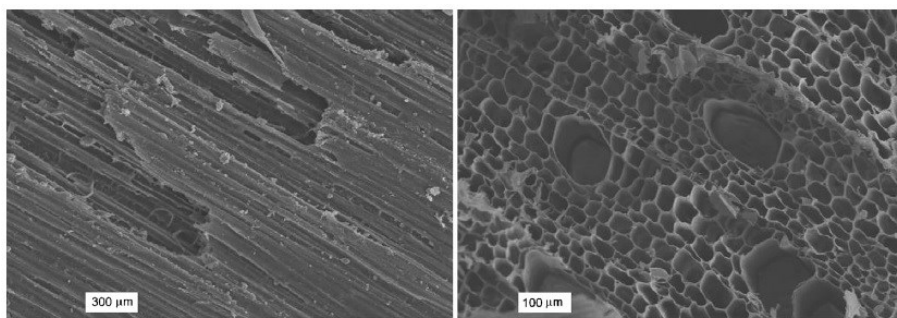
Włókna konopne należą do grupy włókien łykowych. Głównym ich składnikiem jest celuloza (57–77%), a pozostałe składniki to związki chemiczne, takie jak hemiceluloza (9–15%), lignina (5–9%) oraz pektyny, tłuszcze i woski (E. Gümüşkaya i in. 2007; M. Zimmiewska i in. 2012). Włókna występują w postaci włókien pierwotnych (elementarnych, o długości od 20 do 50 mm) oraz wtórnych (o długości około 2 mm). Grupa tysięcy włókien elementarnych połączonych ze sobą środkowymi płytami, które składają się głównie z pektyny, hemicelulozy i ligniny (E. Bogacz i in. 2012) tworzy tzw. włókna techniczne. Grubość włókien jest regularna, w zakresie 40–90 μm . Pojedyncze włókna są usytuowane równolegle względem siebie.

Włókna konopi przemysłowych stosowane są do produkcji wełny konopnej, jako alternatywy wobec wełny mineralnej. Włókna w tym przypadku spajane są krochmalem ryżowym lub mączką kukurydzianą oraz wzbogacone są o sodę, jako środek zwiększający odporność ogniową. Współczynnik przewodności cieplnej izolacji wynosi zwykle około 0,04 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (www.thermo-natur.de). Dodatkowo, z uwagi na wysoką zawartość celulozy, materiał posiada zdolności regulowania poziomu wilgotności w pomieszczeniach. Badane były także właściwości surowych włókien konopnych jako materiału izolacyjnego w postaci luźnej (P. Kosiński i in. 2017). Według wyników badań, przewodnictwo cieplne włókien konopnych przy zagęszczeniu 85 kg/m^3 wyniosło 0,04 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Prowadzone były również badania nad wykorzystaniem włókien do produkcji lekkich kompozytów pełniących funkcje izolacyjne w ścianach (A. Motori i in. 2012).

Kolejnym produktem procesu dekortykacji są paździerze konopne, stanowiące około 70% objętości łądzy konopnej. Zastosowaniem paździerzy konopnych jest

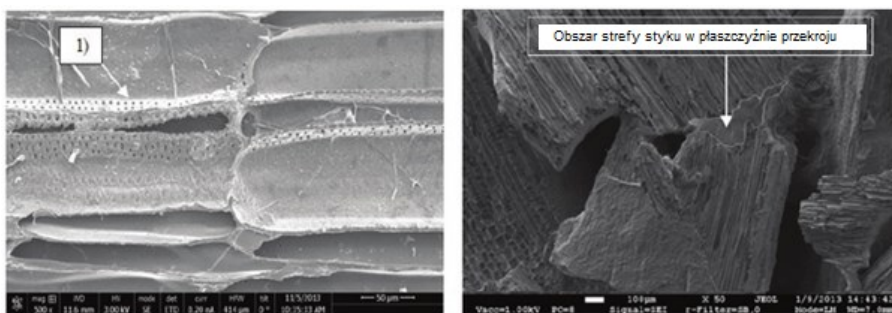
wykorzystanie w budownictwie do produkcji materiałów budowlanych takich jak kompozyt wapienno-konopny.

Paździerz konopny jest materiałem o porowatości całkowitej wynoszącej, wg (G. Balčiūnas i in. 2013) 57%. Charakteryzują się niskim współczynnikiem przewodności cieplnej, rzędu 0,053–0,062 W/(m·K) (G. Balčiūnas i in. 2016). Struktura paździerzy konopnych składa się z sieci zamkniętych porów o średnicy od 5 μm do 50 μm (F. Collet i in. 2013). Budowa ta decyduje o ich przydatności w wykorzystaniu jako izolacja termiczna. Na rysunku 5.9 przedstawiono obraz SEM przekroju wzdłużnego i poprzecznego paździerzy konopnych.



Rys. 5.9. Obraz SEM struktury paździerzy konopnych – wzdłuż (po lewej) oraz w poprzek włókien (po prawej) [F. Collet i in. 2013]

Ściany porów są również komórkowe. Komórki te charakteryzują się średnicą około 2,5 μm . Małe rozmiary komórek zmniejszają gęstość objętościową paździerzy, ale także obszar styków ze spoiwem.



Rys. 5.10. Mikrostruktura paździerzy konopnych w płaszczyźnie równoległej do kierunku wzrostu roślin: 1) – komórkowa ścianka porów, powiększenie 500 \times (po lewej); Strefa kontaktu paździerzy i spoiwa (powiększenie $\times 50$) [G. Balčiūnas i in. 2016]

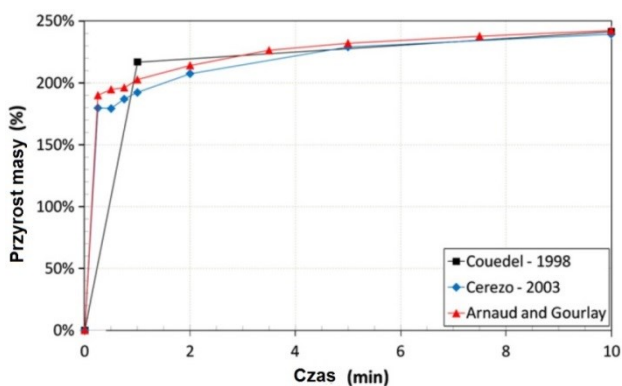
Rysunek 5.10 przedstawia strefę styku pomiędzy paździerzami, a materiałem wiążącym. Strefa ta jest dostatecznie duża – dostrzec można puste przestrzenie, które tworzą się ze względu na nieregularny kształt paździerzy. Szerokość strefy styku w płaszczyźnie przekroju poprzecznego zmienia się od 15 μm do 120 μm .

Głównym tworzywem paździerzy konopnych jest celuloza. Poza tym zawierają inne związki chemiczne takie jak: hemiceluloza, ligniny, pektyny, woski i tłuszcze. Przykładowe składy paździerzy podano w tabeli (Tab. 5.1).

Tabela 5.1. Skład paździerzy konopnych z różnych źródeł literatury

Składniki [%]	G. Balčiūnas i in. (2016)	B.A. Thomsen i in. (2005)	G. Balčiūnas i in. (2013)	I. Schwarzova i in. (2017)
Celuloza	46,9	34–44	36–41	44,5
Lignina	17,4	19–28	19–21	22
Hemiceluloza	24,6	31–37	31–37	32,8
Ekstrakty	1,9	–	–	3,5
Popiół	1,3	1–2	–	2,6
Pektyny	7,9	4	–	–
Tłuszcz i wosk	–	1	–	–

Paździerze w bardzo krótkim czasie są w stanie wchłonąć znaczne ilości wody (2–3-krotnie więcej w odniesieniu do suchej masy). Po 10 min od ich zanurzenia, nasycenie sięga 95% (L. Arnaud i in. 2012). Z tego powodu trudno jest jednoznacznie określić ile wody potrzebne jest, aby właściwie zaszyły procesy wiązania wapna w kompozycie. Paździerze mogą zaabsorbować wodę potrzebną spoiwu do uwodnienia. Zakłóca to proces przygotowania mieszanki i jej układania. Na rysunku 5.11 przedstawiono przykładowe wyniki badań nasiąkliwości paździerzy.



Rys. 5.11. Nasiąkliwość wagowa paździerzy konopnych
[Opr. własne na podst. L. Arnaud i in. 2012]

5.3.2. Wymagania stawiane paździerzom konopnym

W przypadku wykorzystania paździerzy w kompozytach budowlanych ważna jest ich odpowiednia jakość. Mieszanka paździerzy powinna być dokładnie oczyszczona z pyłów. Konopne frakcje pyłaste oraz pył pochodzący z gruntu (Rys. 5.12) powodują wzrost zapotrzebowania na wodę. Zachodzi wtedy ryzyko,

że frakcje pyłaste wchłoną wodę, która potrzebna jest do procesu wiązania spoiwa. W przypadku dużej zawartości pyłu, należy zwiększyć ilość wody w mieszance, co przyczyni się do znacznego wydłużenia czasu wysychania np. ściany wykonanej z kompozytu. Pył pochodzący z gruntu wpłynie niekorzystnie na jakość wiązania spoiwa. Paździerze powinny być oczyszczone również z innych obcych zanieczyszczeń, w postaci np. innych roślin.



Rys. 5.12. Paździerz zanieczyszczony pyłem pochodzącym z rośliny oraz kurzem [P. Brzyski]



Rys. 5.13. Paździerz zanieczyszczony kłębami włókien konopnych [P. Brzyski]

Należy również dążyć do optymalizacji zawartości włókien w mieszance, w stosunku do oczekiwanych właściwości kompozytu. Mała ilość włókien może wpływać korzystnie na charakterystykę kompozytu, działając jako naturalne mikrozbrojenie, natomiast zbyt duża jego ilość może prowadzić do wzrostu zapotrzebowania na wodę, pęcznienia kompozytu oraz wydłużenia czasu wysychania przegród. Najbardziej niepożądane są tworzące się w procesie mechanicznej obróbki łądyg konopi kłęby włókna (Rys. 5.13). Stanowią one zagrożenie z uwagi na brak możliwości zabezpieczenia takich elementów spoiwem wapiennym. Podczas mieszania zostają one powierzchniowo pokryte spoiwem, natomiast do środka przedostaje się woda, która magazynowana przez niezabezpieczone włókna może powodować procesy korozyjne.

Paździerze konopne są narażone na rozwój grzybów pleśniowych przy niewłaściwym przechowywaniu, kiedy wystawione są na oddziaływanie nadmiernej wilgoci oraz nie mają zapewnionej odpowiedniej wentylacji. Paździerze z oznakami rozwoju korozji biologicznej należy odrzucić (Rys. 5.14).



Rys. 5.14. Paździerze zniszczone w wyniku działania korozji biologicznej [P. Brzyski]



Rys. 5.15. Paździerze konopne na placu budowy, zapakowane w workach 25 kg [P. Brzyski]

Paździerze zwykle pakowane są w worki foliowe (ok. 15–25 kg – Rys. 5.15). W warunkach budowy należy chronić je przed dostępem do wody deszczowej, gdyż woda przedostająca się przez ewentualne nieszczelności w workach może stworzyć środowisko korzystne dla rozwoju grzybów pleśniowych.



Rys. 5.16. Paździerze konopne o długościach powyżej 30 mm [P. Brzyski]



Rys. 5.17. Paździerze konopne o długości mniejszej niż 5 mm [P. Brzyski]

Istotna jest frakcja paździerzy, która zależy od możliwości maszyn służących do dekortkacji. Najbardziej pożądane są kawałki o długościach pomiędzy 10 a 25 mm (W. Stanwix i in. 2014), aczkolwiek mniejsze długości też mogą być skuteczne, chociażby wykonując ścianę za pomocą natrysku agregatem. Dłuższe frakcje (Rys. 5.16) nie są odpowiednie ze względu na trudności w mieszaniu oraz układaniu mieszanki. Konieczne jest wtedy mocniejsze i dokładniejsze zagęszczanie mieszanki, by wyeliminować technologiczne pustki wytworzone przez losowo ułożone dłuższe paździerze, ograniczające dostęp mniejszym frakcjom do wypełnienia przestrzeni między nimi. Mocniejsze zagęszczanie doprowadzi do wzrostu ciężaru kompozytu i osłabienia zdolności izolacyjnych.

Zbyt małe frakcje (< 5 mm), z kolei doprowadzą do wzrostu zapotrzebowania na wodę, ale również na spoiwo z uwagi na większą powierzchnię właściwą (Rys. 5.17). Następstwem będzie wzrost gęstości. Paździerze o małych długościach powodują również słabsze przewiązanie kompozytu, większą kruchość. Jednak frakcje takie są odpowiednie do wykonywania tynków na bazie paździerzy konopnych.

Jeśli kompozyt zostanie prawidłowo wykonany, tj. paździerze w czasie mieszania zostaną dokładnie pokryte spoiwem wapiennym, wtedy materiał zostanie należycie zabezpieczony przed oddziaływaniem ognia, szkodników oraz rozwojem korozji biologicznej. Z tego powodu nie jest wymagane wstępne zabezpieczanie paździerzy, np. poprzez impregnację.

Z uwagi na to, iż paździerze są materiałem naturalnym, może charakteryzować je duża niejednorodność (może być również ograniczona do minimum przy precyzyjnej segregacji podczas produkcji).



Rys. 5.18. Uzyskana faktura ściany z kompozytu wapienno-konopnego, świadcząca o niejednorodności paździerzy konopnych [P. Brzyski]

W warunkach budowy, niejednorodność ta powoduje, że stosowanie jednakowych, odmierzonych ilości składników na każdy zarób w mieszalniku, może prowadzić do otrzymania mieszanek o różnych konsystencjach, a także różnego koloru, co zaprezentowano na fotografii (Rys. 5.18). Na ten fakt wpływ ma różna zawartość włókien, zróżnicowanie frakcji paździerzy (co powoduje konieczność regulacji zawartości wody oraz spoiwa w mieszance), a także ich kolor.

5.4. Techniki wznoszenia ścian z kompozytu wapienno-konopnego

5.4.1. Monolityczna ściana

Jednym z rodzajów konstrukcji ściany w technologii *Hempcrete* jest centralne ustawienie słupów w grubości ściany (Rys. 5.19–5.20). Deskowanie tymczasowe (zwykle płyta OSB lub systemowe z tworzywa sztucznego) montowane jest obustronnie, stalowymi łącznikami wkręcanymi w słupy. Aby zachować

jednakową grubość ściany, stosowane są dystanse z rurek plastikowych, które po zdjęciu deskowania są usuwane, a powstałe po nich otwory uzupełniane są mieszanką.



Rys. 5.19. Ściana monolityczna z kompozytu ze szkieletem ustawionym w środku ściany oraz z obustronnym deskowaniem tymczasowym z OSB osadzonych na wkrętach i dystansach [P. Brzyski]



Rys. 5.20. Ściana monolityczna z kompozytu ze szkieletem ustawionym w środku ściany [P. Brzyski]

Materiał jest układany i zagęszczany w warstwach o wysokości około 40–60 cm, następnie po wstępnym związaniu spoiwa deskowanie przesuwane jest w kierunku górnym i układane są kolejne warstwy. Taki sposób wykonywania ściany ma kilka zalet – słup jest zabezpieczony od środowiska zewnętrznego mieszanką wapienno-konopną o odczynie zasadowym, a także obciążenie ze ściany jest rozłożone symetrycznie względem słupa. Zagęszczony, stwardniały kompozyt pełni również funkcję usztywnienia konstrukcji – ogranicza to ilość stosowanych usztywnień poziomych lub ukośnych.

Kolejnym rozwiązaniem jest lokalizacja szkieletu ściennego po wewnętrznej stronie ściany (Rys. 5.21) z możliwością przymocowania do słupów jednostronnego deskowania traconego z materiału o paroprzepuszczalności zbliżonej do tej, którą charakteryzuje się kompozyt wapienno-konopny, aby ściana miała możliwość wysychania.



Rys. 5.21. Ściana z kompozytu wapienno-konopnego z drewnianą konstrukcją umieszczoną po wewnętrznej stronie przegrody [P. Brzyski]



Rys. 5.22. Mechaniczny natrysk mieszanki wapienno-konopnej na mur ceglany [P. Brzyski]

Mogą to być płyty z włókna drzewnego, płyty MgO lub okładzina z desek. W przypadku słupów umieszczonych od wewnątrz przegrody, ciężar kompozytu nie jest rozłożony równomiernie względem słupa. W związku z tym istnieje ryzyko, że kompozyt ulegnie odspojeniu od słupa, z uwagi na odsunięcie na zewnątrz środka ciężkości warstwy kompozytu w odniesieniu do słupa, zwłaszcza przy zastosowaniu ciężkiej warstwy tynku zewnętrznego. W tym celu wskazane jest zastosowanie wzmocnienia w postaci łat przybitych poziomo, prostopadłe do słupów, przez całą długość ściany, w pionowym rozstawie około 60 cm. To rozwiązanie jest odpowiednie w przypadku natryskowej metody aplikacji mieszanki (Rys. 5.22).

W metodzie tej, za pomocą sprężonego powietrza podawane są na sucho paździerz i spoiwo wapienne, a przy wylocie przewodu agregatu, mieszane są z wodą podawaną osobnym przewodem. Aplikując mieszankę pod ciśnieniem na deskowanie ścienne, jest ona ten sposób jednocześnie zagęszczana.

5.4.2. Ściana z prefabrykatów

Praktykowane są również budowy ścian z prefabrykowanych bloczków (Rys. 5.23), pustaków o różnym kształcie, układzie drążeń (Rys. 5.24). Bloczki przeważnie charakteryzują się większą gęstością i sztywnością niż kompozyt w postaci monolitycznej. Wiąże się to z obniżeniem parametrów termoizolacyjnych materiału, ale też ze zwiększeniem pojemności cieplnej. Z tego powodu bloczki wybierane są często jako materiał do wznoszenia ścian wewnętrznych. Bloczki murowane są na zaprawie o podobnych właściwościach, czyli na bazie spoiwa wapiennego i kruszywa ciepłochronnego, np. perlitu lub drobnych frakcji paździerzy konopnych.



Rys. 5.23. Pełny bloczek wapienno-konopny
[P. Brzyski]

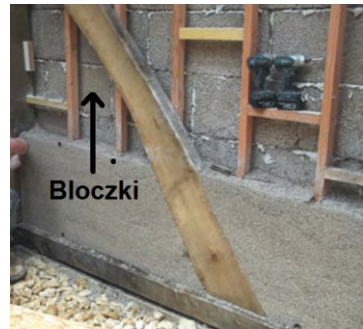


Rys. 5.24. Drażony bloczek wapienno-
-konopny [P. Brzyski]

Za pomocą bloczków możliwe jest również dokonanie termomodernizacji istniejących budynków wykonanych w technologii tradycyjnej (Rys. 5.25). Wznoszenie ścian z bloczków można łączyć również z monolityczną techniką wypełniania ścian (Rys. 5.26).



Rys. 5.25. Ocieplenie istniejących ścian
murowanych w technologii tradycyjnej, bloczkami
z kompozytu wapienno-konopnego
[www.carmeuse.eu]



Rys. 5.26. Ściana z kompozytu
wykonana w dwóch technikach: z jednej
strony murowana bloczkami, z drugiej
strony wypełniana monolitycznie
[Stanwix i in. 2014]

Poza bloczkami, produkowane są także elementy wielkoformatowe – panele ściennie. Panele zawierają drewniany szkielet, który stanowi docelową konstrukcję, a na etapie produkcji panelu służy jako deskowanie (tracone). Panele stanowią segmenty ścian łącznie z pozostawionymi otworami na okna oraz drzwi (Rys. 5.27–5.28). Zaletą takiego rozwiązania jest szybki montaż oraz brak przerw technologicznych.



Rys. 5.27. Segment ścienny z wykonanym otworem drzwiowym
[www.the-self-build-guide.co.uk]



Rys. 5.28. Montaż segmentów ściennych
[www.dunagroheimgroup.nl]

5.5. Techniki wykonywania pozostałych przegród

5.5.1. Dach

Izolacja dachu w postaci kompozytu wapienno-konopnego umieszczana jest pomiędzy krokwiami. Może być układana od góry na tracone deskowanie (np. płyty z włókna drzewnego) podbite od spodu krokwi (Rys. 5.29).



Rys. 5.29. Izolacja dachu w postaci luźnej, lekkiej mieszanki wapienno-konopnej
[P. Brzyski]



Rys. 5.30. Zagęszczona warstwa kompozytu wapienno-konopnego stanowiąca zaślepienie szczelin pomiędzy żdźbłami trzciny
[P. Brzyski]

Ciekawym rozwiązaniem jest zastosowanie traconego deskowania z maty trzcinowej przytwierdzonej do ażurowego deskowania z desek (Rys. 5.30). Rozwiązanie to umożliwia swobodne wysychanie mieszanki wapienno-konopnej również od spodu. Z uwagi na spore szczeliny pomiędzy słómkami trzciny, nie jest możliwe wsypywanie na nią bezpośrednio luźnej, lekkiej mieszanki wapienno-konopnej, gdyż przesypywałyby się przez nie. Z tego powodu matę

pokrywa się cienką warstwą kompozytu o większej gęstości i lepkości, aby zaślepić szczeliny. Na tak przygotowaną warstwę wsypywana jest luźna mieszanka wapienno-konopna.

Możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowej warstwy izolacji z wełny konopnej lub drzewnej. Kompozyt stosowany do izolacji dachu charakteryzuje się niską gęstością (około 150–250 kg/m³) w celu zminimalizowania ciężaru i zwiększenia poziomu izolacyjności cieplnej.

Ilość spoiwa powinna jedynie zapewnić ochronę przed rozwojem korozji biologicznej oraz insektami. Mieszanka układana jest luźno, jednak należy upewnić się, że wszystkie przestrzenie w trudno dostępnych miejscach zostały właściwie wypełnione.

5.5.2. Podłoga na gruncie

Z kompozytu wapienno-konopnego możliwe jest wykonywanie warstw podłogi na gruncie (Rys. 5.31). Mieszanka przeznaczona do tego celu charakteryzuje się większą gęstością niż dla wcześniej omawianych przegród. Pomijając warstwy wykończeniowe, podłoga taka składa się z dwóch zasadniczych warstw – warstwa kompozytu oraz podbudowa. Mieszanka wapienno-konopna nie może być układania bezpośrednio na gruncie, ale powinna być układana na warstwie drenującej o dobrych parametrach termoizolacyjnych, a zarazem nie podciągającej kapilarnie wody z gruntu. Może to być warstwa kruszywa ciepłochronnego, jak np. keramzyt czy perlit ekspandowany. Grubość warstwy kompozytu zwykle nie przekracza 150 mm (ograniczona grubość warstwy z uwagi na zapewnienie wysychania).

Posadzka
Wylewka wapienno-piaskowa 40 mm
Kompozyt wapienno-konopny 100-150 mm
Ciepłochronne kruszywo drenujące np. keramzyt 100-150 mm
Zagęszczony piasek

Rys. 5.31. Przykładowy układ warstw podłogi na gruncie izolowanej monolityczną mieszanką wapienno-konopną [P. Brzyski]



Rys. 5.32. Izolacja mieszanką wapienno-konopną podłogi o konstrukcji legarowej uniesionej ponad gruntem na fundamentach punktowych [P. Brzyski]

Istnieje również możliwość zastosowania izolacji z kompozytu wapienno-konopnego podłogi wykonanej w konstrukcji legarowej opartej na punktowych fundamentach lub na wylewce betonowej (Rys. 5.32). W tym przypadku, podobnie jak w przypadku izolowania dachu, stosuje się mieszankę wapienno-

konopną o małej gęstości (około 150–250 kg/m³). Mieszanka układana jest luźno, jednak powinna być dokładnie rozprowadzona po całej powierzchni podłogi, tworząc jednakową grubość warstwy w każdym miejscu.

5.6. Wybrane właściwości kompozytu wapienno-konopnego

W rozdziale scharakteryzowano materiał pod kątem wybranych właściwości (istotnych z uwagi na specyfikę materiału), które nie zostały przebadane i przeanalizowane w części zawierającej badania własne. Opisane w części badawczej pracy właściwości zostały przeanalizowane i porównane z wynikami badań na podstawie przeglądu literatury.

5.6.1. Odporność na działanie ognia

Badania odporności ogniowej ścian (nośnych i nienośnych) oraz innych elementów konstrukcji budowlanych przeprowadza się w oparciu o normy PN-EN 1363-1; PN-EN 1364-1 oraz PN-EN 1365-1. Wymagania przeciwpożarowe dla ścian opisane są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2002. Są w nim wyszczególnione klasy odporności ogniowej mówiące m.in. o czasie w minutach, w jakim element budynku powinien utrzymać swoje właściwości ogniowe w warunkach pożaru standardowego. Wyroby budowlane i elementy budynków klasyfikuje się na podstawie badań reakcji na ogień w oparciu o normę PN-EN 13501-1. Klasa reakcji na ogień informuje o zachowaniu materiału w trakcie pożaru. Klasy odpowiadają określeniom dotyczącym palności materiałów, wymienionym w Rozporządzeniu, a mianowicie: niepalne, niezapalne, trudno zapalne, łatwo zapalne, niekapiące, samogasnące, intensywnie dymiące.

Materiały budowlane pochodzenia naturalnego, np. oparte na składnikach roślinnych charakteryzują się mniejszą lub zerową zawartością składników toksycznych. Uważa się je za bezpieczniejsze podczas pożaru, z uwagi na to, że wiele zgonów w czasie pożaru nie wynika z temperatury, a z oddziaływania płonących substancji toksycznych i wydzielających się z nich oparów. Celem przeanalizowania toksyczności środowiska pożarowego powstałego w czasie spalania materiału budowlanego należałoby przeprowadzić badanie wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiału opisane w normie PN-88/B-02855 (M. Półka 2010).

Paździerze konopne zawarte w kompozycie konopnym są w całości pokrywane warstwami spoiwa wapiennego, które zabezpiecza je przed zapłonem w temperaturach pożarowych.

Metoda użycia kompozytu wapienno-konopnego wraz z drewnianą ramą zazwyczaj polega na usytuowaniu kompozytu wokół drewnianego szkieletu. Procedura ta daje w dużej mierze taki sam efekt, jak zastosowanie jakiegokolwiek ogniodpornej warstwy – drewno zabezpieczone jest warstwą kompozytu

wapienno-konopnego. W praktyce nie jest konieczne dodatkowe impregnowanie elementów drewnianych otoczonych kompozytem (R. Bevan i in. 2008).

Steve Allin (S. Allin 2012) przytacza przykłady dwóch budynków, których ściany były wykonane z tego materiału i które jako jedyne nie uległy zniszczeniu w trakcie pożaru. W wyniku wstępnego podpalenia modelowego budynku wykonanego z naturalnych materiałów budowlanych najmniej uszkodzonymi elementami były ściany zbudowane z kompozytu wapienno-konopnego pokrytego tynkiem z gliny i słomy.

S. Allin wykonał test reakcji na ogień bloczka z kompozytu wapienno-konopnego przy użyciu palnika gazowego o temperaturze płomienia około 1600 °C. Palnik został usytuowany w odległości 8 cm od powierzchni bloczka. W trakcie trwania testu palnik był cały czas włączony do momentu całkowitego opróżnienia zbiornika z gazem. Czas trwania badania wynosił 7,5 minuty. Po usunięciu spalonego fragmentu materiału stwierdzono, że płomień naruszył tylko powierzchnię kompozytu, a jego wewnętrzna struktura pozostała nienaruszona. Podobne spostrzeżenia wyciągnięto na podstawie własnego testu (Rys. 5.33)



Rys. 5.33. Test reakcji na ogień bloczka z kompozytu wapienno-konopnego [P. Brzyski]

Test ognioodporności wykonano również w Centrum Naukowo-Technicznym w Batiment we Francji (R. Bevan i in. 2008) na ścianie o grubości 250 mm wykonanej z bloczków wapienno-konopnych ułożonych na zaprawie wapiennej. Czas trwania badania wynosił 1 godzinę i 40 minut. W trakcie badania nie odnotowano emisji toksycznych substancji, ani zapłonu struktury. Po upływie tego czasu bloczki konopne nie uległy całkowitemu zniszczeniu, w przeciwieństwie do zaprawy wapiennej.

Patrick Daly (P. Daly i in. 2009) opisuje również przeprowadzone testy ognioodporności. Pierwszy został przeprowadzony przez firmę BRE w 2009 roku na ścianie wykonanej z materiałów Tradical Hemcrete o wymiarach 3 m × 3 m otynkowanych i nieotynkowanych, zgodnie z normą brytyjską BS-EN 1365-1:1999. Ściana wykonana w technologii monolitycznej zawierała szkielet drewniany w postaci ośmiu słupków. Podczas badania ściana została obciążona pionowo siłą osiową 135 kN. Ściana pozostała w stanie

niezniszczonym przez 73 minuty badania. P. Daly przywołuje również deklaracje francuskich producentów spoiwa i paździerzy, którzy określają kompozyt wapienno-konopny jako materiał niepalny lub trudno zapalny.

5.6.2. Właściwości akustyczne

Ze względu na swą gęstość i porowatość kompozyt wapienno-konopny wykazuje szczególnie dobrą absorpcję akustyczną oraz dobre właściwości izolacyjności akustycznej. Philippe Glé (P. Glé i in. 2011) zbadał właściwości akustyczne kompozytu wapienno-konopnego składającego się z różnych rodzajów spoiwa oraz różnych wielkości paździerzy i stwierdził, że absorpcja dźwięku przez materiał jest pośrednia pomiędzy doskonałą absorpcją konopi i odbijaniem spoiwa. Większy wpływ na właściwości akustyczne przegrody ma technika jej wykonania niż właściwości samych składników materiału (L. Arnaud 2013).

Ze względu na porowatość luźnych paździerzy, absorpcja dźwięku jest wysoka w zakresie częstotliwości, porównywalnej jak w przypadku innych niezwiązanych materiałów organicznych (F. Asdrubali i in. 2012). Obserwuje się szczyt w zakresie 400–600 Hz (P. Glé i in. 2011). Zmiana stopnia zagęszczenia paździerzy ma największy wpływ na poziom pochłaniania dźwięku w konkretnym zakresie częstotliwości. Zagęszczanie zmienia rozkład wielkości porów i przesuwają krzywą absorpcji akustycznej (O. Kinnane i in. 2016).

Istotny wpływ na zdolność pochłaniania dźwięku przez kompozyt ma rodzaj spoiwa. Kompozyt ze spoiwem wapienno-pucolanowym wykazuje bardzo dobrą absorpcję dźwięku, w porównaniu do hydraulicznych materiałów wiążących. Spoiwo zawierające mielony żużel wielkopiecowy zdecydowało o niższym współczynniku absorpcji, niż spoiwa zawierające pucolanę w postaci metakaolinitu (O. Kinnane i in. 2016).

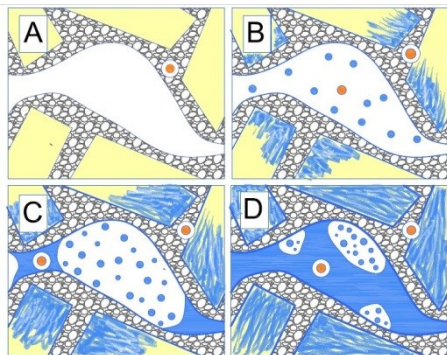
Prowadzone były badania (R. Bevan i in. 2008) izolacyjności akustycznej przegrody z kompozytu wapienno-konopnego w budynku w Anglii (projekt mieszkaniowy Haverhill). Ściana o grubości 300 mm wykonana z mieszanki o gęstości 550 kg/m^3 , zawierała szkielet drewniany w postaci słupków $50 \times 100 \text{ mm}$ w rozstawie 600 mm. Mieszankę stanowiły paździerze konopne, wapno hydrauliczne oraz woda. Ściana z konopi pozwoliła na zredukowanie poziomu dźwięku o 6 dB w porównaniu ze średnią wartością izolacyjności pozostałych ścian w tym projekcie, wykonanych w technologii tradycyjnej.

5.6.3. Właściwości ciepłno-wilgotnościowe kompozytu wapienno-konopnego

Badania laboratoryjne w połączeniu z symulacjami komputerowymi (R. Bevan i in. 2008) wykazały, że kompozyt posiada zdolności do pochłaniania i uwalniania wilgoci w odpowiedzi na zmieniające się warunki zewnętrzne. Dzięki tym zdolnościom materiał reguluje względną wilgotność w pomieszczeniach

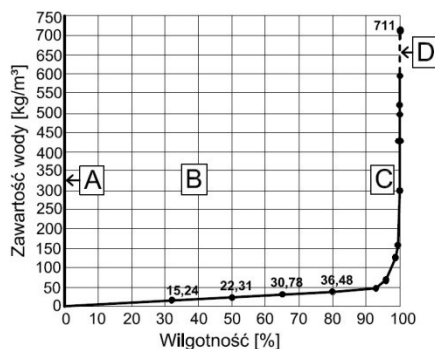
i zmniejsza ryzyko kondensacji pary wodnej, co ma korzystny wpływ na komfort użytkowania.

Zdolność kompozytu wapienno-konopnego do absorbowania wody została przedstawiona na rysunkach (Rys. 5.34–5.35).



Rys. 5.34. Woda w kompozycie: a) brak; b) woda obecna w porach – wilgotność do 90%; c) pory wypełniają się wodą – wilgotność powyżej 90%; d) pory całkowicie nasycone wodą

[Opr. własne na podst. R. Bevan i in. 2008]



Rys. 5.35. Zawartość wody w 1 m³ kompozytu w zależności od jego wilgotności – obszary A, B, C, D odpowiadają schematom z rysunku 5.34

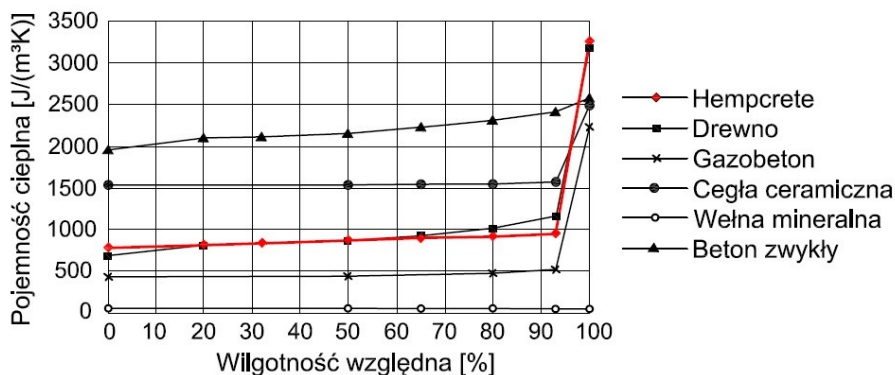
[Opr. własne na podst.: R. Bevan i in. 2008]

Kompozyt charakteryzuje się niskim oporem dyfuzyjnym. Zgodnie z wynikami badań, współczynnik oporu dyfuzyjnego μ dla przykładowych próbek przygotowywanych i zagęszczanych analogicznie do warunków budowy wyniósł 5–5,5 (A. Evrard 2006). Badanie wykazało też zależność oporu dyfuzyjnego od zagęszczenia próbki – bardziej zagęszczone mieszanki charakteryzowały się wyższą wartością współczynnika oporu dyfuzyjnego.

Przewodnictwo cieplne kompozytu wapienno-konopnego zależy od wielu czynników i może być w pewnym stopniu regulowane. Odbывается to poprzez dobór ilości składników mieszanki – gęstsza, zawierająca większą ilość spoiwa, będzie miała większą wartość współczynnika, a także przez stopień jej zagęszczenia – im bardziej ubita, tym mniej w niej pustek powietrznych i tym samym gorsza izolacyjność materiału.

Literatura (R. Walker i in. 2014c; M. Barclay i in. 2014) podaje, że pojemność cieplna przykładowych kompozytów wapienno-konopnych jest znaczna i wynosi około 1300 J/kg·K dla kompozytów o gęstości objętościowej 508–627 kg/m³; wg (C. Maalouf et al. 2014) 1100 J/(kg·K) o gęstości objętościowej 440 kg/m³ oraz wg (A. Tran Le i in. 2010) 1000 J/(kg·K) dla kompozytu o gęstości 413 kg/m³. Właściwość ta w dużej mierze zależy też od zdolności do pochłaniania i oddawania wilgoci. Obu tym cechom towarzyszy umiejętność absorbowania i uwalniania energii związanej ze zmianą stanu skupienia wody (z cieczy do pary i odwrotnie) w obrębie paździerzy. Dzięki czemu, pomimo stosunkowo niskiej

gęstości, materiał charakteryzuje się wysoką pojemnością cieplną. Świadczy to o wyższości kompozytu nad innymi materiałami o tej cesze, gdyż zbyt masywna konstrukcja może akumulować za dużo ciepła lub zbyt wolno się nagrzewać, nie zapewniając tym samym komfortu cieplnego użytkownikom. Ponadto inne tradycyjne materiały ze znaczną pojemnością cieplną nie są w stanie buforować wilgoci. Zwykle nie są też ciepłe w dotyku. Wykres zależności pojemności cieplnej od wilgotności względnej materiałów budowlanych o różnej gęstości został przedstawiony na rysunku 5.36.



Rys. 5.36. Wykres zależności pojemności cieplnej wybranych materiałów budowlanych od ich wilgotności względnej [Opr. własne na podst.: R. Bevan i in. 2008]

Powyższy wykres wskazuje również na podobne właściwości termiczne kompozytu wapienno-konopnego i drewna. Dzięki temu niwelowane są mostki termiczne powstające zwykle przy wypełnieniu drewnianego szkieletu tradycyjnym materiałem termoizolacyjnym, np. wełną mineralną.

Przepisy budowlane i konwencjonalne metody pomiarów właściwości termicznych materiałów nie uwzględniają cech takich jak pojemność cieplna czy zdolność do przechowywania i oddawania wilgoci. Niemniej jednak są to cechy niezwykle istotne ze względu na komfort użytkowania. Czasem nawet niewielkie wahania temperatur mogą być odbierane jako znaczne, a dodatkowo zbyt niska lub wysoka wilgotność w pomieszczeniu może powodować różnice w odczuwaniu właściwej temperatury. Badania przeprowadzone na domach w Haverhill wykazały, że choć ściany zewnętrzne z kompozytu charakteryzowały się wyższym obliczonym współczynnikiem przenikania ciepła, niż te wykonane w technologii tradycyjnej (mur + ocieplenie), to w przypadku domów ze ścianami z kompozytu wapienno-konopnego rachunki za ogrzewanie były niższe, a mimo to lokatorzy odczuwali komfort cieplny (R. Bevan i in. 2008).

6. Wpływ środowiskowy wykorzystania konopi w budownictwie

Prowadzonych było wiele badań nad możliwościami wykorzystania materiałów budowlanych o składnikach pochodzenia roślinnego. Andrew Norton i wsp. (A. Norton i in. 2009) przeprowadzili pełną ocenę cyklu życia (LCA) włókna naturalnego w materiałach izolacyjnych wykonanych z włókna konopnego oraz przetworzonej bawełny, a także ustalili poziom energii wbudowanej w ten materiał oraz potencjał tworzenia efektu cieplarnianego. Sara Gonzalez-Garcia i wsp. (S. González-García i in. 2010) w swoich badaniach porównawczych LCA dowiedli, że materiały do produkcji pulpy w postaci włókien konopi i lnu wykazywały mniejszy wpływ środowiskowy niż inne rozważane materiały pochodzenia roślinnego.

Satish V. Joshi i wsp. (S.V. Joshi i in. 2004) dokonał przeglądu wybranych analiz oceny cyklu życia LCA w celu porównania materiałów kompozytowych z włókien naturalnych, takich jak konopie i trzciny cukrowe, z materiałami wykonanymi z włókna szklanego. W pracy zidentyfikowano najważniejsze czynniki wpływające na środowisko w odniesieniu do kompozytów z włókien naturalnych i wyciągnięto wnioski dotyczące tego, czy konkretne ustalenia tych badań mogą być uogólnione, powtarzalne czy też nie.

Carlo Ingrao i współautorzy (C. Ingrao i in. 2015) dokonali przeglądu badań, których celem były kwestie związane z ochroną środowiska i energią wynikającą z użycia materiałów z konopi przemysłowych do zastosowań budowlanych. W pracy wyszczególniono również parametry standardowe, które należy wziąć pod uwagę przy planowaniu oceny energetycznej i środowiskowej materiałów budowlanych na bazie konopi.

Zużycie nieodnawialnych źródeł energii w procesach wzrostu konopi włóknistych i produkcji surowca (paździerz) oraz gotowego materiału – kompozytu wapienno-konopnego ma znaczący wpływ na oddziaływanie tego wyrobu budowlanego na środowisko. Andrew Cripps (A. Cripps i in. 2004) określił, że w produkcję izolacji termicznej na bazie konopi wbudowane jest około 30 kWh/m³, jednak nie określił zużycia energii w cyklu życia. Hayo Van-der-Werf (H. Van-der-Werf 2004) opublikował dane dotyczące zużycia energii przy produkcji konopi na poziomie 11 400 MJ/ha. Wynik okazał się stosunkowo niski w porównaniu z innymi roślinami uprawnymi, takimi jak pszenica (18 100 MJ/ha) i kukurydza (23 000 MJ/ha).

Ocenę wpływu środowiskowego kompozytu wapienno-konopnego na podstawie analizy ściany wykonanej w tej technologii wykonał Marie-Pierre Boutin i wsp. (M.P. Boutin i in. 2005). Na podstawie wyników badań stwierdzono, że 1 m² ściany z kompozytu o grubości 260 mm wymaga 370–394 MJ do produkcji i zmagazynuje 14–35 kg CO₂ w ciągu 100 lat życia tego materiału.

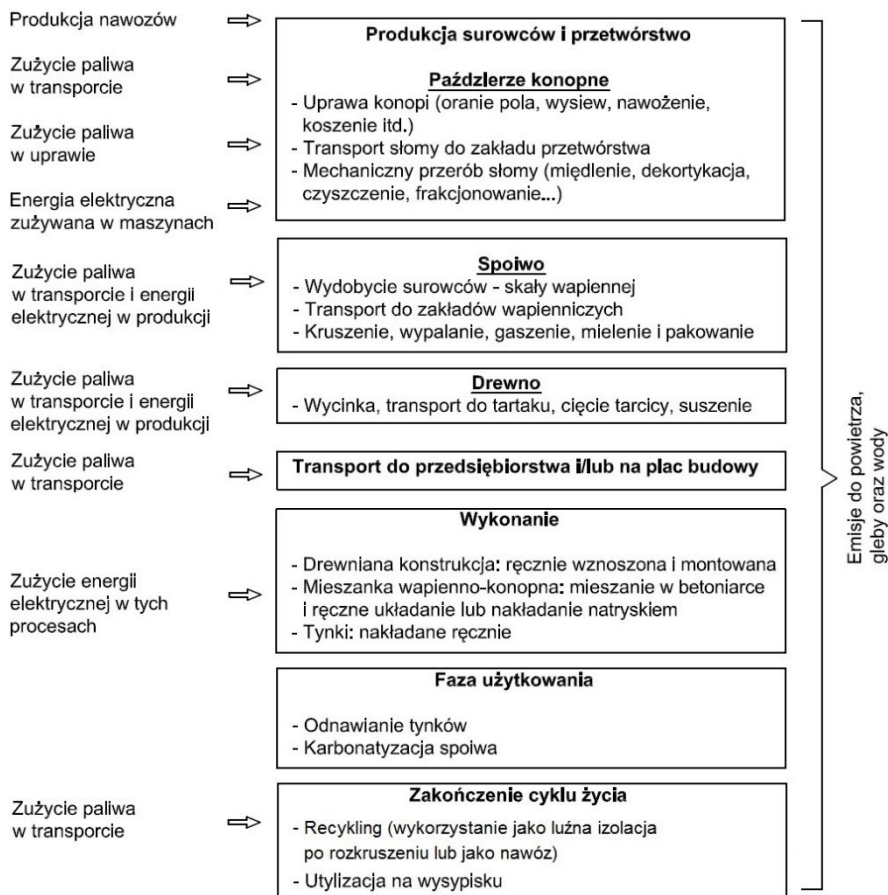
Pozytywny wpływ środowiskowy kompozytu wapienno-konopnego dowiódł również Kenneth Ip (K. Ip i in. 2012) w swoich badaniach, gdzie wykazał, że

materiał ten pozwala na magazynowanie dwutlenku węgla w ilości 82,71 kg CO_{2eq} na 1 m² ściany o grubości 300 mm wykonanej w tej technologii.

Sylvie Pretot (S. Pretot i in. 2014) z kolei badała wpływ grubości ściany z kompozytu wapienno-konopnego oraz warstw wykończeniowych (tynków) na ocenę cyklu życia. Dowiodła, że największy wpływ na środowisko ma faza produkcji, pozyskania materiałów do wykonania mieszanki, w szczególności produkcja wapna. Bilans CO₂ okazał się ujemny dla ściany, tj. absorpcja dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy konopi oraz karbonatyzacji wapna przewyższyła emisję z procesu produkcyjnego wapna. Przy grubościach ścian mniejszych niż 220 mm, eko-bilans jest niekorzystny, tzn. składniki 1 m² ściany zmagazynowały mniej CO₂ niż zostało wyemitowane na ich wytworzenie. Wzrost grubości ściany poprawia wskaźnik zmian klimatu, jednak zwiększa pozostałe badane wpływy środowiskowe. Mając na uwadze jednak zwiększenie oporu cieplnego ściany wraz ze wzrostem grubości, przyczynia się to pozytywnie na globalne zmiany klimatyczne z uwagi na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania w fazie użytkowania budynku. Powłoki tynkarskie mają niewielki wpływ środowiskowy, o ile nie są zbyt grube. Tynk na bazie wapna i konopi wykazał większy wpływ środowiskowy w porównaniu z tynkiem na bazie wapna i piasku z uwagi na większą ilość spoiwa w tym pierwszym.

Cykl życia elementu (w tym przypadku ściany z kompozytu wapienno-konopnego) rozpoczyna się od produkcji surowców, składników materiałów (kompozytu), konstrukcji (drewna) oraz materiałów wykończeniowych (tynków) poprzez fazę użytkowania, eksploatacji aż po czas rozbiórki i utylizacji (lub recykling), czyli zakończenie życia rozpatrywanego elementu. Fazy i czynności składające się na cykl życia ściany z kompozytu wapienno-konopnego przedstawiono na rysunku 6.1. Są one zgodne z modułami wyszczególnionymi w normie PN-EN 15804.

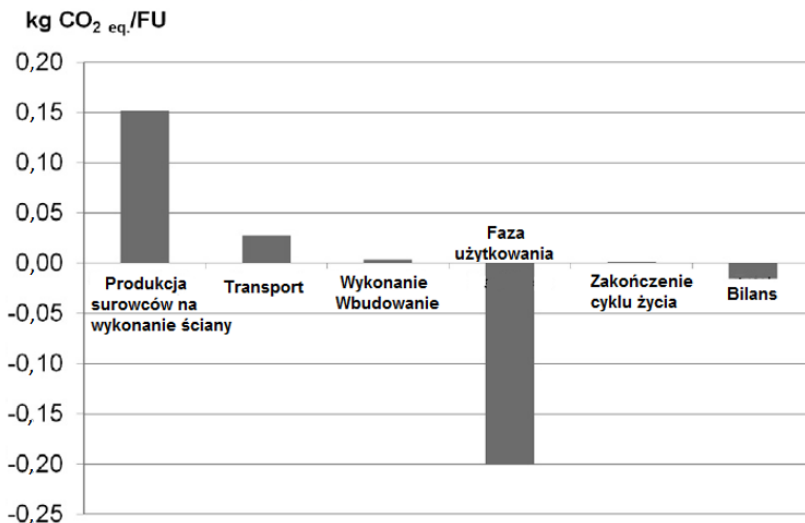
W analizie opisywane są procesy wydobywania składników do produkcji spoiwa, pozyskania słomy konopnej, produkcji wapna i paździerzy, a także ich transport z zakładu produkcyjnego do przedsiębiorstwa lub na plac budowy. Kolejna faza brana pod uwagę w analizie to konkretne sposoby wykonywania konstrukcji, mieszanki wapienno-konopnej oraz jej aplikacji (ręczna lub mechaniczna), a także warstw wykończeniowych – zwykle tynków. W fazie eksploatacji uwzględniana jest również odnowa powłok tynkarskich (np. 2 razy w ciągu 100 letniego okresu obliczeniowego) oraz procesy chemiczne – karbonatyzacja, związana z pochłanianiem dwutlenku węgla. Ostatnią fazą jest rozbiórka, usunięcie, transport i konkretne działanie związane z usuniętym materiałem – może być to składowanie (naturalna biodegradacja), utylizacja czy też recykling (po rozkruszeniu wykorzystanie jako luźna izolacja podłóg lub jako nawóz w rolnictwie).



Rys. 6.1. Cykl życia ściany z kompozytu wapienno-konopnego [Opr. własne na podst.: S. Pretot i in. 2014]

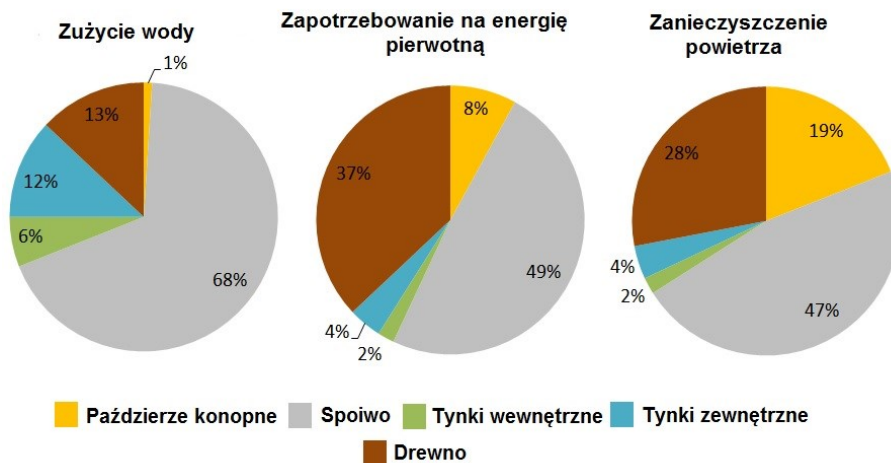
Na rysunku 6.2 przedstawiono dane na temat wpływu środowiskowego poszczególnych faz związanych z cyklem życia przykładowej ściany z kompozytu wapienno-konopnego, analizowanej przez S. Pretot (S. Pretot i in. 2014). Największy wpływ na zmiany klimatyczne ma faza produkcji składników kompozytu, tynków oraz drewna, w szczególności wypalanie wapna. Jednak w fazie użytkowania niekorzystne efekty otrzymane podczas produkcji wapna, są zredukowane m.in. poprzez pochłanianie dwutlenku węgla przez spoiwo oraz tynki wapienne.

Współczynnik zmian klimatycznych



Rys. 6.2. Wpływ faz na zmiany klimatyczne [Opr. własne na podst.: S. Pretot i in. 2014]

Na diagramach (Rys. 6.3) przedstawiono szczegółowy udział poszczególnych materiałów potrzebnych do wykonania ściany z kompozytu wapienno-konopnego w fazie produkcji we wpływie środowiskowym, biorąc pod uwagę zużycie wody, zapotrzebowanie na energię pierwotną oraz zanieczyszczenie powietrza.

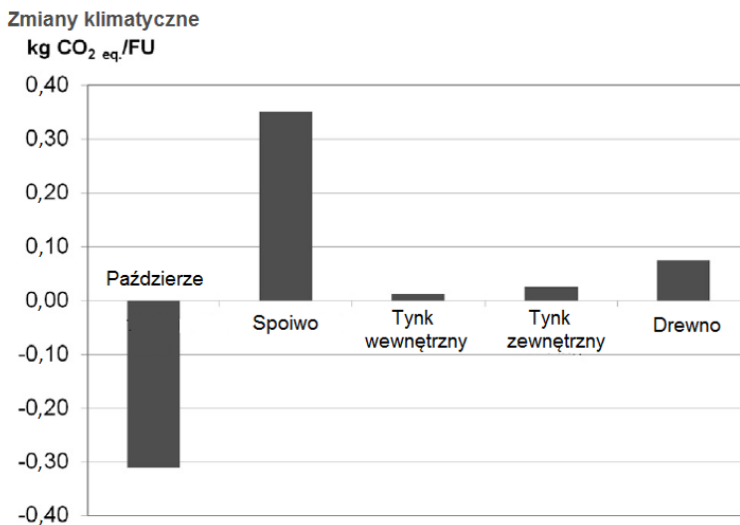


Rys. 6.3. Procentowy udział wpływu środowiskowego poszczególnych materiałów w fazie produkcji [Opr. własne na podst.: S. Pretot i in. 2014]

Dominujący wpływ środowiskowy wykazuje spoivo, którym w przeważającej części jest wapno. Duże zużycie wody wynika z procesu gaszenia wapna

palonego, w celu uzyskania wapna hydratyzowanego. Zanieczyszczenia powietrza są powodowane spalaniem paliwa podczas wypalania wapna, co związane jest z emisją pyłów. Drugim materiałem pod względem całościowej wielkości wpływu jest drewno. Zużycie energii wynika z procesu suszenia drewna, natomiast zanieczyszczenie powietrza powodowane jest spalaniem paliwa w transporcie surowca. Drugim materiałem, w przypadku wielkości zużycia wody są tynki, które z kolei wykazały małe zapotrzebowanie na energię oraz małe zanieczyszczenia powietrza, co jest związane z małą grubością tynków, a tym samym małą ilością wapna. Trzecim materiałem pod względem zapotrzebowania na energię oraz zanieczyszczeń powietrza są paździerze konopne. Te wpływy środowiskowe wynikają ze zużycia paliwa przez maszyny rolnicze oraz na transport materiału do zakładu produkcyjnego. Z kolei zużycie wody do produkcji paździerzy jest nieznaczące.

Na rysunku 6.4 przedstawiono szczegółowo fazę produkcji surowców/składników potrzebnych do wykonania ściany z betonu konopnego, na przykładzie ściany analizowanej przez S. Pretot (S. Pretot i in. 2014). Wpływ fazy produkcji przedstawiany jest jako bilans pomiędzy emisją, a pochłanianiem dwutlenku węgla.



Rys. 6.4. Szczegóły wpływu na zmiany klimatu podczas fazy produkcji elementy składowych ściany [Opr. własne na podst.: S. Pretot i in. 2014]

Paździerze konopne wykazują negatywny bilans, tzn. korzystny. Konopie przemysłowe mogą rosnąć bez rozgałęziania do 2–4 m wysokości, w przeciągu 60–90 dni. Ze względu na bardzo szybki wzrost, biomasa gromadzona przez plony konopi przemysłowych ma znaczący wpływ na pochłanianie CO₂ atmosferycznego. Konopie w trakcie wzrostu pochłaniają znaczne ilości dwutlenku węgla z atmosfery. Aby uzyskać 1 tonę paździerzy konopnych, roślina

w czasie wzrostu potrzebuje zabsorbować około 1800 kg dwutlenku węgla (M. Pervaiz 2003), lub jak podaje inna literatura 1700 kg (S. Amziane i in. 2013). Są to ilości znacznie większe niż te emitowane podczas prac maszyn rolniczych. W przypadku drewna, które wykorzystywane jest jako konstrukcja nośna, literatura podaje, że w przykładowym suchym drewnie iglastym znajduje się 49,4% węgla (Werner i in. 2005). Oznacza to, że uzyskanie 1 kg drewna wymaga pochłonięcia w procesie fotosyntezy rośliny 1,787 kg CO₂. W porównaniu z konopiami jest to jednak wartość losowa, dlatego że uzależniona jest od wieku drzewa, natomiast w przypadku konopi, okres wzrostu jest corocznie porównywalny. W bilansie CO₂ jednak drewno przygotowane do wykonania ściany wykazuje dodatni ślad węglowy, tj. proces wycinania drzew, tarcicy oraz jej suszenie generuje większą ilość dwutlenku węgla niż dana ilość drewna w sobie zmagazynowała w czasie wzrostu. Spoiwo wykazuje najwyższy wskaźnik zmian klimatycznych z uwagi na wysoki poziom zużycia energii w czasie produkcji oraz związanej z tym dużej emisji dwutlenku węgla. Do produkcji 1 tony wapna potrzeba około 1,7 tony węglanu wapnia, a do atmosfery emitowane jest około 0,7 t CO₂ (A. Williams 2009). Z kolei S. Pretot (S. Pretot i in. 2014) podaje, że podczas wypalania 1 kilograma węglanu wapnia, do atmosfery uwalniane jest 594 g CO₂. Podczas życia budynku wapno (wodorotlenek wapnia) podlega reakcji karbonatyzacji – w obecności wilgoci absorbuje dwutlenek węgla z atmosfery, przekształcając się w węglan wapnia. Możliwe jest zabsorbowanie do 90% ilości dwutlenku węgla, który został uwolniony ze skały wapiennej podczas produkcji – wypalania węglanu wapnia (B. Berge 2009), natomiast ilości CO₂ powstałe na skutek spalania paliwa w piecach, działają niekorzystnie na bilans wapna w sposób nieodwracalny.

Rachel Bevan i Tom Woolley (R. Bevan i in. 2008) podali w swojej publikacji uproszczony eko-bilans ściany wykonanej w technologii wapienno-konopnej, który przedstawiono w tabeli 6.1. Bilans został wyliczony na przykładzie receptury o proporcjach wagowych wapna do paździerzy 2:1.

Tabela 6.1. Eko-bilans 1 m³ kompozytu wapienno-konopnego [Opr. własne na podst.: R. Bevan i in. 2008]

Składniki 1m³ ściany z betonu konopnego	Składowe bilansu
110 kg paździerzy konopnych	Absorpcja CO ₂ – 202 kg
220 kg spoiwa wapiennego	Emisja CO ₂ – 94 kg
Bilans	108 kg CO₂/m³

W tabeli 6.2 przedstawiono ślad węglowy ściany z przykładowych materiałów budowlanych, wykonanej w warstwach o podanych grubościach. W tabeli 6.3 z kolei przedstawiono ślad węglowy ściany z kompozytu wapienno-konopnego o grubości 300 mm, otynkowanej obustronnie tynkiem wapiennym o grubości 20 mm, charakteryzującej się podobnym poziomem izolacyjności termicznej w porównaniu z podaną ścianą tradycyjną.

Tabela 6.2. Zestawienie przybliżonej emisji CO₂ przy produkcji materiałów wbudowanych w przykładową ścianę [Opr. własne na podst.: R. Bevan i in. 2008]

Material	Grubość warstwy [mm]	Emisja CO ₂ [kg/m ²]
Cegła elewacyjna	100	29
Błoczek gazobetonowy	140	50
Wetna mineralna	100	7
Tynk	20	2
Zaprawa cementowa		9
Ogólnie		Okolo 100 kg/m ²

Tabela 6.3. Zestawienie przybliżonej emisji CO₂ przy produkcji kompozytu wapienno-konopnego wbudowanego w ścianę [Opr. własne na podst.: R. Bevan i in. 2008]

Material	Grubość warstwy [mm]	Emisja CO ₂ [kg/m ²]
Kompozyt wapienno-konopny	300	-33
Tynk wapienny	40	2
Ogólnie		Okolo -33 kg/m ²

Ściana wykonana w tradycyjnej technologii wykazuje dodatni ślad węglowy w ilości około 100 kg/m² ściany. Ściana z kompozytu wapienno-konopnego z kolei charakteryzuje się ujemnym śladem węglowym, tj. produkcja materiału oraz jego wbudowanie powoduje emisję mniejszej ilości dwutlenku węgla niż materiał jest w stanie zmagazynować poprzez pochłanianie CO₂ z atmosfery w czasie wzrostu konopi oraz karbonatyzacji spoiwa wapiennego w kompozycie oraz tynkach. Bilans może być korzystniejszy w przypadku zastosowania po wewnętrznej stronie ściany tynku glinianego, gdyż glina w przeciwieństwie do wapna nie wymaga obróbki termicznej (wypalania).

Technologia budownictwa z wykorzystaniem konopi ma w Polsce szansę rozwoju, dlatego że wzrasta świadomość potrzeby zdrowego zamieszkania, stawiając ten aspekt jako priorytetowy względem kosztów inwestycji. Istnieją jednak pewne ryzyka, które mogą zahamować wzrastające zainteresowanie społeczeństwa tą technologią. Budownictwo naturalne często jest postrzegane jako proste, a większość prac jest możliwych do samodzielnego wykonania. Trzeba jednak podkreślić, że materiały naturalne zwykle są bardziej podatne na negatywne skutki błędów wykonawczych, są wrażliwe na warunki atmosferyczne, na podwyższoną zawartość wilgoci. Należy mieć to na uwadze, pomimo tego że kompozyt wapienno-konopny wyróżnia się na tle innych materiałów naturalnych wysoką odpornością na korozję biologiczną z uwagi na alkaliczny odczyn wytworzony przez obecność wapna jako spoiwa. Wymagana jest ostrożność w postępowaniu z takimi materiałami na każdym etapie budowy, a w przypadku mieszanki wapienno-konopnej należy kontrolować jakość wykonanej mieszanki, jej konsystencję, gdyż niewłaściwie przygotowana może skutkować pękaniem ścian, rozsypaniem się materiału ściennego, a także rozwojem korozji biologicznej. Dlatego też ważne jest prowadzenie badań nad

kompozytem, ustalenie właściwych receptur oraz zasad przygotowywania mieszanki, zwracając uwagę na charakterystykę każdego składnika.

Kolejnym ryzykiem dla rozwoju popularności technologii jest rezygnacja z jej wyboru za sprawą kosztów. Budownictwo naturalne często postrzegane jest jako tanie, dlatego inwestorzy kierując się tą opinią rozważają takie technologie. Jest to mylące przekonanie, dlatego że niezwykle ważna jest tutaj jakość wykonania, trwałość, zastosowanie wysokiej jakości materiałów (np. wyselekcjonowanych paździerzy jakości budowlanej), aby budynek charakteryzował się trwałością przez lata. Dodatkowo, w budownictwie naturalnym często wybierane są inne elementy składowe budynku również wykazujące aspekty ekologiczne np. drewniana stolarka, pokrycie dachowe, posadzki, a także wykończenia w postaci tynków i farb naturalnych (glinianych i wapiennych). Ściana wykonana z wykorzystaniem konopi, w technologii ręcznego ubijania mieszanki w deskowaniu, zwykle jest droższa w porównaniu do technologii tradycyjnych (mur + ocieplenie) o podobnych wartościach współczynnika U . Oszczędność w budowie może przynieść praca własna, jednak należy mieć świadomość problemów, które omówiono w poprzednich akapitach.

Według Ogólnopolskiego Stowarzyszenia Budownictwa Naturalnego rośnie zainteresowanie budownictwem z wykorzystaniem konopi wśród polskiego społeczeństwa. Jak już opisano to w poprzednich rozdziałach pracy, kompozyt charakteryzuje się dobrymi parametrami termoizolacyjnymi, wysoką pojemnością cieplną, zdolnością do regulacji poziomu wilgotności w pomieszczeniu, korzystnym pH utrudniającym rozwój pleśni, będących źródłem toksyn. Przytoczone wcześniej analizy oceny cyklu życia kompozytu wapienno-konopnego świadczą o tym, że materiał ten nie wykazuje negatywnego wpływu środowiskowego.

Minusem dla budownictwa naturalnego w Polsce jest krótki sezon budowlany. Prace związane z układaniem mieszanki wapienno-konopnej powinny zakończyć się przed jesienią, podczas której to wzrasta ryzyko długotrwałych opadów atmosferycznych oraz niskich temperatur utrudniających wyschnięcie materiału. Z warunkami atmosferycznymi związane są pewne rygory architektoniczne. Pomimo swobody kształtowania przegród, wysoce wskazane jest projektowanie dość wysuniętych okapów oraz wodoodpornych cokołów. Ograniczeniem w rozwoju tego budownictwa w Polsce jest mała liczba producentów wysokiej jakości paździerzy konopnych. Główną przyczyną są niewielkie powierzchnie upraw konopi włóknistych. Sytuacja ta jednak z roku na rok ulega zmianie, coraz więcej rolników decyduje się na uprawę tej rośliny. Drugą przyczyną jest mała w skali kraju ilość odpowiedniego sprzętu do dekontaminacji, który umożliwiłby przetworzenie znacznych ilości słomy konopnej od rolników, którzy z kolei uprawiają konopie na cele nasiennictwa lub dla przemysłu spożywczego, a słomę traktują jako odpad.

7. Materiały wykorzystane w badaniach

7.1. Wypełniacze

Paździerz konopne

Do przygotowania kompozytów wykorzystano paździerz konopne z łodyg konopi przemysłowych odmiany Białobrzeskie. Jest to polska odmiana wyhodowana przez Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu i wprowadzona do Krajowego Rejestru Odmian w Polsce w 1967 roku. Odmiana ta została przystosowana do polskich warunków klimatycznych i glebowych. Są to rośliny typowo włókniste, osiągające wysokość do 4 m w przeciągu około czteromiesięcznego okresu wzrostu.

W badaniach wykorzystano paździerz pochodzące z dwóch różnych źródeł. Producentem pierwszego rodzaju paździerzy jest Zakład Doświadczalny Lenkon w Stęszewie, będący jednostką Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu. Na paździerzach pochodzących z w/w Instytutu przeprowadzono większą część badań. W pracy oznaczono je jako *K1* (Rys. 7.1). Instytut jest uprawnionym odbiorcą plonów z upraw konopi z całej Polski, dlatego też dokładny region upraw konopi, z których wyprodukowano paździerz *K1* nie jest znany. W zaawansowanym etapie prac badawczych, na polskim rynku pojawił się kolejny producent paździerzy konopnych – Podlaskie Konopie. W wybranych badaniach wykorzystano paździerz konopne tego producenta. W pracy oznaczono je jako *K2* (Rys. 7.2).

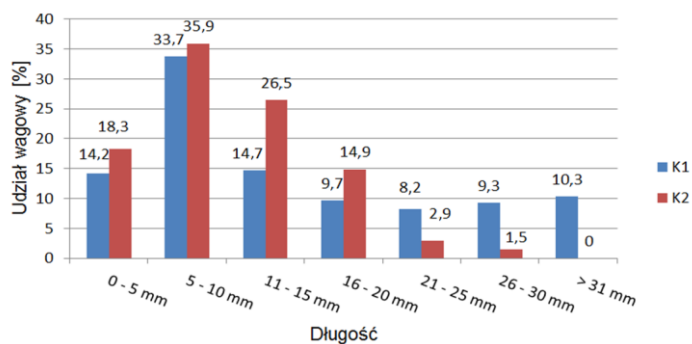


Rys. 7.1. Paździerz konopny *K1* odmiany Białobrzeskie wykorzystane w badaniach (producent IWNIRZ) [P. Brzyski]



Rys. 7.2. Paździerz konopny *K2* odmiany Białobrzeskie wykorzystane w badaniach (producent Podlaskie Konopie) [P. Brzyski]

Na wykresie (Rys. 7.3) przedstawiono udział procentowy poszczególnych długości paździerzy konopnych wykorzystanych w badaniach.



Rys.7.3. Udział procentowy poszczególnych długości paździerzy konopnych K1 oraz K2 w masie pobranej próbki

Paździerze K1 i K2 pochodzą z dwóch różnych źródeł, gdzie stosowane są inne linie technologiczne do przetwórstwa słomy konopnej, stąd różnice w długościach. W przypadku K1 jest to linia przemysłowa wysokowydajna, jednak przystosowana do pozyskania włókna, a paździerze są traktowane jako odpad. Paździerze K2 pozyskane zostały za pomocą małej linii, lecz przystosowanej do produkcji paździerzy konopnych wysokiej jakości, do celów budownictwa. Paździerze K1 zawierają większy udział frakcji o długości powyżej 20 mm, natomiast paździerze K2 cechuje większa zawartość frakcji o długości od 0 do 20 mm. Posługując się miarą drobności, jaka jest wykorzystywana w przypadku kruszyw do betonu, a mianowicie modulem drobności, miałkości (*ang. fineness modulus*), paździerze K1 wykazują wartość modułu równą 3,33, natomiast paździerze K2, równą 2,53.

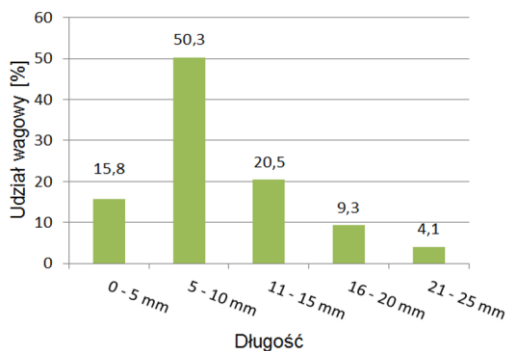
W literaturze opisane są badania, w których wykorzystywano paździerze o różnych frakcjach, np. Giedrius Balčiūnas (G. Balčiūnas i in. 2016) zastosował paździerze o długościach 0–20 mm oraz 12 % udział długości > 20 mm względem masy. Największy udział stanowiły paździerze o długościach 5–10 mm, podobnie jak w badaniach własnych. Zróżnicowane frakcje paździerzy zostały wykorzystane również w innych badaniach (A. Stikute i in. 2011). W raporcie badań opisano trzy wymiary paździerzy: długość 14,8–25,1 mm, grubość 1,8–3,1 mm i szerokość 2,8–5,4 mm.

Paździerze lniane

Jako częściowy zamiennik paździerzy konopnych w jednej z serii badań (*Seria 3*) zastosowano paździerze lniane pochodzące z polskich upraw lnu włóknistego odmiany Modran (Rys. 7.4). Producentem paździerzy jest Zakład Doświadczalny Lenkon w Stęszewie. Region upraw lnu, z którego pozyskano paździerze nie jest znany.



Rys.7.4. Paździerz lniane wykorzystane w badaniach [P. Brzyski]



Rys. 7.5. Udział procentowy poszczególnych długości paździerzy lnianych w masie pobranej próbki

Na wykresie (Rys. 7.5) przedstawiono udział procentowy poszczególnych długości paździerzy lnianych wykorzystanych w badaniach. Długości paździerzy lnianych są bardziej jednorodne niż paździerz konopnych. Przeważają długości w zakresie 5–10 mm, a obliczony moduł drobności wynosi 2,36, zatem cechuje je większe rozdrobnienie niż w przypadku wykorzystanych paździerzy konopnych. Zgodnie z literaturą (Stevulova i in. 2012), dobierając odpowiednie frakcje paździerzy możliwe jest modyfikowanie właściwości kompozytu wapienno-konopnego, np. jego wytrzymałości i przewodności cieplnej.

Paździerz lniane były wykorzystywane jako jedyny wypełniacz w kompozycie m.in. w badaniach (M. Rahim i in. 2015) lub jako częściowy wypełniacz (D. Barnat-Hunek i in. 2017). W innych badaniach (S. Fic i in. 2013, S. Fic i in. 2015a; S. Fic i in. 2015b; P. Brzyski i in. 2017b) stosowano z kolei pociętą słomę lnianą w postaci paździerzy (długość 25 mm) oraz włókien (długość 10; 15; 20 mm), jako wypełniacz w kompozycie na bazie wapna.

Perlit ekspandowany

Jako kolejny częściowy zamiennik paździerzy konopnych w jednej z przebadanych *Serii* receptur wykorzystano perlit ekspandowany EP-180 o frakcji 0–4 mm, firmy Perlit Polska. Jest to naturalny materiał stosowany do izolacji akustycznej i termicznej budynków. Jest wytwarzany w procesie prażenia skały krzemowej w temperaturze 900–1300 °C. Perlit ma strukturę ziarnistą o nieregularnych kształtach, posiadających dużą ilość mikro kanalików. Ważnymi cechami tej substancji jest niska masa własna, odporność biologiczna, wysoka izolacyjność. Jest to materiał obojętny chemicznie, odporny na wilgoć, o dużej odporności ogniowej. Właściwości deklarowane przez producenta przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Parametry techniczne perlitu ekspandowanego EP-180 [www.perlitpolska.pl]

Parametr	Wynik
Ciężar nasypowy (maks.)	95 ± 10 kg/m ³
	< 0,5
	0–15%
Ziarnistość [mm]	0,5–1,0
	1,0–2,0
	40–60%
	2,0–4,0
	0–15%
Wilgotność (maks.)	2%
Współczynnik przewodności cieplnej λ	0,049 W/(m·K)

Zastosowanie perlitu ekspandowanego jako częściowego zamiennika paździerzy konopnych miało na celu wypełnienie porów pomiędzy paździerzami konopnymi oraz zbadanie wpływu tego zabiegu na właściwości mechaniczne i fizyczne kompozytu.

Kruszywo perlitowe wykorzystywane jest w połączeniu ze spoiwem cementowym (Ł. Kotwica i in. 2017) jako kruszywo ciepłochronne w zaprawach, tynkach oraz w betonach lekkich – perlitobetonie (O. Sengul i in. 2011). Prowadzone były również badania nad wykorzystaniem perlitu w roli częściowego zamiennika paździerzy lnianych w lekkich kompozytach wapienno-lnianych do zastosowania jako materiał ścienny (S. Fic i in. 2013; S. Fic i in. 2015a). Badano również wpływ dodatku perlitu ekspandowanego na właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego (A. Różycka i in. 2012).

7.2. Spoiwo

Jak opisano w części studialnej, w zachodniej Europie istnieją gotowe mieszanki spoiw przeznaczonych do zastosowania wraz z paździerzami konopnymi. Dokładny skład tych spoiw stanowi tajemnicę handlową, jednak podawane są (Tradical, Batichanvre) ogólne składniki wykorzystane w tych spoiwach. Zwykle jest to tzw. sztuczne wapno hydrauliczne (*ang. FLA – formulated lime artificial*) powstałe poprzez zmieszanie gotowych, zmielonych materiałów takich jak: wapno hydratyzowane, stanowiące zwykle bazę, największy udział; cement portlandzki oraz pucolana. Zakup tej gotowej mieszanki spoiw jest w Polsce utrudniony, a jej cena działa hamująco na rozwój technologii w kraju. Istotne jest opracowanie własnych mieszanek spoiw, których materiały składowe można pozyskać lokalnie, a przygotowanie takiego spoiwa mogłoby odbywać się bezpośrednio na placu budowy, bez konieczności zakupu gotowego produktu w postaci sztucznego wapna hydraulicznego. Działanie to byłoby zgodne ze zrównoważonym rozwojem, gdyż jednym z filarów tej idei jest również filar ekonomiczny. Budownictwo zrównoważone powinno być łatwo dostępne również pod względem ekonomicznym.

Dlatego też, wzorując się na literaturze, na katalogach produktów zachodnich producentów opracowano w pracy kilka spoiw, których składniki są powszechnie znane i lokalnie dostępne w Polsce.

Spoivo powietrzne, jakim jest wapno hydratyzowane wiąże i twardnieje w środowisku wilgotnym pod wpływem dwutlenku węgla z atmosfery. Do mieszanki wapienno-konopnej wprowadzona zostaje duża ilość wody zarobowej, która utrudnia i znacznie opóźnia proces wiązania i twardnienia wapna. Przy budowie ścian z kompozytu istotne jest wczesne wiązanie hydrauliczne, które umożliwi szybki demontaż deskowania, tak aby ściana utrzymywała swój ciężar własny. Dlatego też samo wapno hydratyzowane jest niewystarczającym spoiwem w technologii wznoszenia ścian z kompozytu wapienno-konopnego i w praktyce stosowane jest naturalne wapno hydrauliczne lub sztuczne mieszanki spoiw (sztuczne wapno hydrauliczne).

Prowadzono badania własne nad modyfikacją spoiwa wapiennego (na przykładzie zaprawy wapiennej) pucolanami takimi jak: mikrokrzemionka, metakaolinit, zeolit naturalny oraz krzemionkowy popiół lotny. Dodawano wymienione pucolany w różnych ilościach, jako wagowe zamienniki wapna hydratyzowanego w ilości 10; 20; 30%. Sprawdzono również mieszanki spoiw zawierające 15% każdej z pucolan oraz 15% cementu CEM II/B-V 32,5 R. Dodatek dużych ilości pyłu krzemionkowego (20%, 30%) wpływa niekorzystnie na urabialność mieszanki, która staje się lepka oraz trudna do rozprowadzenia. Dodatek ten wpływa korzystnie na późną wytrzymałość, natomiast nie przyspiesza wiązania wczesnego. Biorąc pod uwagę zarówno wpływ na wytrzymałość, szybkość wiązania, jak i na konsystencję, najlepsze efekty uzyskać można stosując metakaolinit, jako dodatek do spoiwa wapiennego. Wzrost wytrzymałości był znaczny, natomiast mieszanka zachowała zakładaną konsystencję plastyczną. Na podstawie obserwacji z badań własnych wybrano ten dodatek pucolanowy w badaniach nad kompozytami wapienno-konopnymi.

W tym rozdziale przedstawiono i scharakteryzowano materiały wykorzystane we własnych mieszankach spoiw, a także odniesiono się do literatury, jeśli materiały te były już wykorzystywane do podobnych celów.

Wapno hydratyzowane

Jako główny składnik spoiwa wykorzystano wapno hydratyzowane produkcji Lhoist. Wapno to powinno być możliwie najwyższej czystości. W badaniach zostało wykorzystane wapno CL90s zgodne z normą PN-EN 459-1, co oznacza, że minimum 90% składu chemicznego stanowi $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Wg danych producentów, zawiera zwykle około 95% $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Jest to klasa najpowszechniej dostępna w sprzedaży.

Znaczna powierzchnia właściwa (około $15000 \text{ cm}^2/\text{g}$), prowadzi do przyspieszenia procesu karbonatyzacji. Materiał przechowywano w warunkach pozbawionych kontaktu z powietrzem. W tabeli 7.2 przedstawiono dane techniczne, natomiast w tabeli 7.3 właściwości fizyczne wykorzystanego wapna.

Tabela 7.2. Skład chemiczny wapna hydratyzowanego wykorzystanego w badaniach [www.lhoist.com]

Skład chemiczny	CaO+MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Woda wolna
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Wartości średnie	95,9	0,7	1,3	0,4	1,0
Wartości gwarantowane	≥ 90,0	≤ 1,0	≤ 4,0	≤ 1,0	≤ 2,0

Tabela 7.3. Właściwości fizyczne wapna hydratyzowanego wykorzystanego w badaniach [www.lhoist.com]

Właściwości fizyczne	Ciężar nasypowy [kg/dm ³]	Pozostałość na sicie 0,09 mm [%]	Pozostałość na sicie 0,2 mm [%]	Zawartość powietrza [%]	Stopień białości [Rd]
Wartości średnie	0,40–0,50	4,6	0,4	2,2–2,5	84,0
Wartości gwarantowane	0,40–0,50	≤ 7	≥ 2	≤ 12,0	≤ 80,0

Cement portlandzki

W celu zapewnienia wczesnego wiązania, zastosowano dodatkowe spoiwo o właściwościach hydraulicznych – cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5 R firmy Cemex (cementownia Chelm).

Celowo wybrano ten rodzaj cementu z uwagi na aspekt ekologiczny: 21–35% masy klinkieru jest w nim zastąpione materiałem pucolanowym – popiołem lotnym krzemionkowym, który jest odpadem przemysłowym. Dane techniczne wykorzystanego w badaniach cementu przedstawiono w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Dane techniczne cementu CEM II/B-V 32,5 R wykorzystanego w badaniach [www.cemex.pl]

Parametr	Jednostka	Graniczne wartości	Wynik	Odniesienie
Powierzchnia właściwa Blaine'a	cm ² /g	–	4655	PN-EN 196-6
Początek wiązania	min	≥ 75	248	PN-EN 196-3
Koniec wiązania	min	–	301	PN-EN 196-3
Zmiana objętości	mm	≤ 10	1,1	PN-EN 196-3
Wytrzymałość na ściskanie				
- po 2 dniach	MPa	≥ 10	17,6	PN-EN 196-1
- po 28 dniach		≥ 32,5 ≤ 52,5	43,2	
Zawartość SO ₃	%	≤ 3,5	2,798	PN-EN 196-2
Zawartość Cl	%	≤ 0,1	0,066	PN-EN 196-21
Zawartość rozpuszczalnego chromu Cr(VI)	ppm	≤ 2,0	0,26	PN-EN 196-10

Cement portlandzki stosowany jest w praktyce jako dodatek (zwykle nie przekraczający 30% całkowitej masy mieszanki spoiwa), natomiast jako samodzielne spoiwo w kompozycie konopnym nie jest wskazany, gdyż jest spoiwem szczelnym. Cecha ta utrudniłaby przenikanie pary wodnej przez ścianę,

utrudniłaby wysychanie, oddawanie wilgoci przez październik, czego efektem mógłby być rozwój korozji biologicznej. Utracona zostałaby ważna cecha kompozytu jaką jest paroprzepuszczalność.

Literatura przedstawia opisy badań, w których wykorzystywano cement w różnych proporcjach. W badaniach opisanych w (P.B. de Bruijn i in. 2009) stosowano cement w ilości od 2,7% do 10% wagowo względem całego spoiwa. Z kolei Oliver Kinnane (O. Kinnane i in. 2016) w swoich badaniach stosował 10% cementu wagowo w stosunku do wszystkich składników spoiwa.

Metakaolinit

Metakaolin (metakaolinit) jest wysoce reaktywnym materiałem pucolanowym. Jego głównym składnikiem jest uwodniony dioksyd glinu $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Powstaje podczas procesu prażenia kaolinitu ($\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$) w kontrolowanych warunkach temperaturowych, czyli w około 600–850°C, przedstawionego równaniem poniżej (5):



Metakaolinit zawiera aktywne formy tlenków krzemu i glinu, które w obecności wody reagują z wodorotlenkiem wapnia, tworząc produkty podobne pod względem składu chemicznego i struktury do produktów uwodnienia cementu portlandzkiego. Głównym celem zastosowania tej pucolany było przyspieszenie wiązania i zapewnienie wczesnej wytrzymałości kompozytu, umożliwiającą demontaż deskowania i wznoszenie wyższych partii ściany (aspekt praktyczny).

Do mieszanki wapienno-konopnej zastosowany został metakaolin produkcji Astra-Polska, o markowej nazwie ASTRA MK-40. Dane techniczne wykorzystanego w badaniach metakaolinu przedstawiono w tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Dane techniczne metakaolinitu wykorzystanego w badaniach [www.astra-polska.com]

Parametr	Jednostka	Wynik
Postać	–	Sypki proszek
Skład	–	Kalcynowany kaolin
Barwa	–	Biało-beżowa, kremowa
Ciężar właściwy	g/cm ³	2,6–2,63
Powierzchnia właściwa	cm ² /g	12000–15000
Gęstość usypowa	g/cm ³	0,6–0,7
Miałość	%	1,4
Zawartość składników nielotnych	%	Ok. 100
Rozpuszczalność i mieszalność z wodą	–	Miesza się we wszystkich proporcjach
Wodożądność	ml	300
Wartość pH (roztwór wodny)	–	8–9
Temperatura topnienia	°C	> 900

W odróżnieniu od pucolan pochodzenia przemysłowego takich jak mikrokrzemionka lub popiół lotny krzemionkowy, metakaolin w swym składzie zawiera znaczną ilość reaktywnego tlenku glinu (Al_2O_3). Związek ten w połączeniu z wodorotlenkiem wapnia, w obecności wody tworzy uwodniony glinian wapnia, który w procesie hydratacji cementu, powstaje najwcześniej i jako pierwszy produkt decyduje o wczesnej wytrzymałości spoiwa. Poza tlenkiem glinu, równie znaczącą ilość w objętości składu chemicznego metakaolinitu stanowi reaktywny tlenek krzemu (SiO_2), który w połączeniu z wodorotlenkiem wapnia, w obecności wody tworzy uwodniony krzemian wapnia. W tabeli 7.6 przedstawiono przykładowy skład chemiczny metakaolinitu. Analiza procesów chemicznych zachodzących w spoiwie nie była przedmiotem pracy, dlatego posłużono się w tym celu danymi z literatury (J.T. Ding i in. 2002):

Tabela 7.6. Przykładowy skład chemiczny metakaolinitu [J.T. Ding i in. 2002]

Zawartość składnika, % masy						
SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Fe_2O_3	Na_2O	Strata praż.
51,2	45,3	0,05	0,16	0,6	0,21	0,51

Metakaolinit był wykorzystywany jako modyfikator spoiwa wapiennego w badaniach opisanych w literaturze. W badaniach (R. Walker i in. 2014b,c) stosowano tą pucolanę jako częściowy zamiennik wapna w ilości 20% wagowo w stosunku do masy całego spoiwa (wapno + metakaolin). W innej publikacji (D. Barnat-Hunek i in. 2015) zawierającej wyniki i analizę badań nad kompozytami wapienno-konopnymi zastosowano metakaolin w ilości około 7% wagowo w składzie spoiwa. Przedmiotem badań był również dodatek metakaolinitu do zapraw wapiennych (P. Tesarek i in. 2005; A. Gameiro i in. 2014; S. Andrejkovičová i in. 2013a,b; P. Brzyski 2017).

Gips

Jako kolejny dodatek, w celu przyspieszenia wiązania spoiwa zastosowano gips budowlany. Materiał ten podawany był jako propozycja modyfikacji właściwości kompozytu wapienno-konopnego w książce (S. Allin 2012), jednak nie przedstawiono żadnych wyników badań nad kompozytami z wykorzystaniem gipsu. Gips półwodny ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) jest to wyprażona w temperaturze 150–190°C, zmielona na postać proszku skała gipsowa. Jego zaletą jest szybki początek (min. 5 minut) i koniec czasu wiązania (max. 20 minut). Przy zachowaniu stosunku W/G = 0,5, po 1 godzinie dojrzewania możliwa jest do osiągnięcia wytrzymałość na ściskanie min. 9 MPa. W tabeli 7.7 przedstawiono dane techniczne wykorzystanego w badaniach gipsu.

Tabela 7.7. Dane techniczne gipsu wykorzystanego w badaniach [www.dolinanidy.com]

Parametr	Wynik
Wygląd	Szaro-żółty proszek
pH	7–8 dla 10% mieszaniny z wodą
Gęstość względna	Ok. 2,3–2,37 g/cm ³
Rozpuszczalność	Ok. 8,9 CaSO ₄ /l H ₂ O
Zawartość siarczanu wapnia (CaSO ₄)	> 50%
Czas gotowości do pracy	Ok. 10 minut
Początek wiązania	Po ok. 3 minutach
Uziarnienie	Pozostałość na sicie 1,0 mm nie więcej niż 0,5% Pozostałość na sicie 0,2 mm nie więcej niż 15%
Temperatura podłoża i otoczenia	Od +5°C do 25°C

Glina mielona

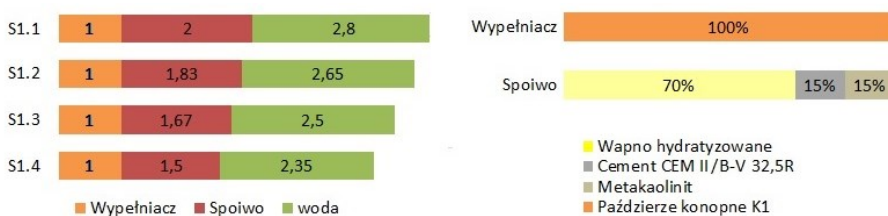
W jednej z *Serii* zastosowano dodatek czerwonej gliny mielonej o granulacji 0–1 mm, producenta CERADBUD. Materiał otrzymany został poprzez suszenie i mielenie naturalnej, czerwonej gliny, wydobywanej odkrywkowo ze złoża w Szkucinie. Zastosowano ją eksperymentalnie celem zwiększenia lepkości mieszanki. Gлина była wykorzystywana w badaniach jako spoiwo w kompozytach opartych na paździerzach konopnych (M. Degrave-Lemeurs i in. 2018; B. Mazhoud i in. 2017). Gлина jest również polecana jako jeden ze składników mieszanek wapienno-konopnych w książce o praktycznych aspektach budownictwa z konopi (S. Allin 2012). W budownictwie naturalnym gлина jest szerzej stosowana jako spoiwo do tynków oraz w kompozytach opartych na słomie zbożowej (tzw. gлина lekka).

8. Receptury

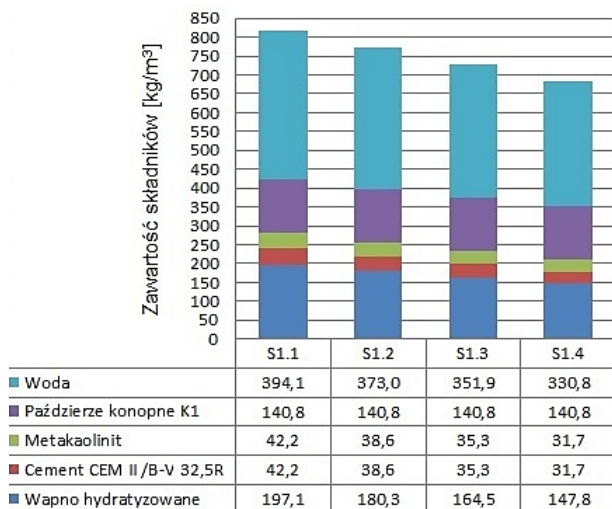
Opracowanie receptur było jednym z celów szczegółowych pracy. Postanowiono w znaczący sposób zróżnicować skład, grupując receptury kompozytu w 4 *Serie* różniące się składem pod względem zawartości wypełniaczy, spoiwa, rodzaju spoiwa. Trzy pierwsze *Serie* zostały wykonane przy wykorzystaniu paździerzy konopnych (K1) odmiany „Białobrzeskie” wyprodukowane przez Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu (IWNiRZ). Czwarta *Seria* została przygotowana z wykorzystaniem paździerzy konopnych (K2), również odmiany „Białobrzeskie”, jednak wyprodukowanych przez firmę Podlaskie Konopie. Zdecydowano się wykorzystać dwa typy paździerzy, dlatego że są one najczęściej stosowane na rynku krajowym, a także różnią się rozmiarem, zawartością włókien oraz frakcji pylastej, co pozwoliło na wyciągnięcie szerszych wniosków. W *Serii* 3 zdecydowano się na wykorzystanie paździerzy lnianych. W poszczególnych *Seriach* stosowano różne modyfikacje składu, aby osiągnąć poszczególne cele postawione w pracy, np. wpływ obecności różnych wypełniaczy, w zmiennych ilościach na wybrane właściwości kompozytu. We wszystkich *Seriach* kierowano się proporcjami wagowymi składników. Poniżej zostały opisane założenia przyjęte w poszczególnych *Seriach*.

Seria 1

W *Serii* 1 poszczególne próbki różnią się między sobą proporcją spoiwa do wypełniacza (paździerzy konopnych K1). Spoiwo wapienne zmodyfikowano cementem portlandzkim oraz metakaolinitem. Na rysunkach 8.1 i 8.2 przedstawiono proporcje poszczególnych składników w przygotowanych recepturach.



Rys. 8.1. Proporcje wykorzystane w *Serii* 1: proporcje wagowe wypełniacz: spoiwo: woda (po lewej); proporcje w % wagowo w składzie wypełniacza i spoiwa (po prawej)



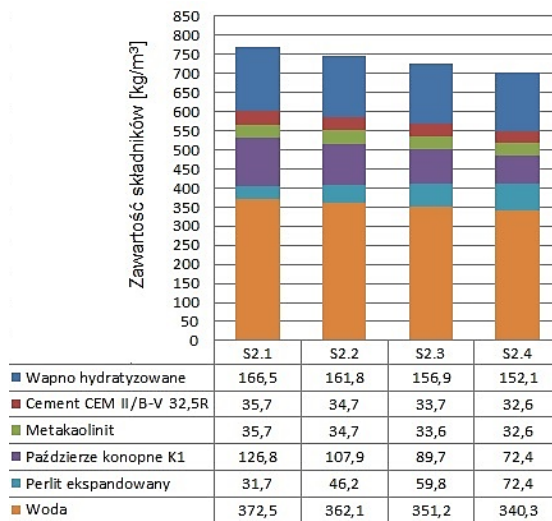
Rys. 8.2. Zawartość składników w kompozytach *Serii 1* w kilogramach na 1m³ mieszanki

Seria 2

W *Serii 2* poszczególne próbki różnią się między sobą proporcją dwóch składników wypełniacza. Zastosowano paździerz konopne *K1* oraz perlit ekspandowany EP-180. Kruszywo perlitowe zastosowano jako częściowy zamiennik paździerzy konopnych. Zastosowano jednakowe spoiwo względem *Serii 1*. Na rysunkach 8.3 i 8.4 przedstawiono proporcje poszczególnych składników w przygotowanych recepturach.



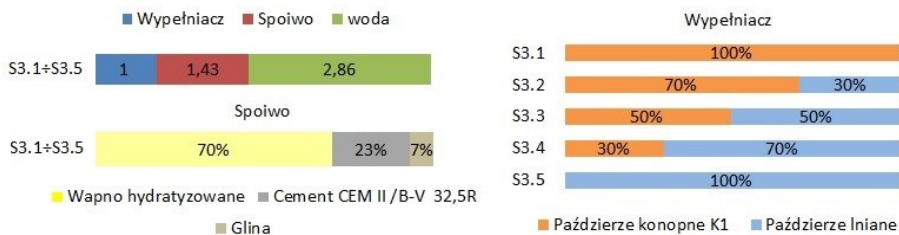
Rys. 8.3. Proporcje wykorzystane w *Serii 2*: proporcje wagowe wypełniacz: spoiwo: woda oraz proporcje w % wagowo w składzie spoiwa (po lewej); proporcje w % w składzie wypełniacza (po prawej)



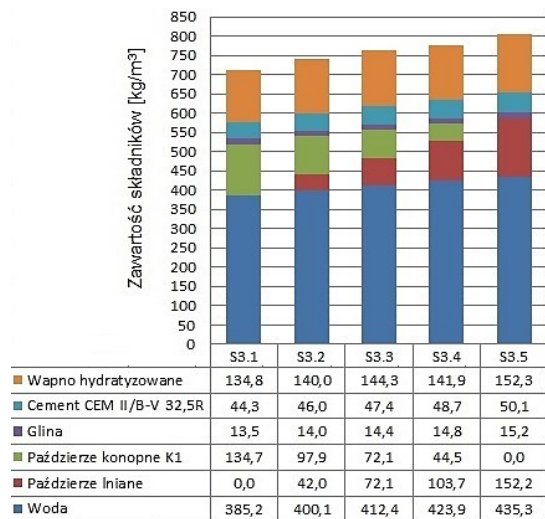
Rys. 8.4. Zawartość składników w kompozytach *Serii 2* w kilogramach na 1 m³ mieszanki

Seria 3

W *Serii 3* zastosowano dwa rodzaje wypełniaczy organicznych: paździerze konopne *K1* oraz paździerze lniane. W poszczególnych recepturach zastosowano zmienne proporcje obu wypełniaczy, przy jednakowym udziale spoiwa. Spoiwo składa się z 3 składników: Wapna hydratyzowanego w ilości 70%, cementu portlandzkiego w ilości 23% oraz gliny w ilości 7% w stosunku do całej masy spoiwa. Na rysunkach 8.5 i 8.6 przedstawiono proporcje wagowe poszczególnych składników w przygotowanych recepturach.



Rys. 8.5. Proporcje wykorzystane w *Serii 3*: proporcje wagowe wypełniacz: spoiwo: woda oraz proporcje w % wagowo w składzie spoiwa (po lewej); proporcje w % w składzie wypełniacza (po prawej)



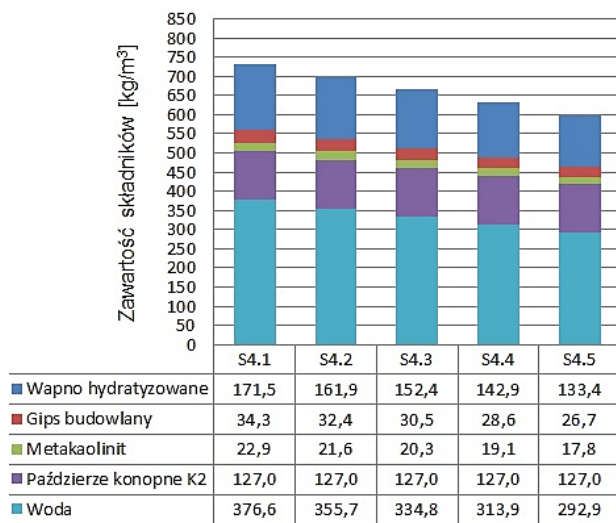
Rys. 8.6. Zawartość składników w kompozytach *Serii 3*: % wagowo (po lewej); w kilogramach na 1m³ mieszanki (po prawej)

Seria 4

W *Serii 4* wykorzystano paździerz konopny K2. Zastosowano tutaj zmienną ilość spoiwa w stosunku do ilości paździerzy konopnych. Jako spoiwo zastosowano: Wapno hydratyzowane w ilości 75%, gips budowlany w ilości 15% oraz metakaolinit w ilości 10% w stosunku do całej masy spoiwa. Na rysunkach 8.7 i 8.8 przedstawiono proporcje wagowe poszczególnych składników w przygotowanych recepturach.



Rys. 8.7. Proporcje wykorzystane w *Serii 4*: proporcje wagowe wypełniacz: spoiwo: woda oraz proporcje w % wagowo w składzie spoiwa (po lewej); proporcje w % w składzie wypełniacza (po prawej)



Rys. 8.8. Zawartość składników w kompozytach *Serii 4* w kilogramach na 1 m³ mieszanki

9. Przygotowywanie mieszanki wapienno-konopnej

Metoda mieszania oraz kolejność dozowania poszczególnych składników mieszanki wapienno-konopnej jest ściśle określona. W warunkach budowy zwykle wykorzystywany jest mieszalnik z pionową osią obrotu o dużych pojemnościach np. 600 litrów (Rys. 9.1–9.2).



Rys. 9.1. Mieszalnik do mieszania składników kompozytu wapienno-konopnego [P. Brzyski]



Rys. 9.2. Gotowa mieszanka wapienno-konopna [P. Brzyski]

W publikacjach odnaleźć można opisy różnych sposobów przygotowywania mieszanki. Możliwe jest wstępne moczenie paździerzki konopnych, a następnie dodanie suchego spoiwa oraz mieszanie aż do uzyskania odpowiedniej konsystencji (V. Cerezo 2005; T. Nguyen 2010; P.B. de Bruijn i in. 2009). Inną metodą jest dodawanie suchych paździerzki do płynnego spoiwa (E. Hirst i in. 2010; E. Gourlay i in. 2010; Arnaud i in. 2012). Prowadzone były badania na temat wpływu tych dwóch sposobów mieszania na właściwości mieszanki lub stwardniałego kompozytu (Walker i in. 2014b). Wstępne moczenie paździerzki nie wpłynęło na poprawę właściwości mechanicznych kompozytu. Rosanne Walker oraz Sara Pavia w jednych ze swoich badań przygotowali płynne spoiwo wykorzystując 75% wody przeznaczonej do mieszanki, a następnie do przygotowanego spoiwa dodali paździerzki konopne oraz pozostałe 25% wody (R. Walker i in. 2014b).

W badaniach własnych, w pierwszej kolejności wymieszano materiały wchodzące w skład spoiwa na sucho. Następnie, spoiwo wymieszano z wodą w ilości woda : spoiwo z przedziału 0,7–0,8 w zależności od składników spoiwa. Wstępne wymieszanie suchych składników spoiwa z wodą miało na celu otrzymanie jednolitej masy oraz dokładne otoczenie wodą ziaren spoiwa. Paździerzki konopne charakteryzują się wysoką nasiąkliwością wagową. Celuloza zawarta w paździerzach charakteryzuje się silnymi zdolnościami wiązania cząsteczek, co powoduje transport wody z matrycy do paździerzki. Jest to ważne w początkowym okresie wysychania, kiedy trwają procesy wiązania składników

spoiwa o właściwościach hydraulicznych. Paździerze, pochłaniając powoli część wody niezbędnej do procesu wiązania spoiwa powodują osłabienie struktury spoiwa, również w strefie styku (A. Arizzi i in. 2015). Z tego powodu, przy ustalaniu ilości wody zarobowej uwzględniono ilość wody, którą mogą wchłonąć paździerze w czasie mieszania składników, a także w początkowym okresie wysychania. Znając średnią nasiąkliwość wagową paździerzy odmierzono połowę ilości wody, którą może wchłonąć średnia przygotowana ilość paździerzy konopnych. Wodę tą dodano do przygotowanego spoiwa, po czym wymieszano, uzyskując masę o płynnej konsystencji. Następnie wymieszano je z suchymi paździerzami konopnymi. Składniki mieszano do czasu uzyskania jednolitej konsystencji oraz aż wszystkie paździerze konopne zostały powleczone płynnym spoiwem. W czasie mieszania dodawano stopniowo pozostałą połowę ilości wody, aż do momentu, w którym stwierdzono, że konsystencja jest właściwa. Całkowita ilość wody wprowadzona do mieszanki była każdorazowo notowana. Paździerze konopne, jako materiał naturalny i organiczny, nie są ściśle jednorodne i mogą się różnić nasiąkliwością w zależności od zawartości poszczególnych frakcji, zawartości pyłu oraz włókien w każdej osobno przygotowywanej próbce.

W przypadku mieszania wszystkich składników na sucho (paździerzy i spoiwa), a następnie wymieszaniu ich z wodą istniałoby ryzyko pozostawienia w mieszance miejscowo suchego proszku spoiwa, co miałoby negatywny wpływ na strukturę stwardniałego kompozytu. Efekty te zaobserwowano podczas prób przygotowywania mieszanek do badań.

Robocze kontrolowanie konsystencji i urabialności polegało na uformowaniu w dłoniach kuli z mieszanki wapienno-konopnej oraz manualnej próby jej rozdrobnienia. W sytuacji kiedy próbka rozwarstwia się na drobne elementy bez poczucia lepkości, oznacza to zbyt małą ilość wody. Kiedy próbka stawia opór w rozwarstwianiu (lub rozdrabnia się na kilka większych elementów) oraz można odczuć lepkość, oznacza to że konsystencja jest właściwa. Taka metoda stosowana jest na budowach, jak również jest to opisane w literaturze (W. Stanwix i in. 2014).

10. Przygotowywanie próbek do badań

Na rysunku 10.1 przedstawiono przykładowe próbki mieszanki wapienno-konopnej w formach. Z uwagi na obecność lekkiego wypełniacza oraz jego nieregularny kształt, zagęszczenie mieszanki pod wpływem siły ciężkości było niemożliwe. Mieszankę kompozytu wapienno-konopnego zagęszczono metodą ręczną, przy pomocy drewnianego ubijaka o średnicy 30 mm.



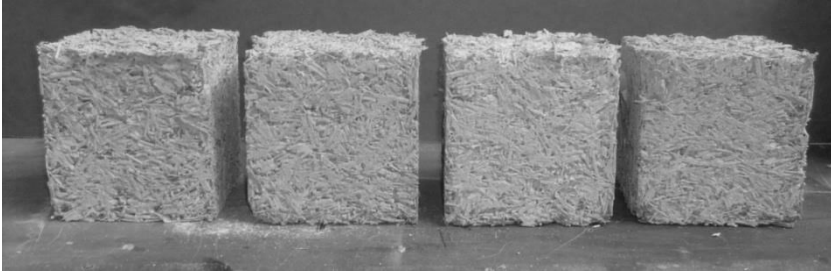
Rys. 10.1. Przykładowe próbki mieszanki wapienno-konopnej (Seria 1) zaformowane w formy o wymiarach: 100×100×500 mm (po lewej), 150×150×150 mm (po prawej) [P. Brzyski]

Z uwagi na charakterystykę wypełniacza, jego ściśliwość oraz losowość ułożenia, siła zagęszczenia decyduje o porowatości oraz gęstości kompozytu. W celu uzyskania porównywalnej gęstości kompozytu dla danej receptury, przed aplikacją mieszanki w formę zważono ją, a następnie po umieszczeniu mieszanki w formie, zważono formę wypełnioną mieszanką wapienno-konopną. W ten sposób, dysponując danymi na temat objętości formy oraz masy formy i jej zawartości, obliczono gęstość mieszanki oraz dążono do uzyskania zbliżonych wartości gęstości w każdej z wykonywanych próbek. Podobną technikę ujednoczenia gęstości próbek przypisanych do jednej receptury stosował Paulien Brigitte de Bruijn w swoich pracach badawczych (P.B. de Bruijn i in. 2009). Inną metodę stosował z kolei Laurent Arnaud (L. Arnaud i in. 2012), który zagęszczał próbki w sposób określony precyzyjnie za pomocą prasy hydraulicznej, zagęszczając warstwy mieszanki o grubości 50 mm naprężeniem 0,05 MPa.

Ubijano całą powierzchnię formy, by nie dopuścić do pozostawienia losowych, wolnych przestrzeni w kompozycie. Po zaformowaniu, próbki dojrzewały w formie przez 1 dobę, po czym je rozformowano. Kompozyt po rozformowaniu nie był jeszcze stwardniały, lecz plastyczny. Powodem jest przeważająca obecność spoiwa powietrznego oraz duża zawartość wody w kompozycie, co utrudniało szybkie wiązanie. Jednak dodatek hydrauliczny lub pucolanowy oraz kruszywo w postaci paździerzy o różnych frakcjach zdecydowały o tym, że kompozyt był możliwy do rozformowania już kilka godzin od wykonania – próbka zachowywała swój kształt i nie ugięła się pod wpływem własnego ciężaru. Zdecydowano się na rozformowanie po dobie by zminimalizować ryzyko

uszkodzenia próbek w trakcie rozformowywania, aby zapewnić rzetelność wyników poszczególnych badań.

Próbki pozostawiono do dojrzewania w warunkach wilgotności względnej $55 \pm 5\%$ oraz temperatury $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, w których powoli odparowywały oraz twardniały przez 28 dni (1 dzień w formie oraz 27 dni po rozformowaniu). Przykładowe próbki dojrzewające przedstawiono na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Dojrzewające próbki wapienno-konopne (przykładowe z *Serii 1*) [P. Brzyski]

11. Metoda analizy statystycznej wyników

Jako podstawową miarę zmienności wyników pokazującą rozproszenie uzyskanych wyników wokół wartości średniej arytmetycznej zastosowano w pracy odchylenie standardowe z próby wg wzoru (1):

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

Gdzie: \bar{x} – średnia arytmetyczna w próbie; x_i – kolejna wartość danej zmiennej w próbie, n – liczba elementów w próbie.

Znając odchylenie standardowe obliczono przedział ufności dla średniej arytmetycznej z próby oraz pokazano go w postaci słupków błędów na wykresach ze średnimi wynikami poszczególnych badań. Przedziałem ufności o poziomie ufności $1 - \alpha$ nazywamy taki przedział (μ_1, μ_2), który spełnia warunek (2):

$$P(\mu_1 < \mu < \mu_2) = 1 - \alpha \quad (2)$$

Gdzie: $1 - \alpha$ to poziom ufności równy 0,95; μ_1 oraz μ_2 są funkcjami wyznaczonymi na podstawie próby losowej wg wzorów (3) i (4):

$$\mu_1 = \bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$\mu_2 = \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Gdzie: $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ jest kwantylem rozkładu *t-Studenta* wyliczonym ze wzoru (5):

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} = t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, n - 1\right) \quad (5)$$

Liczba badań w próbie wynosiła 5, więc kwantyl rozkładu *t-Studenta* przyjęty do obliczenia przedziału ufności dla średniej arytmetycznej wyniósł (6):

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} = t(0,975, 4) = 2,7764 \quad (6)$$

W celu dokonania szerszej analizy statystycznej uzyskanych wyników w badaniach własnych, wykorzystano jednoczynnikową analizę wariancji *ANOVA*. Ta metoda statystyczna została opracowana w latach dwudziestych XX wieku przez Ronalda Fishera. W metodzie tej sprawdza się czy jedna zmienna niezależna (czynnik) wpływa na wyniki jednej zmiennej zależnej. Zakłada się, że czynnik (zmienna niezależna) przyjmuje tutaj formę grup różniących się między sobą pod względem wartości zmiennej zależnej. Polega ona na porównaniu wariancji międzygrupowej do wariancji wewnątrzgrupowej. Jeśli statystyka *F* jest mniejsza od 1 oznacza to, że wariancja niewyjaśniona przez model

(wewnątrzgrupowa) jest większa od wariancji wyjaśnionej (międzygrupowej). W takiej sytuacji mówi się o braku efektu. Jeśli współczynnik F jest większy od 1 możliwe jest dopiero sprawdzenie czy test jest istotny statystycznie. Statystyka testowa F ma rozkład Snedecora-Fishera przy założeniu hipotezy zerowej (czyli o równości średnich – tzn. braku efektu) i można sprawdzić czy krytyczny poziom istotności tej statystyki jest mniejszy niż 0.05.

Za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji przetestowano postawioną hipotezę zerową (7):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (7)$$

Wobec hipotezy alternatywnej (8):

$$H_1: \exists_{i,j \in (1,2,\dots,k)} \mu_i \neq \mu_j \quad (8)$$

Przed przystąpieniem do testu sprawdzono normalność rozkładu w podgrupach oraz jednorodność wariancji, co jest warunkiem analizy wariancji.

Otrzymany wynik jednoczynnikowej analizy wariancji informuje jedynie o tym, że zmienna grupująca jest istotnym efektem różnicującym poziomy średniej zmiennej zależnej. W celu określenia, które poziomy zmiennej grupującej dają statystycznie różne wartości średnich zmiennej zależnej, przeprowadzono testy post-hoc– test Tukeya, który jest odpowiednim kompromisem pomiędzy czułością testu, a kontrolą błędu I rodzaju. W przypadku układów zbalansowanych (jednakowa ilość prób w każdej grupie) jest on zalecany.

12. Badania materiału

12.1. Program badań

Badania właściwości fizyko-mechanicznych kompozytów miały posłużyć spełnieniu celów szczegółowych, a w efekcie celu głównego postawionego w pracy.

Jak napisano w rozdziale 8, zdecydowano się na znaczne zróżnicowanie składu kompozytów pod względem rodzajów i ilości wypełniaczy, rodzajów spoiwa, a także proporcji wagowej spoiwa do wypełniacza. W tym celu zbadano 4 *Serie* kompozytów, w których zawarte było 4 lub 5 receptur. W obrębie jednej *Serii* znajdowały się kompozyty zawierające te same składniki, lecz w zmiennych ilościach, natomiast każda *Seria* różniła się wybranymi składnikami. Takie pogrupowane zróżnicowanie miało na celu określenie zależności pomiędzy zmiennym składem, a właściwościami kompozytów. Z uwagi na znaczne różnice we frakcjach dwóch rodzajów paździerzy konopnych zawartości włókien oraz pyłu, za jeden z celów badań postawiono ich wpływ na wybrane właściwości kompozytu (*Seria 1–3* – paździerze *K1*, *Seria 4* – paździerze *K2*). Sprawdzono również, na przykładzie receptur *Serii 2* wpływ różnej zawartości dodatku perlitu ekspandowanego oraz na przykładzie *Serii 3* wpływ różnej zawartości paździerzy lnianych na wybrane właściwości kompozytów.

Wpływ modyfikacji składów określono na podstawie wyników badań podstawowych właściwości materiału, istotnych z punktu widzenia zastosowania go jako materiał ścienny. Część badawcza obejmowała przeprowadzenie następujących badań:

- gęstość objętościowa, porowatość całkowita
- współczynnik przewodności cieplnej
- nasiąkliwość masowa
- podciąganie kapilarne (wybrane receptury)
- paroprzepuszczalność (receptury wybrane do analizy cieplno-wilgotnościowej przegród ściennych)
- wytrzymałość na ściskanie
- wytrzymałość na zginanie

Po przeprowadzeniu badań wybrano 4 receptury (po 1 z każdej *Serii*), które wykorzystano do dalszej części pracy, czyli analizy cieplno-wilgotnościowej przegród. Za kryterium wyboru receptur przyjęto wyniki badań przewodności cieplnej. Wybrano kompozyty, które charakteryzowały się wartością współczynnika przewodności cieplnej w przedziale 0,082–0,1 W/(m·K), które umożliwiłyby spełnienie wymagań cieplnych stawianych ścianom zewnętrznym wg WT 2021 ($U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) przy grubości warstwy kompozytu nie przekraczającej 50 cm (w praktyce nie zaleca się przyjmować większych grubości). Procedura i założenia są szczegółowo opisane w rozdziale 13.

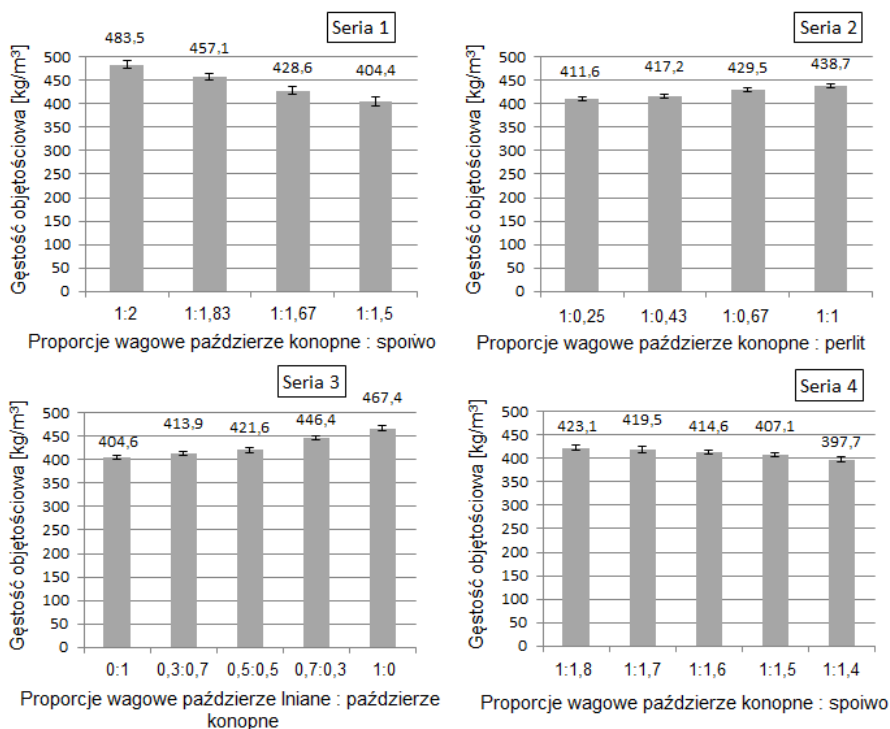
12.2. Gęstość objętościowa

Opis badania

Badanie gęstości objętościowej i porowatości całkowitej wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-7:2001. Do badania użyto po 6 próbek sześciennych o wymiarach 100×100×100 mm, z każdej *Serii*. Próbkę o znanej objętości wysuszono do stałej masy oraz zważono na wadze laboratoryjnej, wyliczając gęstość pozorną. Jest ona wyrażona poprzez stosunek masy próbki w stanie suchym do jej objętości.

Wyniki oraz dyskusja

Na wykresach (Rys. 12.1) przedstawiono uśrednione wyniki gęstości objętościowej wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.



Rys. 12.1. Gęstość objętościowa kompozytów z poszczególnych *Serii*

Badane kompozyty charakteryzują się gęstością objętościową w zakresie od 397,7 kg/m³ do 483,5 kg/m³. Najniższe wartości osiągnęły kompozyty z *Serii 4* (397,6–423,1 kg/m³) zawierające paździerz konopne K2 oraz z *Serii 2*

(411,6–438,7 kg/m³) zawierające paździerz konopne *KI* i perlit ekspandowany. Najwyższe natomiast, kompozyty z *Serii 3* (404,6–467,4 kg/m³) zawierające oprócz paździerzy konopnych *KI* paździerz lniane oraz kompozyty z *Serii 1* (404,4–483,5 kg/m³).

Poszczególne receptury w *Serii 1* różniły się proporcją spoiwa do wypełniacza. Wraz ze wzrostem zawartości spoiwa w mieszance wzrasta gęstość objętościowa kompozytu. Zwiększanie ilości spoiwa w mieszance (w ilościach zastosowanych w badaniach własnych) nie zwiększa objętości kompozytu, gdyż wypełnia ono przestrzeń pomiędzy paździerzami konopnymi. Dlatego też w każdej recepturze na 1m³ została wykorzystana jednakowa ilość paździerzy, przy zmiennej ilości spoiwa. W innych badaniach (Walker i in. 2014b,c) zastosowano proporcję wagową paździerze: spoiwo jak w recepturze S1.1., czyli 1:2. Gęstość objętościowa wyniosła od 508 do 627 kg/m³. Różnica w porównaniu z badaniami własnymi mogła mieć związek z siłą zagęszczenia lub frakcją paździerzy.

Kompozyty z *Serii 2* zawierały stałą proporcję wagową spoiwa do wypełniacza, natomiast różniły się procentowym udziałem dwóch rodzajów wypełniaczy – paździerzy konopnych *KI* oraz perlitu ekspandowanego. Wraz ze wzrostem zawartości perlitu oraz spadkiem zawartości paździerzy wzrasta gęstość. Jednak różnice nie są znaczne z uwagi na porównywalną gęstość objętościową tych dwóch składników w stanie luźnym (90–120 kg/m³). Najwyższa średnia gęstość stanowi 107% najniższej wartości średniej gęstości spośród badanych receptur. Różne długości paździerzy konopnych powodują, że podczas zagęszczania układają się one losowo, formując pustki powietrzne pomiędzy paździerzami. Perlit ekspandowany, ze względu na drobniejsze frakcje, częściowo wypełnia przestrzeń pomiędzy paździerzami, wskutek czego wzrasta gęstość kompozytu wraz ze wzrostem zawartości tego kruszywa.

Kompozyty w *Serii 3* zawierały zmienną proporcję dwóch wypełniaczy: paździerzy konopnych *KI* oraz lnianych. Gęstość objętościowa wzrasta wraz ze wzrostem zawartości paździerzy lnianych i spadkiem zawartości paździerzy konopnych w składzie kompozytów. Paździerz lniane charakteryzują się mniejszymi wymiarami niż konopne, są bardziej ściśliwe, dlatego podczas zagęszczania wypełniają przestrzeń między większymi paździerzami konopnymi. Wraz ze wzrostem zawartości paździerzy lnianych w mieszance, zwiększa się ilość składników (również spoiwa) konieczna do uzyskania 1 m³ zagęszczonego kompozytu. Gęstość kompozytu wykonanego z receptury zawierającej jedynie paździerz lniane stanowi 115% gęstości kompozytu opartego na wypełniaczu w postaci paździerzy konopnych, którego struktura jest bardziej porowata (puste przestrzenie pomiędzy paździerzami konopnymi). Gęstość kompozytów wapienno-lnianych badał m.in. Mourad Rahim (M. Rahim i in. 2015). Gęstość objętościowa kompozytu według M. Rahim wyniosła około 603 kg/m³, przy objętościowym udziale wapna do paździerzy 10% : 68% oraz gęstości objętościowej paździerzy około 90 kg/m³.

W kompozytach z *Serii 4*, podobnie jak w *Serii 1* gęstość objętościowa wzrasta wraz ze wzrostem udziału spoiwa (proporcji spoiwo : paździerz). Wyniki pomiędzy poszczególnymi recepturami są w tej *Serii* jednak mniej zróżnicowane. Najwyższa średnia gęstość stanowi 106% najniższej wartości średniej gęstości spośród badanych receptur (dla porównania w *Serii 1* – 119%). Różnice w wynikach pomiędzy obiema *Seriami* wynikają z zastosowania innych proporcji spoiwa do wypełniaczy: w *Serii 1* od 1,5:1 do 2,0:1 natomiast w *Serii 4* od 1,4:1 do 1,8:1. Wpływ na różnice miało też zastosowanie dwóch rodzajów paździerzy. Paździerz *K1* są bardziej zróżnicowane pod względem frakcji. Ich kształt jest podłużny, a grubość mniejsza z porównaniu z *K2*, przez co są bardziej podatne na zagęszczanie. Kolejnym czynnikiem może być rodzaj spoiwa. W *Serii 1* zastosowano modyfikację spoiwa cementem, natomiast w *Serii 2* gipsem, który jest lżejszym spoiwem niż cement portlandzki.

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4* analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na gęstość objętościową, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na gęstość objętościową, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na gęstość objętościową.

Test ANOVA wykazał, że we wszystkich grupach (*Seria 1–4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F we wszystkich *Seriach* wyniosła więcej niż 1, a wartość p mniej niż 0,05, przy czym w *Serii 3* $p \approx 0$, co świadczy o najwyższym poziomie istotności różnic wewnątrzgrupowych, natomiast w *Serii 2* $p = 3,8E-10$, co świadczy o najniższym poziomie istotności różnic wewnątrz grupy spośród wszystkich grup (*Serii*).

Test Tukeya wykazał, że średnie gęstości objętościowe kompozytów wykonanych według niemal wszystkich receptur każdej z poszczególnych *Serii* różnią się istotnie statystycznie, o czym świadczą wartości poziomu istotności $p < 0,05$. Prawie wszystkie zabiegi modyfikacji składu kompozytów przeprowadzone w badaniach istotnie wpływają na zmiany ich gęstości objętościowej (wewnątrz każdej z grup – *Serii*). Jedynie średnie wyniki gęstości objętościowej kompozytu z receptury S4.1 oraz S4.2, a także S4.2 oraz S4.3 nie różnią się istotnie statystycznie ($p = 0,336$ oraz $p = 0,114$). Są to receptury z wagową proporcją spoiwa do paździerzy konopnych 1,8:1 oraz 1,7:1, a także 1,7:1 oraz 1,6:1.

12.3. Porowatość całkowita

Opis badania

Gęstość właściwą kompozytów określono metodą piknometryczną na podstawie normy PN-EN 1936:2010. Gęstość właściwa jest to stosunek masy próbki do jej objętości bez uwzględnienia porów. Próbkę kompozytu do badania sproszkowano do frakcji $< 0,063$ mm poprzez zmielenie w młynku kulowym (Rys. 12.2). Na podstawie wyników gęstości właściwej i objętościowej obliczono porowatość całkowitą.

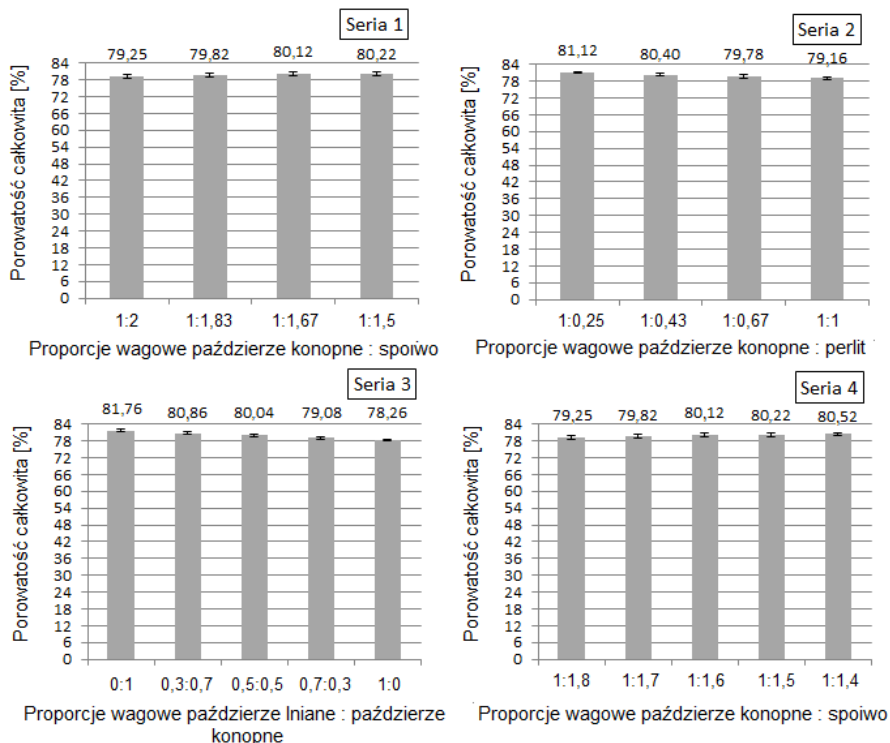


Rys. 12.2. Fragmenty próbki umieszczonej w naczyniu z kulkami mielącymi (po lewej) oraz zmielona próbka kompozytu (po prawej) [P. Brzyski]

Wyniki i dyskusja

Na wykresach 12.3 przedstawiono uśrednione wyniki porowatości całkowitej wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.

Badane kompozyty charakteryzują się porowatością całkowitą w zakresie od 78,3% do 81,8%. Wysoka porowatość wynika z parametrów wykorzystanych składników oraz sposobu zagęszczania. Paździerze konopne cechuje porowatość rzędu 90 % (M. Rahim i in. 2015), paździerze lniane rzędu 87–93% (B. Rentsen 2010; M. Rahim i in. 2015) natomiast perlit ekspandowany wykazuje porowatość na poziomie 88 % (T.M. Morrison i in. 1960). L. Arnaud wyróżnił kilka przedziałów opisujących rozmiary występujących porów w stwardniałym kompozycie (L. Arnaud i in. 2012): makropory (1 cm średnicy), powstające z powodu niedoskonałego ułożenia paździerzy w materiale; mezopory (od 0,1 mm do 1 mm), wytworzone pomiędzy paździerzami a spoiwem (uwięzione powietrze) oraz mikropory (poniżej 0,01 μm), pomiędzy hydratami w matrycy spoiwa.



Rys. 12.3. Porowatość całkowita kompozytów z poszczególnych *Serii*

Na przykładzie wyników z *Serii 1* oraz *Serii 4* zauważyć można spadek porowatości wraz ze wzrostem udziału spoiwa w składzie kompozytu. Nie są to jednak znaczące różnice – najwyższa porowatość różni się o odpowiednio 0,97% oraz 1,27% od najniższej z tych *Serii*. Zastosowane ilości spoiwa nie powodowały znacznego wypełnienia pustych przestrzeni między paździerzami, a spoiwo jedynie powlekle powierzchnię wypełniaczy. W *Serii 2* z kolei wraz ze wzrostem zawartości perlitu ekspandowanego nastąpił spadek porowatości z uwagi na wypełnienie wolnych przestrzeni kruszywem perlitowym o drobnych frakcjach. Nie były to jednak znaczące zmiany, gdyż perlit ekspandowany, jak wcześniej wspomniano jest wysoce porowatym kruszywem. Różnica pomiędzy maksymalną na minimalną porowatością wyniosła 1,96%. Analizując *Serię 3* zauważyć można największe zróżnicowanie pomiędzy porowatością poszczególnych receptur. Wraz ze wzrostem udziału paździerzy lnianych w składzie, maleje porowatość stwardniałego kompozytu. Kompozyt wykonany na podstawie receptury, w której jedynym wypełniaczem były paździerze lniane charakteryzuje się porowatością niższą o 3,5% w stosunku do kompozytu o najwyższej porowatości (wynoszącej 81,76%) wykonanego na podstawie receptury zawierającej jedynie paździerze konopne, jako wypełniacz.

W pozostałych *Seriach* różnice pomiędzy skrajnymi wartościami były mniejsze i wynosiły około 1%.

Według badań M. Rahim (M. Rahim i in. 2016) porowatość kompozytów wapienno-konopnych była porównywalna z badaniami własnymi – kompozyt o gęstości nasypowej 478 kg/m^3 wykazał całkowitą porowatość równą 76,4%. Natomiast w innych badaniach (M. Barclay i in. 2014) porowatość 80% uzyskano przy gęstości objętościowej kompozytu wynoszącej 304 kg/m^3 . W badaniach prowadzonych przez F. Collet i S. Pretot (F. Collet i in. 2014) dla kompozytów z przedziału gęstości $258\text{--}463 \text{ kg/m}^3$ charakteryzowały się porowatością całkowitą w przedziale 84,9–72%.

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4* analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na porowatość całkowitą, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na porowatość całkowitą, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na porowatość całkowitą.

Test ANOVA wykazał, że w trzech grupach (*Seria 2–4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość p w tych grupach jest mniejsza niż 0,05, natomiast w *Serii 1* wyniosła 0,063, co świadczy o tym, że różnice pomiędzy średnimi wewnątrz grupy nie są istotne statystycznie. Najniższą wartość p , świadczącą o największym zróżnicowaniu wyników wewnątrz grupy uzyskano w *Serii 3* ($p = 4,9\text{E-}12$).

Test Tukeya wykazał, że wprowadzenie częściowych zamienników wypełniacza w postaci paździerzy lnianych (*Seria 3*), a dokładnie zwiększanie ich ilości spowodowało istotne statystycznie różnice pomiędzy średnimi wynikami porowatości całkowitej kompozytów (poziom istotności $p < 0,05$) porównując wszystkie receptury w parach. Z kolei w przypadku *Serii 1* oraz *4*, w których poszczególne receptury różniły się proporcją spoiwa do paździerzy konopnych, różnice pomiędzy średnimi wynikami porowatości okazały się nieistotne statystycznie, poza wyjątkiem zestawienia pary kompozytów z *Serii 4* o skrajnych zawartościach spoiwa. W *Serii 2* z kolei nieistotne statystycznie różnice uzyskano porównując kompozyty z 20% i 30%; 30% i 40% oraz 40% i 50% zawartością perlitu ekspandowanego, czyli zestawiając pary receptur różniących się zawartością perlitu o 10 % względem siebie.

12.4. Przewodnictwo cieplne

Opis badania

Badanie współczynnika przewodności cieplnej λ kompozytu wykonano w oparciu o PN ISO 8302:1999 na próbkach o wymiarach $300 \times 300 \times 50$ mm, przy pomocy aparatu płytowego Fox 314, producenta Lasercomp oraz

oprogramowania komputerowego WinTherm. Aparat składa się z płyty chłodzącej i grzewczej z czujnikiem strumienia ciepłego. Informacje na temat błędów pomiarowych tej metodyki zawarte są w PN-EN 1946-2. Precyzyzność pomiaru przewodności cieplnej wynosi ok. 2%, natomiast dla całego zakresu mierniczego aparatu ok. 5%. Próbki zostały zbadane po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych (temperatura powietrza 20 ± 2 °C, wilgotność względna powietrza $55 \pm 5\%$), a następnie zostały wysuszone do stałej masy w suszarce o temperaturze 60 °C. Zadano temperaturę na płycie grzejnej w wysokości 25 °C, natomiast chłodzącej 0 °C, uzyskując średnią temperaturę 12.5 °C. Wynikiem testu był średni współczynnik przewodności cieplnej materiału. Zasada przeprowadzania testu polega na przepuszczeniu przez próbkę określonego strumienia ciepła oraz zmierzeniu temperatur powstałych przy ustalonym przepływie ciepła na powierzchniach doprowadzenia i odprowadzenia ciepła. Zasada działania aparatu płytowego oparta jest na jednowymiarowym prawie Fouriera (9):

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

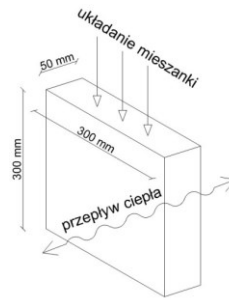
gdzie q to gęstość strumienia ciepła przechodzącego przez próbkę [W/m^2], λ to współczynnik przewodzenia ciepła materiału [$W/(m \cdot K)$], dT/dx to gradient temperatury na izotermicznej płaskiej powierzchni próbki [K/m]. Znak minus we wzorze (9) oznacza, że przepływ ciepła skierowany jest przeciwnie do wzrastającej temperatury.

Po osiągnięciu jednowymiarowego pola temperatur w całej objętości próbki, możliwe jest wyznaczenie gradientu temperatury poprzez pomiar różnicy temperatury między płytami oraz pomiar grubości próbki. W takim przypadku średni gradient temperatury wynosi $\Delta T/\Delta x$.

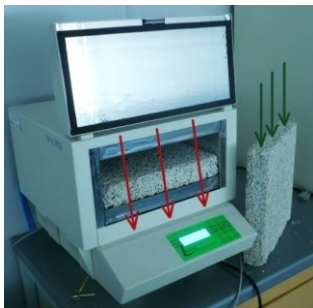
Przewodnictwo cieplne materiału powinno badać się w kierunku zgodnym z przewidywanym miejscem aplikacji kompozytu, uwzględniając kierunek układania mieszanki w deskowaniu. Próbki były układane i zagęszczane w formie w analogiczny sposób jak w ścianie. Mieszanka została ułożona w formie i zagęszczana w kierunku pionowym. Strumień ciepła przechodzący przez próbkę ułożoną pomiędzy płytą chłodzącą i grzejną podczas badania był skierowany prostopadle do kierunku zagęszczania materiału. W rzeczywistości, w przypadku ściany zewnętrznej, strumień ciepła również przepływa w kierunku prostopadłym do kierunku zagęszczania mieszanki w deskowaniu. Pod względem kierunku układania mieszanki oraz kierunku przepływu ciepła przez materiał, w badaniu zasymulowano przepływ ciepła w warunkach ustalonych w ścianie zewnętrznej (Rys. 12.4–12.7).



Rys. 12.4. Próbkę kompozytu wapienno-konopnego umieszczona w aparacie płytowym Fox314 [P. Brzyski]



Rys. 12.5. Schemat kierunku układania mieszanki oraz przepływu strumienia ciepła przez próbkę w aparacie płytowym [P. Brzyski]



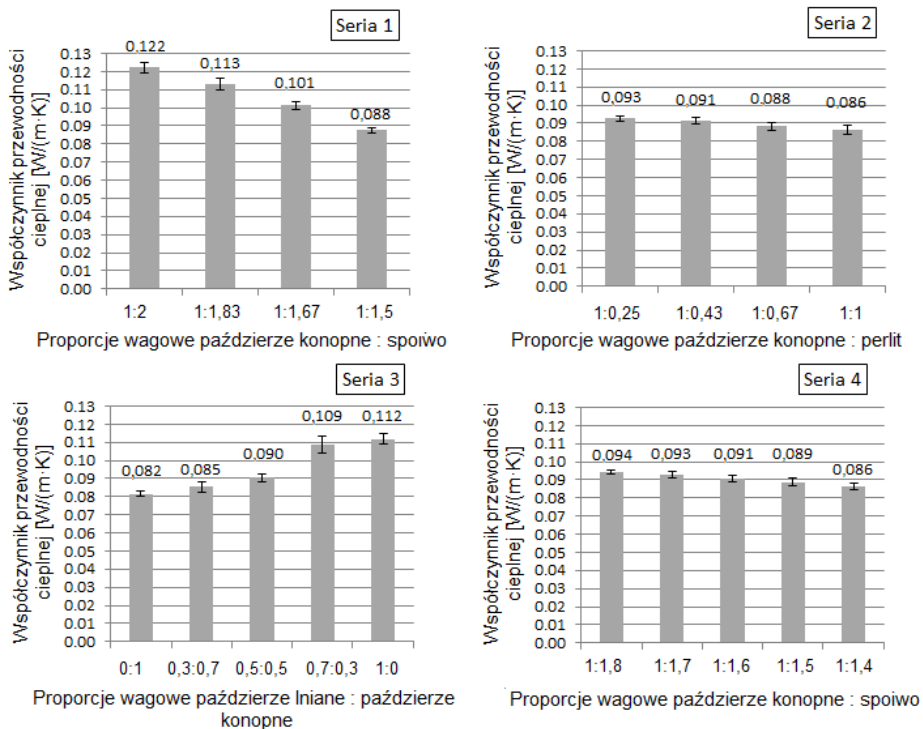
Rys.12.6. Próbkę umieszczona w aparacie płytowym. Kierunek strumienia ciepła podczas badania (czerwone strzałki) i kierunek zagęszczania mieszanki podczas przygotowywania próbki (zielone strzałki) [P. Brzyski]



Rys. 12.7. Kierunek zagęszczania mieszanki w deskowaniu ściennym [P. Brzyski]

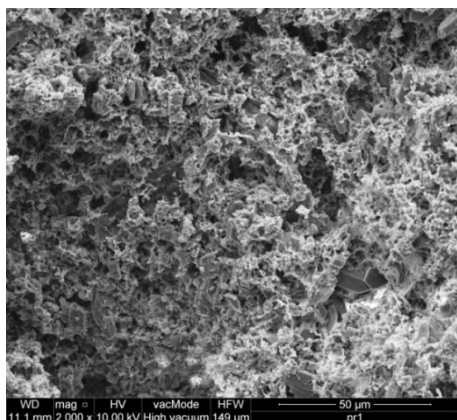
Wyniki oraz dyskusja

Na wykresach 12.8 przedstawiono uśrednione wyniki współczynnika przewodności cieplnej wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.

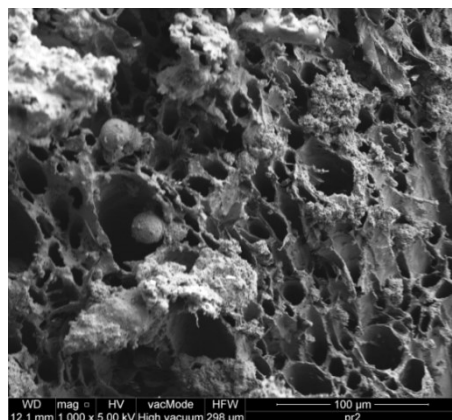


Rys. 12.8. Współczynnik przewodności cieplnej kompozytów z poszczególnych *Serii*

Badane kompozyty charakteryzują się współczynnikiem przewodności cieplnej w zakresie od 0,082 do 0,122 W/(m·K). Przedział uzyskanych wartości w poszczególnych *Seriach* był porównywalny. O dobrych parametrach izolacyjności termicznej kompozytów zdecydowała wysoce porowata struktura zarówno składników (paździerz, perlitu, spoiwa) jak i samego kompozytu. Na rysunkach 12.9 i 12.10 przedstawiono zbliżenie porowatej struktury, odpowiednio – spoiwa na bazie wapna hydratyzowanego oraz paździerz konopnych. Na rysunku 12.10, widoczne są podłużne pory w strukturze paździerz konopnych. Podobny układ porów w przekroju paździerz przedstawiono w literaturze (F. Collet i in. 2013).



Rys. 12.9. Porowata struktura spoiwa wapiennego ($\times 2000$) [P. Brzyski]



Rys. 12.10. Sieć porów w paździerzach konopnych ($\times 1000$) [P. Brzyski]

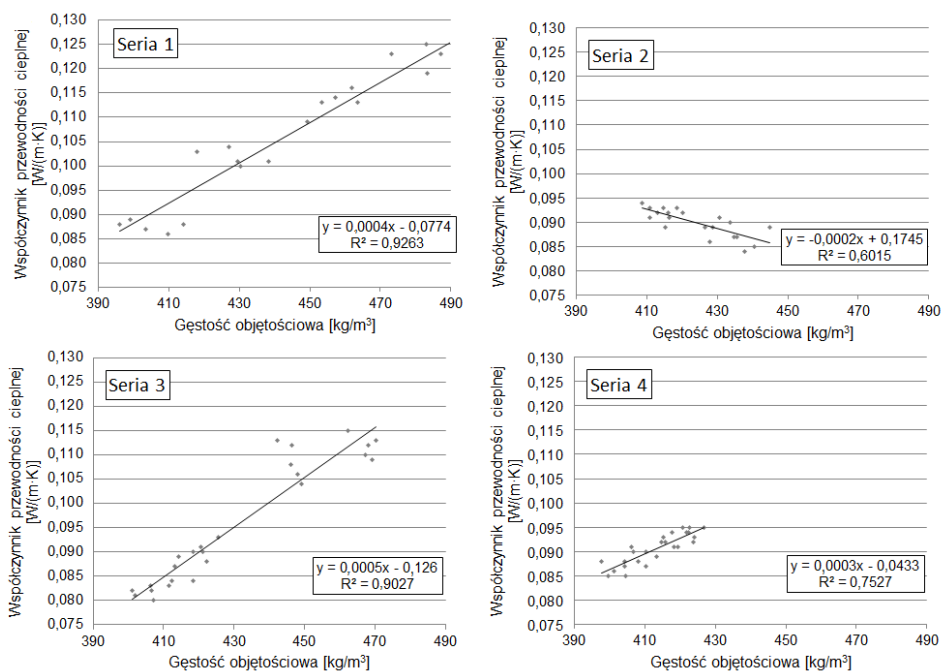
Na przykładzie wyników z *Serii 1* oraz *Serii 4* wyraźny jest wpływ proporcji spoiwa do wypełniaczy na wartość współczynnika λ . Wraz ze wzrostem udziału wagowego spoiwa w mieszance wzrasta wartość współczynnika przewodności cieplnej, jednak zależność ta nie jest liniowa. Obserwacje tą potwierdzają wyniki badań przedstawione w literaturze (S. Benfratello i in. 2013). Zwiększenie zawartości spoiwa w składzie oznacza zmniejszenie porowatości kompozytu, a więc zmniejszenie ilości zamkniętego powietrza w jego strukturze. Współczynnik przewodności cieplnej spoiwa wapiennego wynosi około $0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, czyli jest około 12 razy większy niż współczynnik λ paździerz konopnych (G. Balčiūnas i in. 2016).

W przypadku kompozytów z *Serii 2*, wyniki są mało zróżnicowane pomiędzy poszczególnymi recepturami ($0,086\text{--}0,093 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Powodem był stały udział spoiwa w składzie mieszanki. Perlit ekspandowany wykazuje niższą przewodność cieplną ($\lambda = 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) niż paździerz konopne ($\lambda \approx 0,058 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) i w związku z tym widoczny jest spadek przewodnictwa cieplnego kompozytów wraz ze wzrostem zawartości perlitu. Perlit ekspandowany, z uwagi na drobną i regularną frakcję ($0\text{--}4 \text{ mm}$) wypełnił częściowo pory technologiczne powstałe na skutek losowego ułożenia paździerzy. W ten sposób struktura kompozytu stała się bardziej zwarta, a puste przestrzenie pomiędzy paździerzami zmniejszyły swoją objętość, czego następstwem mogło być zmniejszenie przewodzenia ciepła na skutek konwekcji. Opisane obserwacje również mogły mieć wpływ na zmniejszenie współczynnika przewodności cieplnej kompozytu przy zwiększaniu zawartości perlitu.

W kompozytach wykonanych na podstawie receptur z *Serii 3* współczynnik przewodności cieplnej wzrasta wraz ze wzrostem zawartości paździerzy lnianych w składzie kompozytów od $0,082$ do $0,112 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Wypełniacze w postaci paździerzy lnianych zdecydowały o lepszym dopasowaniu, ułożeniu dwóch różnych wypełniaczy i uzyskaniu lepszej zwartości oraz jednorodności

kompozytów w porównaniu z próbką niezawierającą paździerzy lnianych. Jednak zdecydowały też o większej gęstości, wypełnieniu wolnych przestrzeni między dłuższymi paździerzami konopnymi. Z uwagi na mniejszą frakcję paździerzy lnianych (większe zapotrzebowanie na spoiwo) oraz większe przewodnictwo cieplne (0,059–0,066 W/(m·K) (badania własne)) niż konopnych, nastąpił wzrost przewodnictwa cieplnego kompozytów.

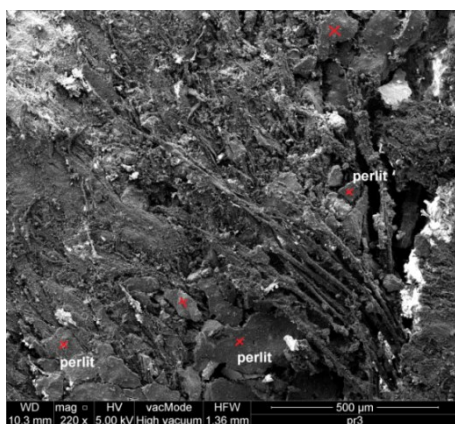
Na rys. 12.11 przedstawiono wykresy zależności wartości współczynnika przewodności cieplnej od gęstości objętościowej badanych kompozytów. Najbardziej precyzyjna zależność została uzyskana dla *Serii 1* oraz *Serii 3*, czego dowodem są współczynniki determinacji równe odpowiednio 0,926 oraz 0,903. Największy rozrzut wyników, świadczący o mniejszej zależności tych dwóch właściwości, stosując zastosowane w badaniach proporcje i składniki kompozytów, wystąpił w *Serii 2* i wyniósł 0,602 (współczynnik determinacji).



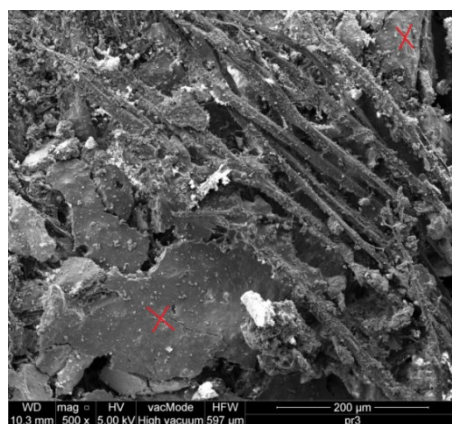
Rys. 12.11. Zależności wartości współczynnika przewodności cieplnej od gęstości objętościowej kompozytów z poszczególnych *Serii*

Wartość współczynnika przewodności cieplnej λ kompozytu wapienno-konopnego zależy od gęstości materiału, która z kolei związana jest m.in. z proporcją spoiwa do wypełniacza. Według danych literatury (E. Sassoni i in. 2014; A. Shea i in. 2012; S. Benfratello i in. 2013; R. Walker i in. 2014c; F. Collet i in. 2014) oraz wyników *Serii 1, 3, 4*, wartość współczynnika przewodności wzrasta wraz ze wzrostem gęstości objętościowej kompozytów wapienno-

-konopnych. Zależność ta nie została jednak zaobserwowana w przypadku wyników *Serii 2*. Kompozyt o największej gęstości objętościowej (438,7 kg/m³) charakteryzuje się najniższym współczynnikiem λ , równym 0,085 W/(m·K). Jak opisano wyżej, perlit ekspandowany wykazuje niższą przewodność cieplną niż paździerze konopne i w związku z tym, wraz ze wzrostem zawartości kruszywa perlitowego w kompozycie, wzrastają jego zdolności izolowania termicznego. Wypełnienie pustych przestrzeni perlitem z kolei zwiększyło gęstość objętościową kompozytu, dlatego nie uzyskano opisanej w pozostałych *Seriach* zależności pomiędzy gęstością, a przewodnością cieplną. Na rysunkach 12.12 i 12.13 przedstawiono kolorem czerwonym kruszywo perlitowe wypełniające kompozyt wapienno-konopny.



Rys. 12.12. Struktura kompozytu wypełnionego paździerzami oraz perlitem ekspandowanym ($\times 100$) [P. Brzyski]



Rys. 12.13. Kruszywo perlitowe wypełniające kompozyt wapienno-konopny ($\times 500$) [P. Brzyski]

Przedmiotem obcych badań był również wpływ rodzaju spoiwa na parametry cieplne kompozytu. R. Walker i wsp. na podstawie badań stwierdzili, że rodzaj spoiwa nie wpływa znacząco na wartość przewodności cieplnej (R. Walker i in. 2014c). Natomiast (E. Gourlay i in. 2010) wykazali, że kompozyty na bazie wapna hydraulicznego charakteryzują się większą przewodnością cieplną niż te oparte na wapie hydratyzowanym. Ma to związek z gęstością obu spoiw. Wapno hydrauliczne tworzy szczelniejszą strukturę, mniej porowatą, a zarazem charakteryzującą się większą gęstością niż wapno hydratyzowane, co przekłada się na mniejszy opór cieplny. Maria Stefanidou i wsp. (M. Stefanidou i in. 2010) wykazali, że dodatek materiałów pucolanowych zmniejsza przewodność cieplną kompozytu w porównaniu z kompozytem opartym na czystym wapie. Podobne zależności zaobserwowali Etienne Gourlay i L. Arnauld (Gourlay i in. 2010). W badaniach własnych nie stosowano zróżnicowanych konfiguracji składu spoiwa w obrębie jednej *Serii* receptur. Zmienna była jedynie jego ilość.

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4* analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na przewodność cieplną, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na przewodność cieplną, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na przewodność cieplną.

Test ANOVA wykazał, że w każdej grupie (*Seria 1-4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F we wszystkich *Seriach* wyniosła więcej niż 1, natomiast wartość $p < 0,05$, przy czym w *Serii 3*, $p = 1,2E-14$, co świadczy o najwyższym poziomie istotności różnic wewnątrzgrupowych (największym zróżnicowaniu wyników), natomiast w *Serii 2* $p = 1,0E-04$, co świadczy o najniższym poziomie istotności różnic wewnątrz grupy.

Na podstawie wyników testu Tukeya stwierdzić można, że większość modyfikacji składów kompozytu skutkowały istotnymi statystycznie różnicami pomiędzy średnimi wynikami współczynnika przewodności cieplnej poszczególnych kompozytów w obrębie każdej z serii ($p < 0,05$). Przewaga istotnych statystycznie różnic świadczy o szerokich możliwościach wpływania na wartość lambda, modyfikując skład kompozytów.

Nieistotne statystycznie różnice uzyskano porównując średnie wyniki współczynnika przewodności cieplnej kompozytów:

- *Seria 2* – porównując kompozyty z 20% i 30%; 30% i 40% oraz 40% i 50% zawartością perlitu ekspandowanego, czyli zestawiając pary receptur różniących się zawartością perlitu o 10% względem siebie (p w zakresie 0,1-0,67)
- *Seria 3* – porównując średnią wartość lambda kompozytu zawierającego 70% i 100% paździerzy lnianych oraz 70% i 100% paździerzy konopnych, czyli skrajnych receptur zawierających największe ilości poszczególnych wypełniaczy ($p = 0,157$ oraz 0,293)
- *Seria 4* – porównując kompozyty o proporcji spoiwa do paździerzy 1,8:1 i 1,7:1; 1,7:1 i 1,6:1 oraz 1,6:1 i 1,5:1 (p w zakresie 0,153–0,335).

12.5. Nasiąkliwość wagowa

Opis badania

Badanie przeprowadzono na próbkach sześciennych 100×100×100 mm, po 6 próbek z każdej *Serii*. Polegało na wysuszeniu próbek w suszarce laboratoryjnej do niezmienniej masy w temperaturze 60 ± 5 °C, zważeniu ich oraz umieszczeniu w wannie laboratoryjnej. Odczytów dokonywano w ustalonych odstępach czasu: po 5 sekundach, 10 s, 15 s, 30 s, 3 minutach, 10 min, 30 min, 3 godzinach, 6 h, 24 h, 3 dniach, 5 d i 7 d. Małe odstępy czasowe w początkowym okresie badania

ustalono z przyczyny znacznego absorbowania wody przez materiał bezpośrednio po zanurzeniu go w wodzie.

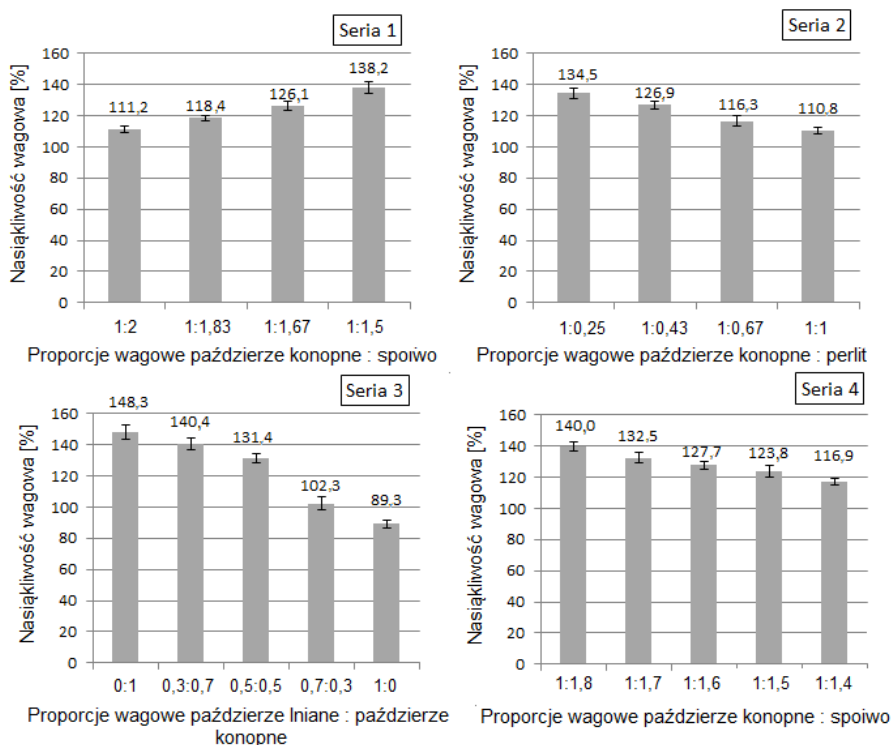
Nasiąkliwość wagową obliczono z poniższego wzoru (10):

$$n_w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdzie: n_w – nasiąkliwość wagowa [%], m_w – masa próbki nasyconej wodą [g], m_s – masa próbki wysuszonej do stałej masy [g].

Wyniki i dyskusja

Na wykresach 12.14 przedstawiono uśrednione wyniki nasiąkliwości wagowej wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.



Rys. 12.14. Nasiąkliwość wagowa kompozytów z poszczególnych Serii

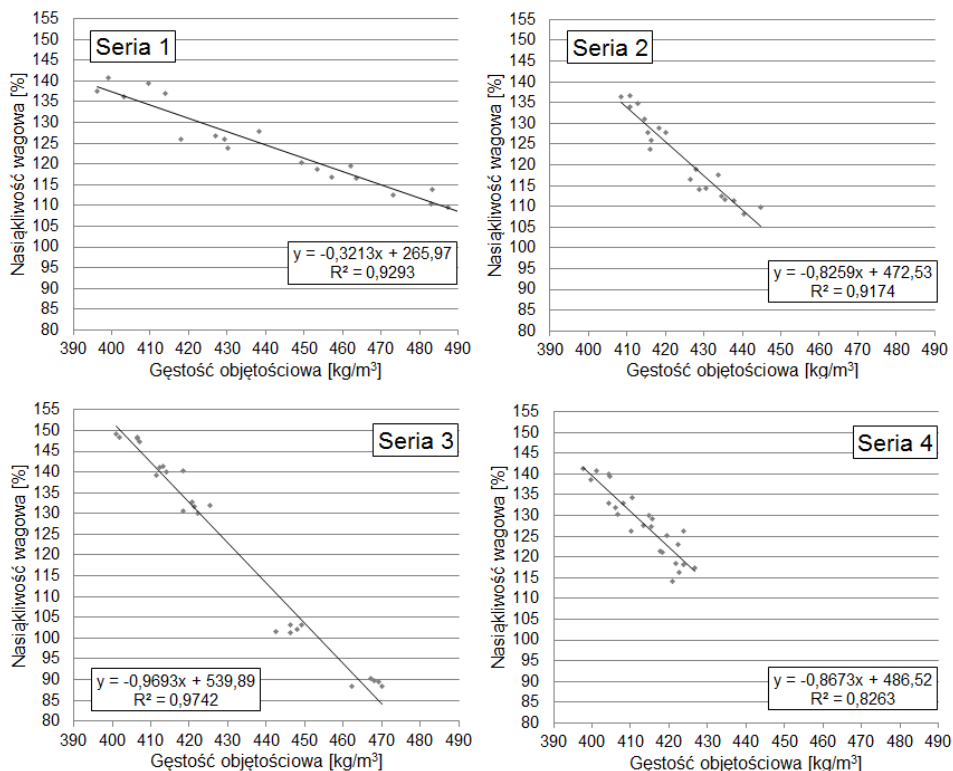
Badane kompozyty charakteryzują się nasiąkliwością wagową w zakresie od 89,3% do 148,3%. We wszystkich Seriach zauważyć można zależność, że największą nasiąkliwość wykazują próbki zawierające największy udział procentowy paździerzy konopnych w składzie mieszanki. Zależność ta jest związana z hydrofilowym charakterem wypełniacza konopnego, który jest

w stanie wchłonąć wodę w ilości trzykrotnej masy własnej, co potwierdzają również raporty badań w literaturze (L. Arnaud i in. 2012).

Analizując wyniki uzyskane w *Serii 2*, zauważyć można spadek nasiąkliwości wagowej wraz ze wzrostem udziału perlitu ekspandowanego i spadkiem udziału paździerzki konopnych w składzie kompozytów. Próbkę zawierającą perlit w ilości 20% całkowitej masy wypełniacza charakteryzowały się nasiąkliwością równą 134,5%, natomiast te zawierające perlit w ilości 50% wykazały spadek nasiąkliwości do poziomu 110,8%. Podobne obserwacje odnaleźć można w literaturze (D. Barnat-Hunek i in. 2015), gdzie zwiększenie udziału procentowego perlitu ekspandowanego względem całkowitej masy wypełniacza (perlit + paździerzka) z 33% do 71%, pozwoliło zredukować nasiąkliwość wagową kompozytu o 52%. Perlit ekspandowany charakteryzuje się wysoką porowatością całkowitą, z czego dużą część stanowią pory zamknięte, ograniczające nasiąkliwość (przynajmniej tę początkową), co zostało potwierdzone przedstawionymi wynikami badań (Rys. 12.14, Rys. 12.16).

Nasiąkliwość zależy ściśle od gęstości materiału, która z kolei powiązana jest z proporcją spoiwa do paździerzki, a także ich frakcji. Na rysunku 12.15 przedstawiono zależność nasiąkliwości wagowej od gęstości objętościowej kompozytów. Najbardziej precyzyjna zależność została uzyskana dla *Serii 3* – współczynnik determinacji wyniósł 0,974. Największy rozrzut wyników, świadczący o mniejszej zależności tych dwóch właściwości, przy zastosowaniu proporcji i składników kompozytów, wystąpił w *Serii 4* – współczynnik determinacji wyniósł 0,826.

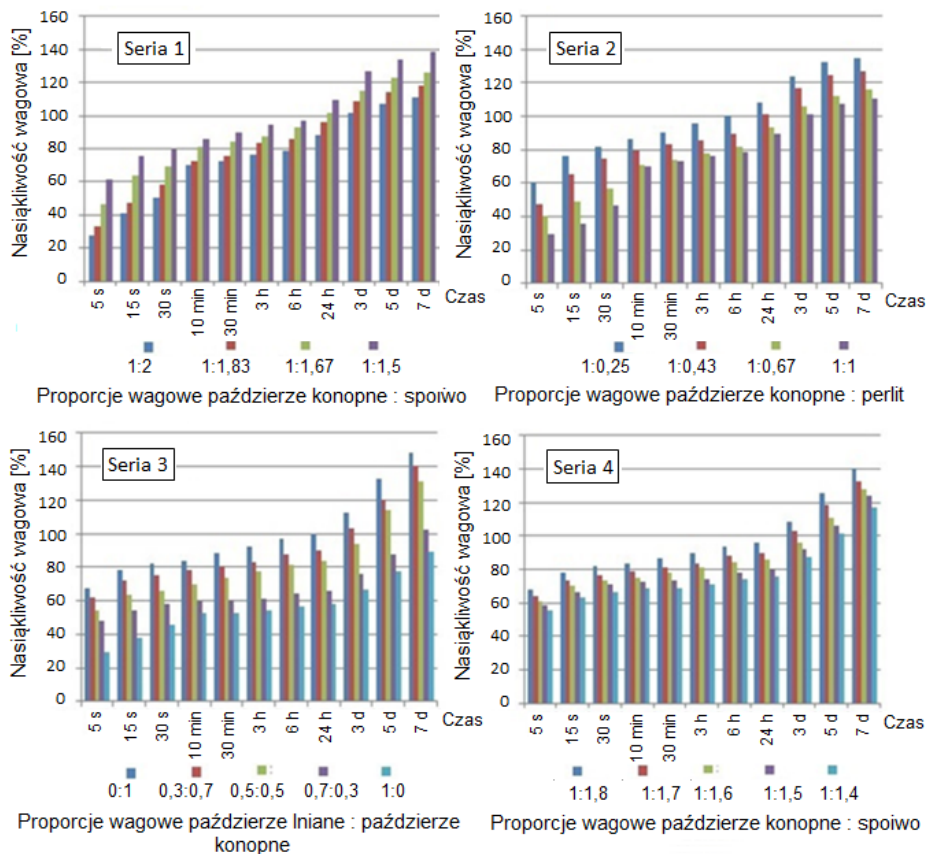
W *Serii 3* nastąpiła redukcja nasiąkliwości wagowej wraz ze wzrostem zawartości paździerzki lnianych, który to również przyczynił się zwiększenia gęstości objętościowej kompozytów. Związane jest to z wypełnieniem wolnych przestrzeni pomiędzy dłuższymi paździerzami konopnymi, w których mogłyby się gromadzić woda. W *Serii 1* i *4* wzrost gęstości spowodowany był zwiększaniem ilości spoiwa. Ilość wypełniaczy (paździerzki konopnych) pozostawała bez zmian. Im większa ilość spoiwa tym powierzchnia paździerzki była bardziej uszczelniona, przez co ograniczone zostało wchłanianie przez nie wody.



Rys.12.15. Zależności nasiąkliwości wagowej od gęstości objętościowej kompozytów z poszczególnych Serii

Nadezda Stevulova wykazała (N. Stevulova i in. 2013), że możliwe jest ograniczenie nasiąkliwości do około 25%, jednak wynik ten uzyskano badając kompozyt o gęstości objętościowej 1070 kg/m³, frakcji paździerzy 4–8 mm oraz składzie objętościowym paździerze: spoiwo: woda – 40: 29: 31%. Enrico Sassoni z kolei w badaniach (E. Sassoni i in. 2014) zastosował przedział gęstości kompozytów od 300 do 1300 kg/m³. Po 24 godzinach nasączenia, próbki o gęstości 300 kg/m³ wykazały nasiąkliwość 118,4%, natomiast kompozyt o gęstości największej – 1300 kg/m³ wykazał nasiąkliwość znacznie mniejszą, równą 10,1%. W innych badaniach również wykazano znaczący wzrost nasiąkliwości wraz ze zwiększaniem udziału paździerzy konopnych w składzie kompozytu (D. Barnat-Hunek i in. 2015). Przy wagowym udziale paździerzy do spoiwa, równym 60% (gęstość 265,8 kg/m³) kompozyt charakteryzował się nasiąkliwością wagową 150,5 %, natomiast przy zmniejszeniu udziału paździerzy do 20% (gęstość 461,2 kg/m³), nasiąkliwość wagowa spadła do 98,5%.

Na wykresach 12.16 przedstawiono nasiąkliwość wagową kompozytów w różnych przedziałach czasowych. Osiągnięcie całkowitego stanu nasycenia kompozytów trwało 7 dni.



Rys. 12.16. Nasiąkliwość wagowa kompozytów w poszczególnych *Seriach* w czasie

Największy przyrost wchłaniania wody można zauważyć w pierwszych sekundach po zatopieniu kompozytu w wodzie. Po pierwszych 5 sekundach, badana nasiąkliwość wyniosła od ok. 28% do 68%, co stanowiło od 25% do 48% ilości wody, którą kompozyty wchłonęły podczas całego okresu badania. Kolejny odczyt dokonany był po 15 sekundach zanurzenia w wodzie. Dynamika wzrostu nasiąkliwości uległa zmniejszeniu – względem odczytu po 5 sekundach, nasiąkliwość wzrosła o około 8–17%. Kolejne 15 sekund nasączenia próbek skutkowało wzrostem nasiąkliwości o około 2,5–11%, co świadczy o tym, że przyrost ilości wchłoniętej wody w kolejnych odstępach czasowych maleje. Na przykładzie *Serii 2* stwierdzić można, że obecność perlitu ogranicza wczesną nasiąkliwość. Kompozyt zawierający 40% perlitu względem całkowitej masy wypełniaczy wykazał nasiąkliwość po 5 sekundach od zanurzenia w wodzie około 29%, porównywalną do kompozytu z *Serii 1*, który jednak zawierał większą ilość spoiwa (większą gęstość), co pogarszało inne właściwości – np. izolacyjność termiczną.

Ważna jest, więc ochrona przegród wykonanych z kompozytu wapienno-konopnego, choćby przed krótkotrwałym kontaktem z wodą. Okładziny, tynki zewnętrzne lub odpowiednio wysunięty okap mogą być ochroną przed wodą opadową.

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4*, analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na nasiąkliwość wagową, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na nasiąkliwość wagową, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na nasiąkliwość wagową.

Test ANOVA wykazał, że we wszystkich czterech grupach (*Seria 1–4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F we wszystkich *Seriach* wyniosła więcej niż 1, natomiast wartość $p < 0,05$. Najniższą wartość p uzyskano w *Serii 3* ($p \approx 0$), co świadczy o największym zróżnicowaniu wyników wewnątrzgrupowych, natomiast w pozostałych *Seriach* wartości p były również bardzo niskie (p w zakresie od $3,6E-13$ do $1,4E-11$).

Analiza statystyczna (test Tukeya) uzyskanych wyników nasiąkliwości wagowej kompozytów wykazała, że porównując średnie wartości nasiąkliwości poszczególnych par receptur w obrębie każdej z *Serii* uzyskano istotne statystycznie różnice ($p < 0,05$), co świadczy o możliwości wpływania w sposób istotny na nasiąkliwość wagową modyfikując składy mieszanek.

12.6. Podciąganie kapilarne

Opis badania

Na wybranych recepturach przeprowadzono badanie podciągania kapilarnego metodą reflektometryczną TDR (*Time Domain Reflectometry*). Metoda polega na pomiarze czasu propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu, jakim jest pręt pomiarowy umieszczony w mierzonym ośrodku. Zmierzony przez miernik TDR czas propagacji zależy od szybkości propagacji impulsu, a ta z kolei od właściwości elektrycznych otoczenia – przenikalności dielektrycznej ośrodka. Przenikalność dielektryczna zależy od udziałów poszczególnych faz tworzących badany ośrodek, przy czym dominującym czynnikiem jest tutaj woda, której przenikalność dielektryczna jest znacznie większa od przenikalności fazy stałej oraz powietrznej. W związku z powyższym nawet jej niewielkie ilości w materiale zwiększają czas przelotu impulsu w czujniku otoczonym wilgotnym ośrodkiem. Metodą tą badano podciąganie kapilarne m.in. w betonie komórkowym (Z. Pavlik i in. 2006, Z. Suchorab i in. 2017) lub w cegle ceramicznej (Z. Suchorab i in. 2009).

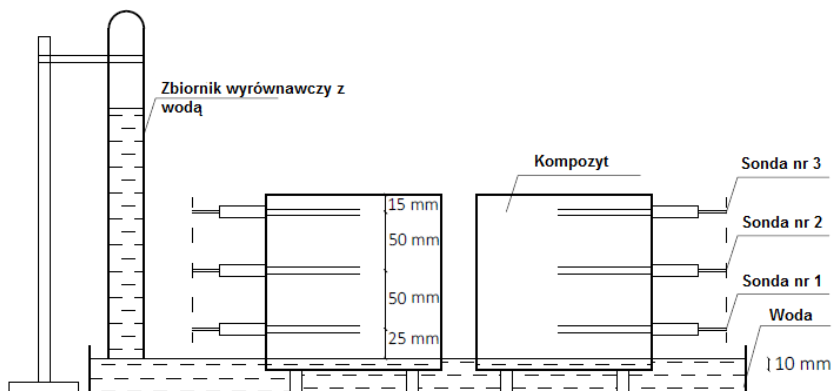
Na potrzeby eksperymentu przygotowano stanowisko badawcze, składające się z następujących elementów:

- zestaw sond TDR do określenia zawartości wody (FP/mts, EasyTest)
- miernik TDR z multiplekserem (LOM, EasyTest) (Rys. 12.17)
- komputer do obsługi miernika oraz do zapisu i odczytywania danych (Rys. 12.17)
- oprogramowanie do konfiguracji miernika oraz obróbki danych
- suszarka (Memmert VO-500)
- kuweta na wodę
- szklana tuba do utrzymywania stałego poziomu wody
- próbki kompozytu o wymiarach 150×150×150 mm.



Rys. 12.17. Zestaw pomiarowy TDR: komputer oraz miernik [P. Brzyski]

Badanie trwało 44 doby. Do badania wykorzystano kompozyt w formie sześcianu o wymiarach 150×150×150 mm. Badanie przeprowadzono na 3 próbkach z każdej z wybranych receptur. W każdej próbce zostały umieszczone 3 sondy TDR w jednej linii, na różnych wysokościach (25; 75; 125 mm ponad zwierciadłem wody), tak jak pokazano na rysunkach (Rys. 12.18–12.19). Ustalono zapis wyników z częstotliwością czterech zapisów na godzinę. Próbki zostały umieszczone w wodzie na głębokości 10 mm, a ich powierzchnie, nie mające kontaktu z wodą owinięto folią, w celu uniemożliwienia odparowywania wody podciągniętej kapilarnie. W celu utrzymania jednakowego zwierciadła wody w całym okresie badania, zamontowano szklaną tubę wypełnioną wodą, na styku ze zwierciadłem wody.



Rys.12.18. Schemat stanowiska badawczego podciągania kapilarnego metodą TDR [P. Brzyski]



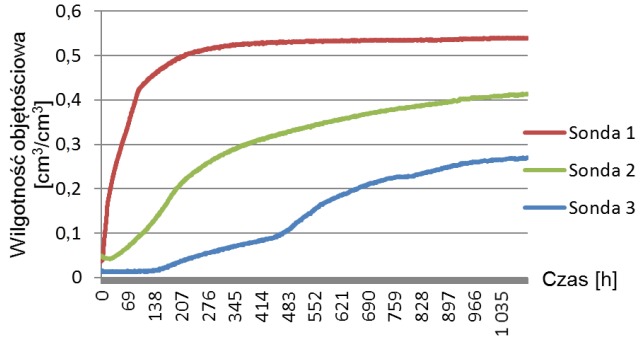
Rys. 12.19. Stanowisko badawcze testu podciągania kapilarnego metodą TDR [P. Brzyski]

Próbki zostały umieszczone na dystansach w takim kierunku, w jakim były zagęszczane, a więc ich ustawienie symulowało ścianę wykonaną z kompozytu układanego w deskowaniu ściennym, narażoną na kapilarne podciąganie wody z gruntu o wysokim poziomie wody gruntowej. Pomiar wykonywany był w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej powietrza $55 \pm 5\%$.

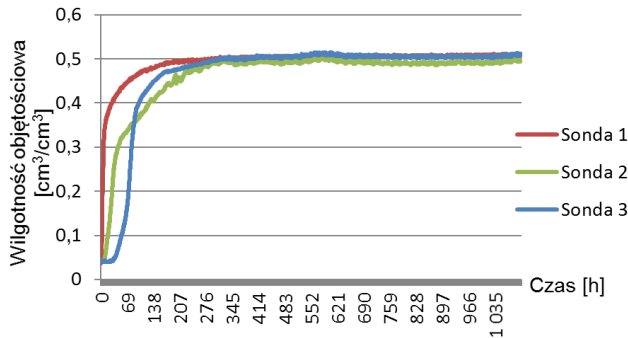
Do badań wybrano 2 receptury z *Serii 1* zawierające skrajne proporcje wagowe spoiwa do wypełniacza, czyli 2:1 (S1.1) oraz 1.5:1 (S1.4). Dodatkowo sprawdzono jedną recepturę z *Serii 2* celem weryfikacji wpływu obecności perlitu na podciąganie kapilarne. Wybrano próbkę zawierającą wagowo 40% perlitu ekspandowanego względem sumarycznej masy wypełniacza (próbka S2.3).

Wyniki i dyskusja

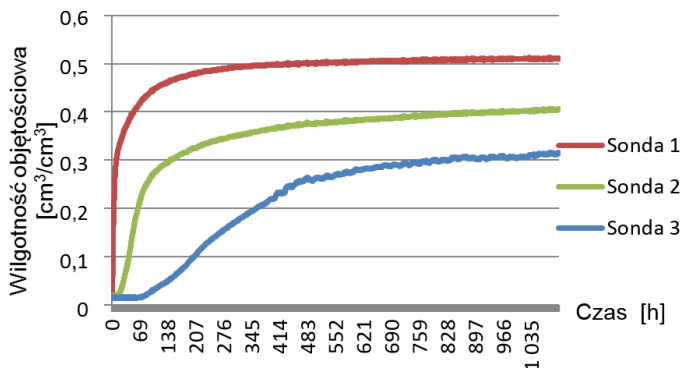
Na wykresach 12.20–12.22 przedstawiono wartości średnie zmian wilgotności objętościowej w wybranych kompozytach wapienno-konopnych w całym okresie trwania badania podciągania kapilarnego metodą TDR.



Rys.12.20. Zmiany wilgotności objętościowej próbek z Serii 1 (S1.1) w czasie



Rys. 12.21. Zmiany wilgotności objętościowej próbek z Serii 1 (S1.4) w czasie



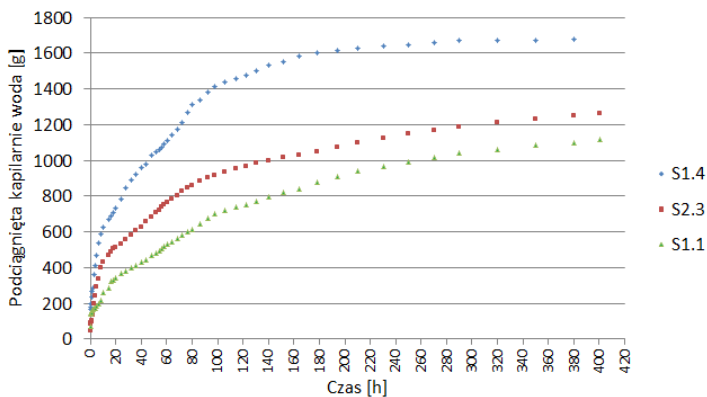
Rys. 12.22. Zmiany wilgotności objętościowej próbek z Serii 2 (S2.3) w czasie

Maksymalna wilgotność objętościowa w próbce z *Serii 1*, zawierającej proporcję wagową spoiwa do paździerzy 2:1 (gęstość objętościowa $483,5 \text{ kg/m}^3$) wyniosła 54%. W strefie zasięgu sondy nr 2, umieszczonej na wysokości 75 mm ponad zwierciadłem wody wilgotność wynosiła 41,4%, natomiast w strefie zasięgu sondy nr 3, która znajdowała się na wysokości 125 mm ponad lustrem wody, wynosiła ona 27,1%. Dynamika podciągania kapilarnego w tej próbce okazała się najmniejsza. Wilgotność materiału w obszarze sondy nr 2 oraz 3 ustabilizowała się w okolicy 40-go dnia badania. W recepturze, w której została wykonana próbka S1.1 została wykorzystana największa ilość spoiwa, co przyczyniło się do ograniczenia dynamiki podciągania (również nasiąkliwości masowej, opisanej wcześniej), a także do spadku intensywności podciągania na różnych poziomach – wilgotność w dolnej części próbki, po zakończeniu badania była dwukrotnie większa w porównaniu z wilgotnością w górnej części próbki.

Maksymalna wilgotność objętościowa w próbce z *Serii 1*, zawierającej proporcję wagową spoiwa do paździerzy 1.5:1 (gęstość objętościowa $404,8 \text{ kg/m}^3$) wyniosła 51%. W strefie zasięgu sondy nr 2, wilgotność wynosiła 49,7%, natomiast w strefie zasięgu sondy nr 3, wynosiła ona 51,1%. W przypadku tej receptury wilgotność w całej próbce ustabilizowała się już po 10 dniach badania, osiągając porównywalną wilgotność w obszarach zasięgu każdej z sond. Pomimo tego, że próbka zawierała mniejszą ilość spoiwa i wykazywała większą nasiąkliwość wagową w porównaniu z próbką S1.1, wykazano, że wilgotność objętościowa jest mniejsza. Na fakt ten wpływ może mieć większa zawartość porów, a także ich większy rozmiar, z uwagi na mniejszą zawartość spoiwa. Woda podciągana kapilarnie powleka ścianki porów, natomiast nie wypełnia ich całkowicie.

Maksymalna wilgotność objętościowa w próbce z *Serii 2*, zawierającej proporcję wagową spoiwa do paździerzy 1.5:1 oraz zawartość paździerzy konopnych 60% i perlitu ekspandowanego 40% wagowo względem całkowitej ilości wypełniacza (gęstość objętościowa $429,5 \text{ kg/m}^3$) wyniosła 49,5%. W strefie zasięgu sondy nr 2, wilgotność wynosiła 37,9%, natomiast w strefie zasięgu sondy nr 3, wynosiła ona 28,4%. Porównując wyniki z próbką S1.4 (taka sama proporcja spoiwa do wypełniacza) obecność perlitu ekspandowanego spowolniła przyrost podciągania kapilarnego. Dynamiczny przyrost zauważyć można jedynie w obszarze sondy nr 1, czyli w najniższej części próbki, mającej bezpośredni kontakt z wodą. Wilgotność objętościowa próbki w obszarze sondy nr 2 oraz 3 została ustabilizowana dopiero w okolicy 35-tego dnia badania. Perlit ekspandowany zredukował porowatość całkowitą kompozytu, a jednocześnie z uwagi na zamknięte pory perlitu, chociaż nie zostało to w pracy przebadane, to spodziewać się można, że zredukowana została porowatość otwarta kompozytu, która w dużym stopniu wpływa na zdolność pochłaniania wody przez materiał.

Na rysunku 12.23 przedstawiono wykres obrazujący masę wody, która została podciągnięta kapilarnie w kolejnych odstępach czasu.



Rys. 12.23. Masa wody podciągniętej kapilarnie w odstępach czasowych

Zauważyć można, że obecność perlitu znacząco obniżyła zdolność kompozytu do podciągania kapilarnego. Próbki S1.4 oraz S2.3 zawierały jednakową proporcję wagową spoiwa do wypełniacza (1.5:1). Jednak większy wpływ na ilość wchłoniętej wody miał udział spoiwa w kompozycie. Receptura S1.1 zawierała proporcję spoiwa do wypełniacza 2:1. Większa ilość spoiwa zadecydowała o skuteczniejszym uszczelnieniu porów paździerzy konopnych. Ciekawą obserwacją jest to, że próbka, która podciągnęła największą ilość wody, wykazała mniejszą wilgotność objętościową w porównaniu z próbką S1.1, która podciągnęła około 600 g mniej wody. Związane może być to z mniejszą ilością spoiwa zawartą w tej pierwszej próbce, co skutkowało większą porowatością – woda została skumulowana na ściankach porów w całej próbce (o czym świadczy odczyt z sond), pozostawiając pory częściowo niewypełnione wodą, przez co zajęła ona mniejszą część objętości próbki w porównaniu z S1.1, zawierającą większy udział spoiwa. W przypadku próbki zawierającej największy udział wagi paździerzy (S1.4) dynamika podciągania kapilarnego była największa. Podciąganie ustabilizowało się w okolicach 180-tej godziny – wtedy to przyrost masy wody zaczął być nieznaczny. Natomiast w przypadku pozostałych próbek przyrost masy wody postępował przez cały okres badania, trwający 400 godzin (po 300-stu godzinach badania przyrost masy był niewielki).

Walker i Pavia (R. Walker i in. 2014c) badali zdolność podciągania kapilarnego wody kompozytu wapienno-konopnego w różnych recepturach różniących się spoiwem, przy stosunku wagowym spoiwa do wypełniacza 2:1. Badanie polegało na umieszczeniu próbek w wodzie, zanurzając je do wysokości 10 mm. W określonych odstępach czasu został odczytywany przyrost masy próbek, świadczący o ilości wchłoniętej wody. Współczynnik podciągania kapilarnego mieścił się w przedziale od 2,65 do 3,37 kg/m²h^{1/2} przez pierwsze 24 godziny od zanurzenia. Autorzy stwierdzili, że rodzaj spoiwa nie odgrywa znaczącej roli w wynikach, dlatego w niniejszych badaniach zdecydowano się na wykorzystanie jednego rodzaju spoiwa. Helena Paiva i wsp. (H. Paiva i in. 2009)

stwierdzili, że dodatek metylocelulozy do spoiwa wpływa na ograniczenie podciągania kapilarnego, gdyż powoduje ona powstanie małych porów w spoiwie, które odcinają drogę kapilarnego podciągania.

Badanie podciągania kapilarnego na kompozycie wapienno-konopnym przeprowadził również tą samą metodą P. B. de Bruijn i wsp. (P.B. de Bruijn i in. 2009). Badaniu poddał kompozyty różniące się konfiguracją spoiwa (wapno hydratyzowane, hydrauliczne, cement portlandzki) oraz wagowym stosunkiem paździerzy do spoiwa (od 0,22 do 0,33). Autorzy nie zauważyli istotnych różnic w zachowaniu materiału pomiędzy wszystkimi recepturami. Średni współczynnik podciągania kapilarnego wyniósł $9 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ($0,15 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$).

12.7. Współczynnik przepuszczalności pary wodnej

Opis badania

Przepuszczalność pary wodnej charakteryzuje zdolność materiału do transportu pary wodnej pod ciśnieniem pary, kiedy osiągnięty zostanie stan równowagi. Transport wilgoci zachodzi przez materiały porowate, gdy istnieje różnica ciśnienia par pomiędzy dwoma przeciwległymi powierzchniami. Właściwość ta może być określana za pomocą metody mokrego lub suchego kubka (*wet-cup* lub *dry-cup*).

Pomiar współczynnika paroprzepuszczalności kompozytu wapienno-konopnego wykonano zgodnie z normą PN-EN 12086:2013 w warunkach izotermicznych, umieszczając badaną próbkę między dwoma różnymi środowiskami, różniącymi się wilgotnością względną otaczającego powietrza. Jednym z nich było powietrze w komorze klimatycznej o wilgotności względnej 50% i temperaturze 22 °C. Drugim środowiskiem było powietrze wewnątrz naczynia, w którym znajdował się żel krzemionkowy, który pozwolił uzyskać wilgotność względną 0%. Żel krzemionkowy stosował również M. Rahim w badaniach nad kompozytem wapienno-konopnym (M. Rahim i in. 2015), natomiast R. Walker (R. Walker i in. 2014c) stosowała chlorek wapnia, który pozwala na uzyskanie podobnej wilgotności względnej powietrza (0–2%). Naczynie zostało nakryte badaną próbką i obwodowo uszczelnione. Poprzez ważenie naczynia w określonych odstępach czasu ustalono przyrost masy substancji higroskopijnej. Przedstawiona metodyka badania jest opisana także przez M. Rahim i wsp. (M. Rahim i in. 2016) oraz F. Collet i wsp. (F. Collet i in. 2013). Wyznaczając współczynnik paroprzepuszczalności δ oparto się na prawie Ficka, wg wzorów (11–12):

$$\delta = g_g \cdot \frac{e}{\Delta P_g} \text{ [kg/(m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa)}] \quad (11)$$

$$g_g = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta T} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (12)$$

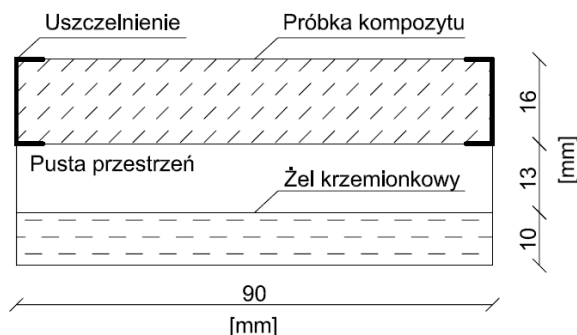
gdzie: e – grubość próbki [m]; g_g – gęstość strumienia wilgoci [kg/(m²·s)]; ΔP_g – gradient ciśnienia pary wodnej [Pa]; A – pole powierzchni próbki [m²]; ΔT – zmiana temperatury [°C]; Δm – zmiana masy [kg].

Na podstawie współczynnika δ określono współczynnik oporu dyfuzyjnego μ , który określa ile razy opór stawiany przez kompozyt przepływowi pary wodnej jest większy od oporu powietrza, co wyrażono bezwymiarową zależnością (13):

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta} \quad (13)$$

gdzie: δ_0 – opór powietrza, równy $2 \cdot 10^{-10}$ kg/(m·s·Pa).

Na rysunku 12.24 przedstawiono schemat naczynia do badania przepuszczalności pary wodnej metodą suchego kubka (*dry cup*), które wykorzystano w badaniach. Metodą *dry-cup*, badania przeprowadził również M. Rahim (M. Rahim i in. 2015; M. Rahim i in. 2016). Testom poddał kompozyt wapienno-konopny, wapienno-słomiany oraz wapienno-lniany.



Rys. 12.24. Schemat naczynia do wyznaczenia współczynnika przepuszczalności pary wodnej [P. Brzyski]

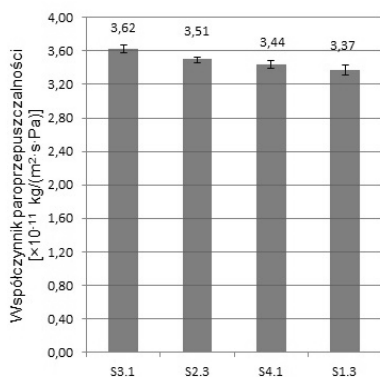
Przebadano cztery receptury, po jednej z każdej z badanych serii. Wybrano próbki charakteryzujące się współczynnikiem przewodności cieplnej w zakresie od 0,082 do 0,100 W/(m·K) – receptury te wykorzystano do analizy przegród w dalszej części pracy. W tabeli 12.1 przedstawiono wybrane w opisywanym badaniu receptury wraz z uzyskaną gęstością objętościową oraz współczynnikiem przewodności cieplnej. Receptury posortowano wg wartości współczynnika przewodności cieplnej.

Tabela 12.1. Receptury wybrane do badania paroprzepuszczalności

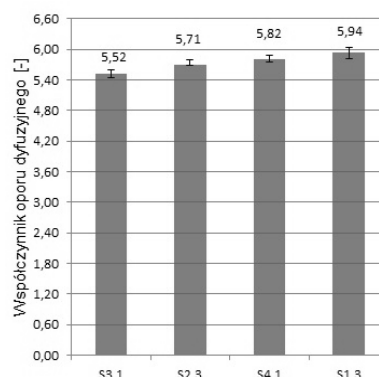
Oznaczenie receptury	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]
S3.1	404,6	0,082
S2.3	429,5	0,088
S4.1	423,1	0,094
S1.3	428,6	0,100

Wyniki i dyskusja

Na wykresie 12.25 przedstawiono wyniki badania współczynnika przepuszczalności pary wodnej wybranych kompozytów, natomiast na wykresie 12.26 przedstawiono współczynniki oporu dyfuzyjnego. Słupki błędów na wykresach oznaczają przedział ufności dla średniej arytmetycznej, obliczony na podstawie odchylenia standardowego z próby.



Rys. 12.25. Współczynnik przepuszczalności pary wodnej badanych kompozytów



Rys. 12.26. Współczynnik oporu dyfuzyjnego badanych kompozytów

Przepuszczalność pary wodnej kompozytu wapienno-konopnego jest zależna od rodzaju użytego spoiwa. Im mniej materiału hydraulicznego zostanie wykorzystane w spoiwie, tym mniejszy będzie współczynnik oporu dyfuzyjnego (A. Tran Le 2011; A. Grelat 2005). Z kolei R. Walker (R. Walker i in. 2014c) na podstawie swoich badań nad kompozytem wapienno-konopnym z wykorzystaniem różnych składników spoiwa (wapno hydratyzowane, cement, wapno hydrauliczne, granulowany żużel wielkopieczowy oraz metakaolin) stwierdziła, że nie ma istotnej różnicy we współczynniku oporu dyfuzyjnego w zależności od rodzaju spoiwa (w przybliżeniu $\mu \approx 5,5$) oraz, że większy wpływ na wartość paroprzepuszczalności mają makropory pomiędzy paździerzami konopnymi niż mikropory w strukturze spoiwa.

Zgodnie z wynikami paroprzepuszczalności, przedstawionymi na wykresach 12.25 i 12.26, stwierdzić można, że na wielkość współczynnika δ (lub μ) wpływ

ma zarówno rodzaj spoiwa, rodzaj wypełniacza, jaki i proporcja wypełniacza do spoiwa. Pomimo zbliżonych gęstości objętościowych badanych kompozytów, różnica pomiędzy największą wartością μ a najniższą wynosi 18%. Najniższą wartością μ charakteryzuje się kompozyt S3.1 z *Serii 3*, która zawierała receptury opierające się na paździerzach konopnych *KI* oraz spoiwie zawierającym wapno z dodatkiem cementu i gliny. Receptura S3.1 zawierała największą zawartość paździerzy konopnych, spośród wszystkich receptur, a w związku z tym charakteryzowała się najniższą gęstością. Paździerz, z uwagi na wysoką porowatość charakteryzują się niskim oporem dyfuzyjnym, zapewniając swobodny przepływ pary wodnej. Im większa zawartość paździerzy, tym większa porowatość związana z porami powstałymi pomiędzy losowo ułożonymi paździerzami w czasie układania i zagęszczania mieszanki. Najwyższą wartość posiada z kolei kompozyt S1.3 z receptury z *Serii 1*. Receptury z tej *Serii* zawierały największą ilość spoiwa (wapno, cement, metakaolinit) w całkowitym zestawieniu składników, a także wykazywały największą gęstość. Walker (R. Walker i in. 2014c) badała kompozyt wapienno-konopny o zbliżonych gęstościach objętościowych ($508 \text{ kg/m}^3 - 627 \text{ kg/m}^3$), uzyskując podobne wielkości współczynników oporu dyfuzyjnego, w granicach 5,42–5,72. Z kolei Rahim i wsp. (M. Rahim i in. 2015) w swoich badaniach uzyskali większy współczynnik oporu dyfuzyjnego dla kompozytu wapienno-konopnego o gęstości 478 kg/m^3 , w przedziale 8,98 do 10,58. Ciekawe wyniki, zależne od warunków wilgotnościowych uzyskała Florence Collet – kompozyt o gęstości 430 kg/m^3 charakteryzował się oporem dyfuzyjnym od 3,23 do 11,76 odpowiednio w stanie 100% wilgotności względnej i w stanie suchym (F. Collet i in. 2013).

Próbki w zależności od składu mogą wymagać zróżnicowanego okresu czasu, w którym osiągną stan równowagi. Walker przechowywała próbki w komorze przed 9 tygodni, ważąc je co 1 tydzień. Zaobserwowała, że próbki osiągnęły stan równowagi już po 1 tygodniu (R. Walker i in. 2014c). W badaniach własnych próbki trzymano w komorze 6 tygodni, a próbki osiągnęły stan równowagi również po czasie około 5 dni, a maksymalnie po 7 dniach. Krótszy czas w porównaniu z przytoczoną literaturą może wynikać z faktu, że Walker badała próbki o większym zagęszczeniu, co mogło spowolnić dyfuzję pary wodnej.

Analiza statystyczna

Analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ konkretnych receptur, uporządkowanych według wartości λ (od najmniejszej wartości do największej) na wartość współczynnika oporu dyfuzyjnego.

Test ANOVA wykazał, że przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F wyniosła 41,1, natomiast wartości $p < 0,05$, a dokładnie $9,5E-08$, co świadczy o występowaniu istotnych różnic pomiędzy średnimi wynikami.

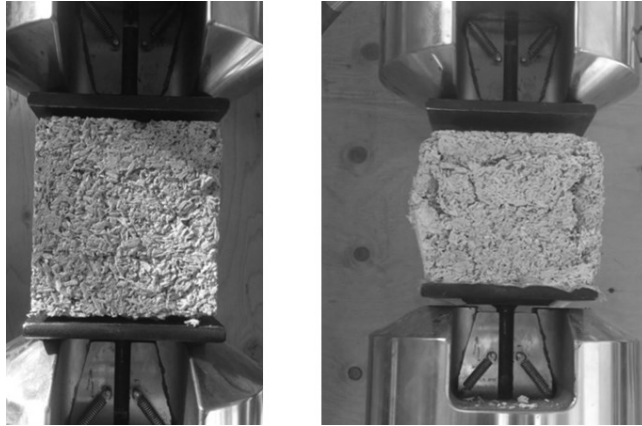
Test statystyczny (test Tukeya) wykazał, że porównując jedynie kompozyty S2.3 i S4.1, o wartościach lambda odpowiednio 0,088 W/(m·K) i 0,094 W/(m·K) uzyskano nieistotną statystycznie różnicę pomiędzy średnimi wynikami oporu dyfuzyjnego ($p = 0,059$). Porównując pozostałe pary uzyskano istotne statystycznie różnice pomiędzy średnimi wynikami μ ($p < 0,05$).

12.8. Wytrzymałość na ściskanie

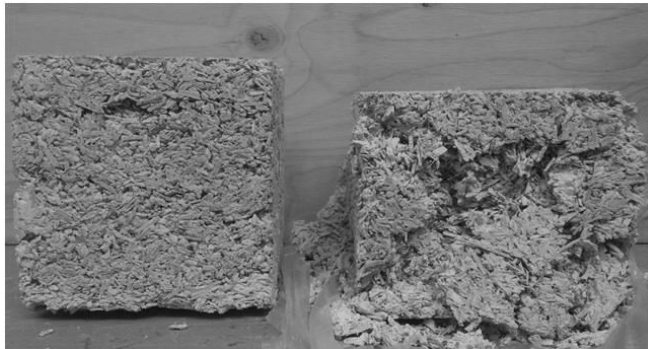
Opis badania

Z uwagi na brak norm dotyczących badań kompozytów wapienno-konopnych, w publikacjach spotkać się można z różnymi przyjętymi założeniami. R. Walker i wsp. (R. Walker i in. 2014b) kierowali się normą dotyczącą badań wapna budowlanego PN-EN 459-2, przyjmując najniższy dopuszczalny przyrost siły ściskającej 50 N/s. Próbki natomiast przyjęto jako kostki o wymiarach 100×100×100 mm. L. Arnaud z kolei przyjął prędkość przemieszczenia głowicy ściskającej równą 0,2 mm/min (L. Arnaud i in. 2012). Geometria próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym wpływa na zachowanie się próbek w czasie badania, jednak zarówno kostki jak i walce osiągają podobną wytrzymałość końcową (P. Glouannec i in. 2011).

W badaniach własnych, wytrzymałość na ściskanie kompozytów określono po 28 dniach dojrzewania na próbkach sześciennych o wymiarach 150×150×150 mm, przy pomocy hydraulicznej prasy MTS 810 o zakresie obciążenia 0–250 kN. W badaniach zadano przemieszczenie głowicy w prasie o wartości 3 mm/min. P.B. de Bruijn stosował większe przemieszczenie głowicy prasy ściskającej, równe 5 mm/min (P.B. de Bruijn i in. 2009). E. Sassoni podobnie, lecz w zależności od rodzaju próbki zadawał przemieszczenie głowicy równe 3 mm/min lub 5 mm/min (E. Sassoni i in. 2014). Podczas badania mierzono aktualną siłę ściskającą oraz przemieszczenia głowicy ściskającej. Jako wynik wytrzymałości przyjęto średnią wytrzymałość na ściskanie z 5 przebadanych próbek dla każdej receptury. Test ściskania zakończono przy przemieszczeniu głowicy równym 20 mm. W literaturze odnaleźć można opis testu ściskania, w którym zakończono próbę w momencie osiągnięcia przez głowicę przemieszczenia równego 20 mm (R. Bevan i in. 2008), a także 3 mm i 5 mm (E. Sassoni i in. 2014), jednak wartości te były ustalone dla mniejszych próbek, odpowiednio 100×100×100 mm oraz 50×50×30–50 mm. Próbkę obciążano w kierunku zgodnym z rzeczywistą pracą materiału w ścianie, czyli w kierunku układania i zagęszczania mieszanki. Na rysunku 12.27 przedstawiono próbkę umieszczoną w prasie przed i po zniszczeniu. Na rysunku 12.28 zestawiono próbkę zniszczoną obok próbki niezniszczonej, obrazując w ten sposób postać zniszczenia (przykładowa próbka z *Serii 4*).



Rys. 12.27. Próbkę kompozytu umieszczoną w uchwytach prasy ściskającej (po lewej) oraz postać zniszczenia próbki kompozytu w teście ściskania (po prawej) [P. Brzyski]



Rys. 12.28. Porównanie próbki przed i po wykonaniu badania wytrzymałości na ściskanie (przykładowa próbka z *Serii 4*) [P. Brzyski]

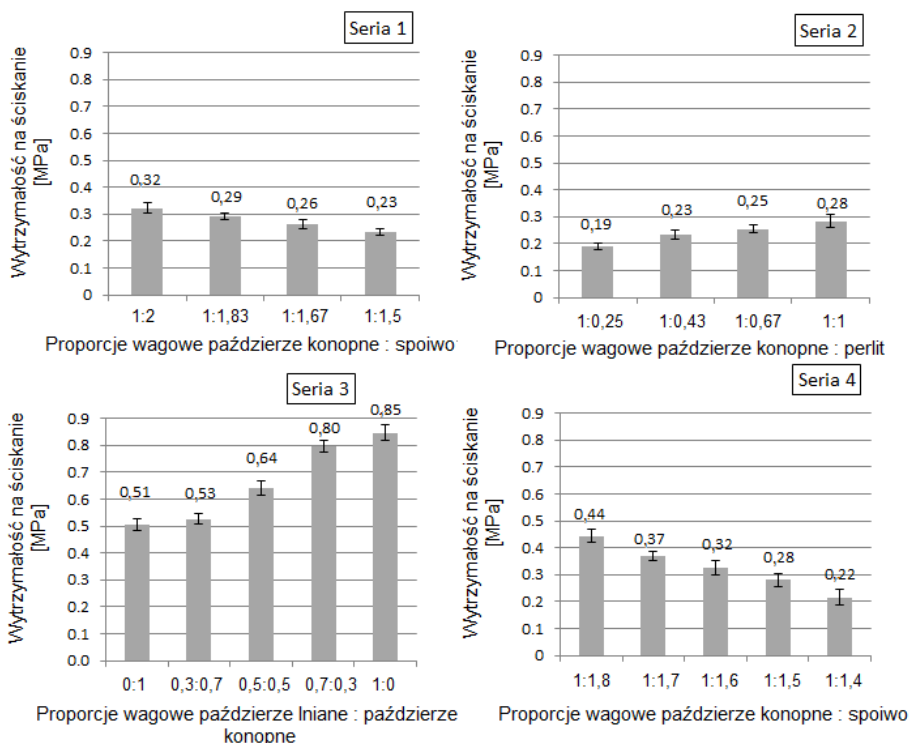
Wytrzymałość na ściskanie obliczono według wzoru (14):

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (14)$$

Gdzie: f_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa], F_c – maksymalne obciążenie przy niszczeniu (ściskanie) [N], A_c – pole przekroju poprzecznego próbki, na które działa siła ściskająca obliczane na podstawie wymiaru deklarowanego próbki [mm²].

Wyniki i dyskusja

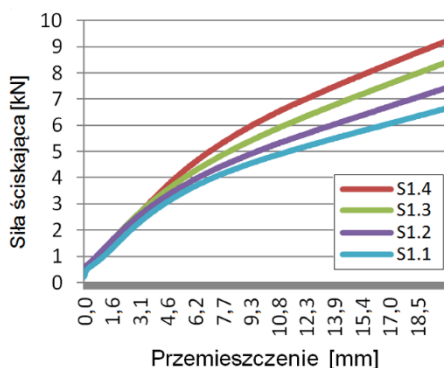
Na wykresach 12.29 przedstawiono uśrednione wyniki wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich badanych serii, wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.



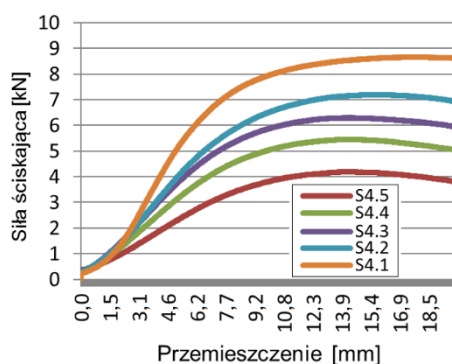
Rys. 12.29. Wytrzymałość na ściskanie kompozytów z poszczególnych *Serii*

Wraz ze wzrostem zawartości spoiwa (bez względu na rodzaj) w składzie kompozytu wzrasta jego wytrzymałość na ściskanie. Zależność ta widoczna jest na przykładzie *Serii 1* i *4*. Spoiwo w postaci wapna z dodatkiem gipsu i metakaolinitu, w połączeniu z paździerzami *K2* zdecydowało o uzyskaniu wyższej wytrzymałości w porównaniu z kompozytami wykonanymi wg receptur z *Serii 1*, gdzie zastosowano spoiwo w postaci wapna z dodatkiem cementu i metakaolinitu, w połączeniu z paździerzami *K1*. Efekt ten został uzyskany pomimo tego, że w *Serii 1* zastosowano większy udział spoiwa niż w *Serii 4* (odpowiednio 2:1 oraz 1,8:1 względem masy paździerzy). Paździerze *K1* charakteryzowały się większym zróżnicowaniem długości, przez co podczas zagęszczania, dłuższe paździerze powodowały utworzenie pustych przestrzeni, które mogły zdecydować o pogorszeniu właściwości mechanicznych. Wadę tą poprawiło częściowe zastąpienie paździerzy *K1* perlitem ekspandowanym. Wraz ze wzrostem zawartości tego kruszywa wytrzymałość na ściskanie wzrastała. Podobną obserwację zauważyć można analizując wyniki z *Serii 3*. Częściowe zastąpienie paździerzy *K1* paździerzami lnianymi spowodowało ograniczenie pustych przestrzeni oraz doprowadziło do wzrostu zapotrzebowania na spoiwo z uwagi na mniejszą frakcję paździerzy lnianych. W efekcie nastąpił wzrost wytrzymałości na ściskanie.

Na rysunkach 12.30 i 12.31 przedstawiono przykładowe postacie wykresów relacji siły ściskającej i przemieszczenia głowicy ściskającej, czyli ugięcia ściskanej próbki.



Rys. 12.30. Wykres siła-przemieszczenie na przykładzie receptur z *Serii 1*



Rys. 12.31. Wykres siła-przemieszczenie na przykładzie receptur z *Serii 4*

Analizując postacie wykresów obrazujących zależność siła-przemieszczenie głowicy zauważyć można różnice w zachowaniu próbek z *Serii 1-3* oraz z *Serii 4*. Na różnicę wpłynął rodzaj wykorzystanych paździerz konopnych.

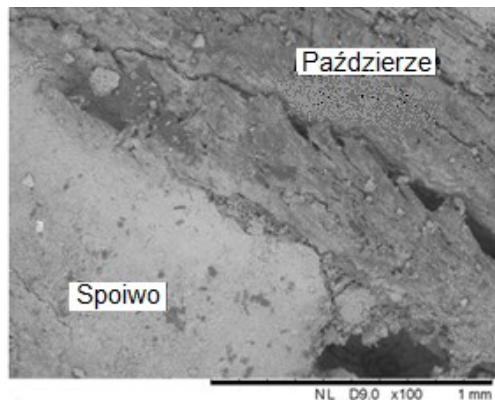
Analizując wykresy uzyskane w teście badania wytrzymałości na ściskanie próbek z receptur *Serii 1* oraz 2, stwierdzono że nie można jednoznacznie określić siły niszczącej próbkę, na podstawie której możliwe byłoby określenie wytrzymałości na ściskanie kompozytu. Postać wykresów we wszystkich badanych recepturach była specyficzna – podobną odnaleziono w literaturze (R. Bevan i in. 2008). W pierwszej fazie obciążania, materiał zachowywał się sprężysto, przyrost obciążenia był znaczny natomiast poziom odkształcenia niewielki. W tym etapie siły przejmowało głównie spoiwo. W drugiej fazie obciążania zauważyć można zmianę nachylenia wykresu. Następuje znaczny przyrost odkształcenia przy powolnym przyroście siły. W tej fazie, po zerwaniu siły wiązania spoiwa, paździerz konopne ulegają kompresji, likwidując w ten sposób technologiczne pory (przestrzeń powietrzna pomiędzy paździerzami). W ostatniej, trzeciej fazie, kiedy paździerz uległy kompresji następuje szybki przyrost obciążenia oraz dalszy przyrost odkształcenia. Dlatego też w przypadku kompozytów z *Serii 1* oraz 2 zdecydowano się na obliczenie wytrzymałości na ściskanie na podstawie wartości siły ściskającej przy przemieszczeniu głowicy 10 mm (wyniki dla takiego przemieszczenia przedstawiono na Rys. 12.29). Przy takim zakresie przemieszczenia, próbka wizualnie jeszcze nie była zniszczona, jednak spoiwo przestało pełnić swą funkcję, uległo rozkruszeniu, odspojeniu od paździerz. Test kontynuowano aż do osiągnięcia przemieszczenia 20 mm. Dalsze obserwacje wykresu miały na celu dokładne poznanie charakteru pracy kompozytu wapienno-konopnego pod wzrastającym obciążeniem.

W przypadku receptur z *Serii 4*, pierwsza faza wykresu przebiega prostoliniowo, świadczy to, że materiał zachowuje się sprężyste, główną rolę w tym momencie odgrywa spoiwo łączące nieskompresowane jeszcze paździerze. Kiedy spoiwo ulega zniszczeniu, następuje przyrost odkształceń przy ustabilizowanej wartości siły ściskającej. Po osiągnięciu maksymalnej siły (niszczącej), siła wiązania pomiędzy spoiwem na paździerzami ulega całkowitemu zniszczeniu. Próbką wtedy przestaje stawiać opór obciążeniu, a odkształcenia zauważalnie wzrastają. Postać wykresów pozwoliła na odczytanie siły niszczącej, na podstawie której obliczono wytrzymałość (Rys. 12.29).

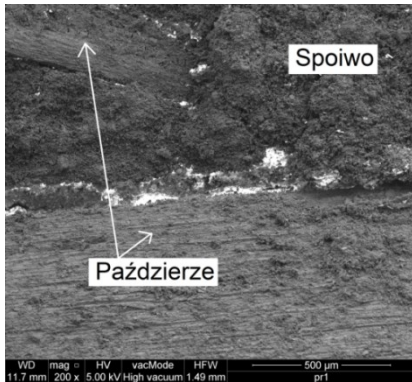
Na zachowanie kompozytów pod wpływem obciążenia wpływ ma również przyczepność spoiwa do paździerzy oraz strefa styku. Tak jak wspomniano, w trakcie pierwszej fazy obciążania próbek to właśnie spoiwo decyduje o wytrzymałości, natomiast po zerwaniu połączenia spoiwa z paździerzami następuje wyraźny wzrost odkształceń kompozytu. Na rysunkach został pokazany przekrój przez próbkę (Rys. 12.32), styk pomiędzy spoiwem a wypełniaczem (Rys. 12.33–12.37).



Rys. 12.32. Przekrój przez próbkę wapienno-konopną [P. Brzyski]



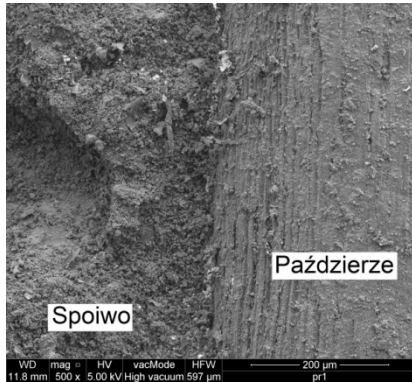
Rys. 12.33. Strefa styku pomiędzy spoiwem a wypełniaczem ($\times 100$) [P. Brzyski]



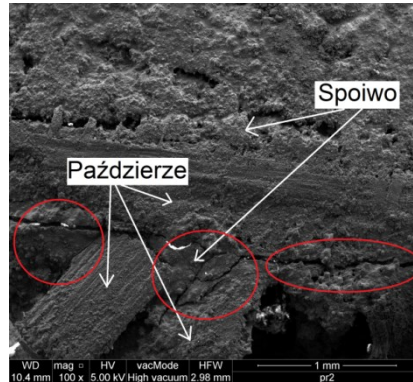
Rys. 12.34. Strefa styku pomiędzy spoiwem a wypełniaczem ($\times 200$) [P. Brzyski]



Rys. 12.35. Strefa styku pomiędzy spoiwem a wypełniaczem ($\times 800$) [P. Brzyski]



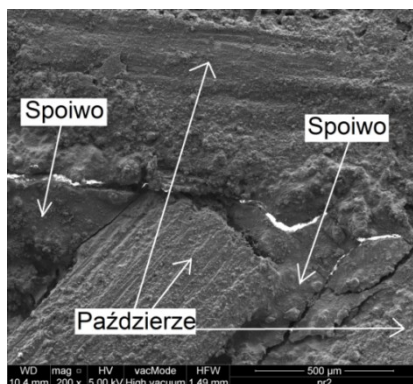
Rys. 12.36. Strefa styku pomiędzy spoiwem a wypełniaczem ($\times 500$) [P. Brzyski]



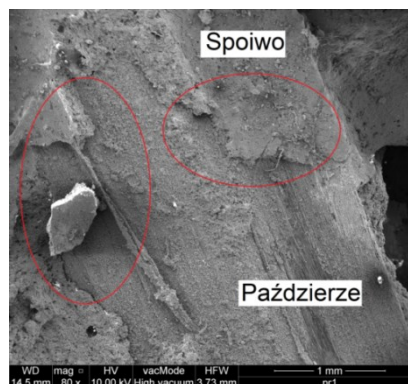
Rys. 12.37. Spękania na strefie styku paździerzy ze spoiwem, oznaczone kolorem czerwonym ($\times 100$) [P. Brzyski]

W czasie wysychania kompozytu może dojść do pojawienia się rys na styku dwóch materiałów (Rys. 12.37–12.38), a cienkie warstwy spoiwa wapiennego mogą ulec odspojeniu (Rys. 12.39). Do mieszanki wprowadzona zostaje znaczna ilość wody, przez co materiał podatny jest na skurcz od wysychania (zdecydowana większość wprowadzonej wody ulega odparowaniu). Obok dominującego skurczu od wysychania ze względu na obecność spoiwa wapiennego może występować skurcz karbonatyzacyjny. Powstająca woda w wyniku reakcji $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z dwutlenkiem węgla z otoczenia odparowuje, powodując skurcz. Jednak udział tego skurczu jest niewielki z uwagi na długotrwały proces

karbonatyzacji. Występuje w przypowierzchniowej warstwie kompozytu i ma niewielki wpływ na jego deformację, a jedynie na zarysowania powierzchni.



Rys. 12.38. Spękania na strefie styku paździerzy ze spoiwem ($\times 200$) [P. Brzyski]



Rys. 12.39. Odspojenie materiału wiążącego od wypełniacza – oznaczone czerwonym kolorem ($\times 80$) [P. Brzyski]

Przedstawione obrazy SEM są poglądowe i wybiórcze. Planowano zbadać i przeanalizować szczegółowo strefę styku w kompozytach za pomocą mikroskopu skaningowego, jednak z przyczyn technologicznych badania te byłyby wysoce nierzetelne. Z uwagi na kruchość materiału oraz wspomniany skurcz, próbki kompozytu do mikroskopu SEM ulegały uszkodzeniu podczas ich przygotowywania. W przypadku rysunków 12.37–12.39 pojawia się niepewność czy część z widocznych rys i odspojeń nie była wynikiem przygotowywania próbek do analizy SEM. Dodatkowo z uwagi na obecność składnika celulozowego, niemożliwe było uzyskanie wysokiej ostrości obrazu przy dużych powiększeniach. Pojawiało się też ryzyko spalenia składnika organicznego.

Badania strefy styku pomiędzy paździerzami a spoiwem wapiennym opisane są w literaturze (A. Arizzi i in. 2015). Autorzy stwierdzili, że wpływ na jakość połączenia może mieć m.in. zastosowanie wilgotnych paździerzy zawierających pewną ilość wody w swej strukturze, gdyż może to doprowadzić do zmiany ich objętości podczas wysychania kompozytu. Wapno z kolei, na skutek wysychania ulega skurczom. Te dwa zjawiska mogą doprowadzić do osłabienia połączenia matrycy z wypełniaczem. Celuloza zawarta w paździerzach charakteryzuje się większymi zdolnościami wiązania cząsteczek wody niż cząsteczki wapna. Te silne oddziaływania powodują migrację wody z matrycy do paździerzy. Jest to istotnie w początkowym okresie wysychania, kiedy trwają procesy wiązania składników hydraulicznych spoiwa - paździerz pochłaniając powoli część wody potrzebnej do procesu wiązania spoiwa powodują osłabienie struktury spoiwa, również w strefie styku (A. Arizzi i in. 2015).

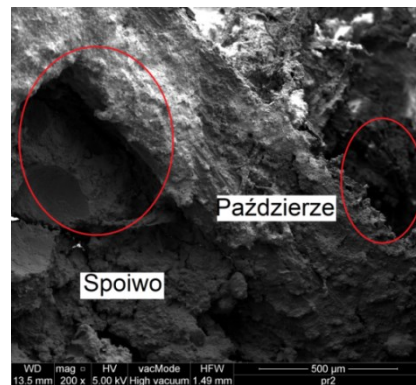
W celu poprawy przyczepności obu komponentów kompozytu, a w efekcie poprawy wytrzymałości kompozytu wielu autorów podkreśla potrzebę wstępnej

obróbki paździerzy poprzez np. alkalizację (A. Valadez-Gonzalez i in. 1999; M. Le Troëdec i in. 2009). W wyniku obróbki, powierzchnia paździerzy stanie się bardziej chropowata, umożliwiającą mocniejsze przewiązanie z cząsteczkami spoiwa wapiennego. Poprawa wytrzymałości na ściskanie została zaobserwowana również po zastosowaniu domieszki w postaci kopolimeru octanu winylu (Barnat-Hunek i in. 2015). Danuta Barnat-Hunek i wsp. zastosowali tę domieszkę w ilości 1% w stosunku do masy składników spoiwa. Uzyskano wzrost wytrzymałości o około 7–10% w stosunku do odpowiednich kompozytów nie zawierających tej domieszki. W innych badaniach (D. Barnat-Hunek i in. 2017), w celu poprawy parametrów mechanicznych zastosowano również domieszkę kopolimeru octanu winylu w ilości 1% w stosunku do masy spoiwa, a dodatkowo zastosowano włókna polipropylenowe oraz superplastyfikator w ilości 0,5% w stosunku do masy spoiwa. W kompozytach, w których zastosowano tę kombinację domieszek zaobserwowano większą, o około 10% wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z innymi kompozytami, a domieszka superplastyfikatora pozwoliła na redukcję ilości wody zarobowej, przez co skróceniu uległ czas wysychania kompozytów.

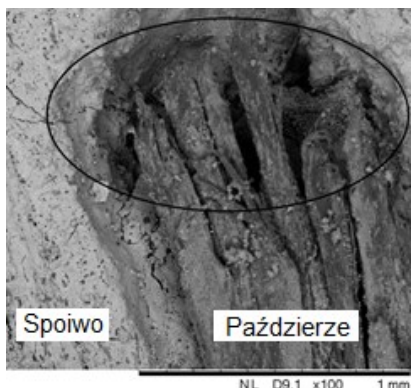
Z przyczyn technologicznych, na skutek niewłaściwego wymieszania lub zagęszczenia próbek, połączenie spoiwa z wypełniaczem nie zawsze jest skuteczne, odcinki paździerzy mogą pozostać niepokryte spoiwem wapiennym. Pojawiają się też pory technologiczne pomiędzy paździerzami, a spoiwem oraz pomiędzy paździerzami (Rys. 12.40–12.43).



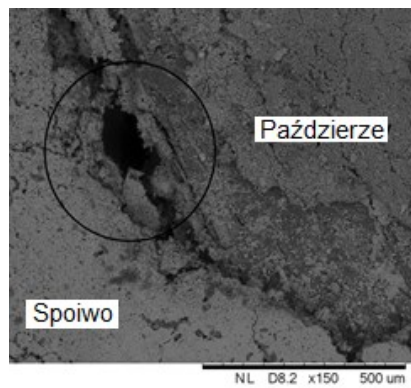
Rys. 12.40. Puste przestrzenie powstałe pomiędzy losowo ułożonymi paździerzami konopnymi, oznaczone kolorem czerwonym ($\times 100$) [P. Brzyski]



Rys. 12.41. Puste przestrzenie w obszarze paździerzy konopnych, oznaczone kolorem czerwonym ($\times 200$) [P. Brzyski]



Rys. 12.42. Pory powstałe pomiędzy spoiwem a paździerzami konopnymi ($\times 100$) [P. Brzyski]



Rys. 12.43. Pory powstałe pomiędzy spoiwem a paździerzami konopnymi ($\times 150$) [P. Brzyski]

Puste przestrzenie powodują osłabienie struktury kompozytu, jego wytrzymałości, a także decydują o postaci zniszczenia próbki w teście ściskania, co opisano w tym rozdziale. Pory technologiczne, rzędu kilku milimetrów mogą również sprzyjać wymianie ciepła poprzez konwekcję (A. Dylla 2015), co przyczynić może się do wzrostu przewodności cieplnej materiału, jak wykazano w badaniach własnych stosując częściowy zamiennik paździerzy w postaci perlitu ekspandowanego, który wypełnił częściowo puste przestrzenie w kompozycie.

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4* analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na wytrzymałość na ściskanie, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na wytrzymałość na ściskanie, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na wytrzymałość na ściskanie.

Test ANOVA wykazał, że we wszystkich czterech grupach (*Seria 1-4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F we wszystkich *Seriach* wyniosła więcej niż 1, natomiast wartość prawdopodobieństwa p wyniosła $< 0,05$, przy czym w *Serii 3* $p = 3,3E-13$, co świadczy o najwyższym poziomie istotności różnic wewnątrzgrupowych, natomiast w *Serii 2* $p = 1,7E-07$, co świadczy o najmniejszym zróżnicowaniu wyników wewnątrz grupy.

Na podstawie wyników testu Tukeya stwierdzić można, że większość modyfikacji receptur kompozytu spowodowały istotne statystycznie różnice pomiędzy średnimi wynikami wytrzymałości na ściskanie poszczególnych kompozytów w obrębie każdej z *Serii* ($p < 0,05$). Przewaga istotnych

statystycznie różnic świadczy o szerokich możliwościach wpływania na właściwości wytrzymałościowe, modyfikując skład kompozytów.

Nieistotne statystycznie różnice uzyskano porównując średnie wyniki wytrzymałości na ściskanie kompozytów:

- *Seria 2* – porównując kompozyty z 30% i 40% zawartością perlitu ekspandowanego, czyli zestawiając parę receptur różniących się zawartością perlitu o 10% względem siebie ($p = 0,183$).
- *Seria 3* – porównując średnią wartość lambda kompozytu zawierającego 70% i 100% paździerzy lnianych ($p = 0,163$) oraz 70% i 100% paździerzy konopnych ($p = 0,874$), czyli skrajnych receptur zawierających największe ilości poszczególnych wypełniaczy.

12.9. Wytrzymałość na zginanie

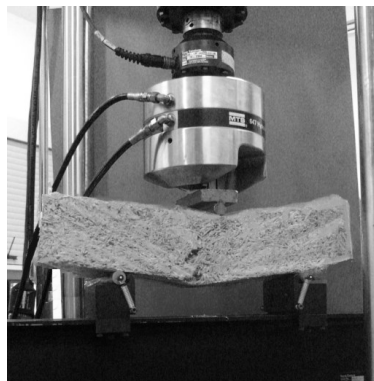
Opis badania

Wytrzymałość na ściskanie kompozytów określono po 28 dniach dojrzewania na próbkach o wymiarach $100 \times 100 \times 500$ mm, przy pomocy hydraulicznej prasy MTS 810 o zakresie obciążenia 0–100 kN. Przyjęto formy do badania betonu zwykłego ze względu na wielkość frakcji paździerzy konopnych. Salvatore Benfratello w swoich badaniach (S. Benfratello i in. 2013) z kolei wykorzystał próbki o wymiarach około $200 \times 50 \times 55$ mm, poprzez wycięcie ich z większych próbek. E. Sassoni natomiast stosował próbki o wymiarach $200 \times 120 \times 30$ – 50 mm (E. Sassoni i in. 2014)

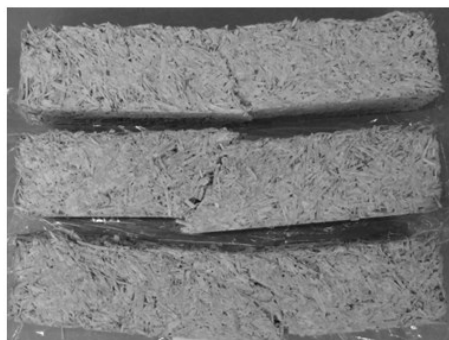
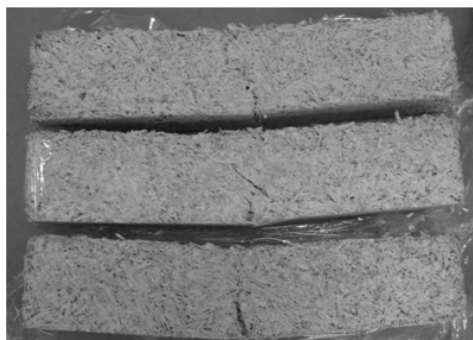
Wytrzymałość na zginanie określono jako średnią z wyników uzyskanych dla 5 próbek. W badaniach zadano przemieszczenie głowicy w prasie o wartości 2 mm/min. Podczas badania mierzono aktualną siłę rozciągającą oraz przemieszczenia głowicy. Test zginania zakończono przy przemieszczeniu głowicy równym 20 mm. Próbkę obciążano, tak jak w przypadku ściskania, w kierunku układania i zagęszczania mieszanki. Wytrzymałość na zginanie została obliczona dla maksymalnego obciążenia. Z kolei R. Walker w swoich badaniach (R. Walker i in. 2014b) kierowała się normą PN-EN 196-1 przyjmując przyrost obciążenia belek równy 10 N/s. E. Sassoni w swoich badaniach przyjął przyrost przemieszczenia głowicy równy 10 mm/min (E. Sassoni i in. 2014). Na zdjęciach (Rys. 12.44–12.46) przedstawiono przykładowe próbki wykorzystane do badania oraz postacie ich zniszczeń.



Rys. 12.44. Próbkki kompozytu wapienno-konopnego wykorzystane do badania wytrzymałości na zginanie (przykładowe próbki z *Serii 1*) [P. Brzyski]



Rys. 12.45. Badanie wytrzymałości na zginanie kompozytu wapienno-konopnego [P. Brzyski]



Rys. 12.46. Postacie zniszczenia przykładowych próbek z *Serii 1* (po lewej) oraz z *Serii 2* (po prawej) [P. Brzyski]

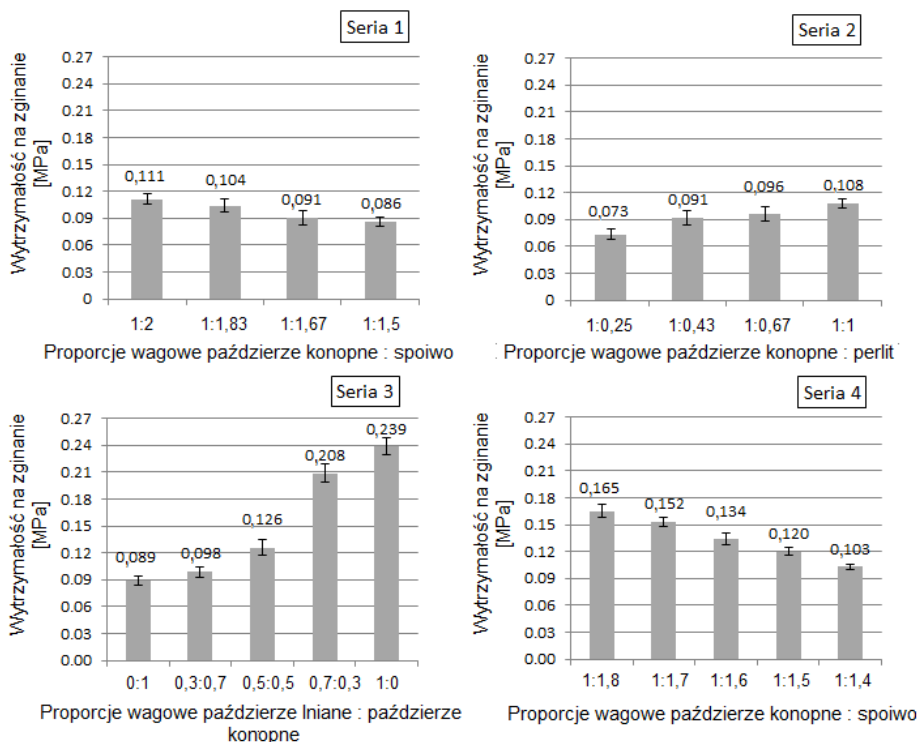
Wytrzymałość na zginanie obliczono według wzoru (15):

$$f_t = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \cdot 10 \quad (15)$$

gdzie: f_t – wytrzymałość na zginanie [MPa], F – maksymalne obciążenie przy niszczeniu (zginanie) [kN], l – rozstaw podpór belki [cm], d_1 i d_2 – wymiary przekroju poprzecznego próbki (szerokość, wysokość) [cm].

Wyniki i dyskusja

Na wykresach 12.47 przedstawiono uśrednione wyniki wytrzymałości na zginanie wraz z przedziałem ufności dla średniej arytmetycznej w postaci słupków błędów, obliczonym na podstawie odchylenia standardowego z próby.

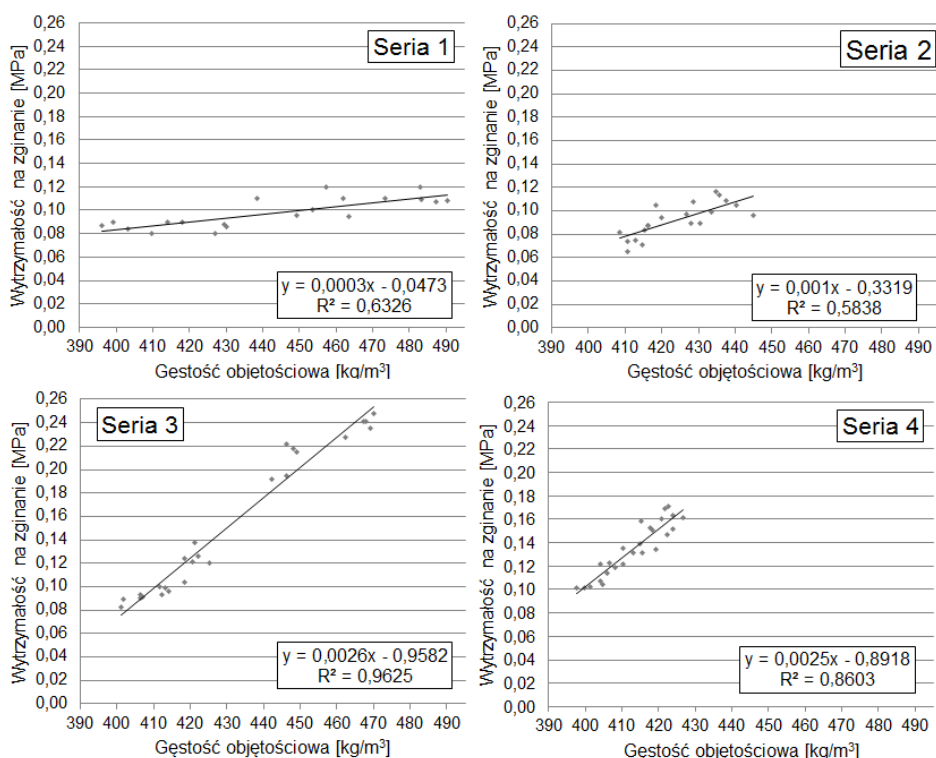


Rys. 12.47. Wytrzymałość na zginanie kompozytów z poszczególnych Serii

Badane kompozyty charakteryzują się wytrzymałością na zginanie w zakresie od 0,073 do 0,239 MPa. Najniższe wartości osiągnęły kompozyty z *Serii 2* (0,073–0,108 MPa) zawierającej perlit ekspandowany oprócz paździerz konopnych oraz z *Serii 1* (0,086–0,111 MPa). Najwyższe natomiast, kompozyty z *Serii 3* (0,089–0,239 MPa) zawierające oprócz paździerz konopnych, paździerz lniane. Wyniki z tej *Serii* są natomiast najbardziej zróżnicowane pomiędzy poszczególnymi recepturami. Kompozyty z *Serii 4* osiągnęły wytrzymałości na zginanie od 0,103 do 0,165 MPa. Otrzymane wyniki są porównywalne z uzyskanymi w innych badaniach (S. Benfratello i in. 2013) nad kompozytem wapienno-konopnym zawierającym 20% paździerz konopnych (długość 2 oraz 4 mm) względem całkowitej masy kompozytu o gęstości objętościowej około 600 kg/m³. W przytoczonych badaniach uzyskano wynik z przedziału od 0,08 do 0,141 MPa.

Na wykresach 12.48 przedstawiono zależność wytrzymałości na zginanie od gęstości objętościowej. Wraz ze wzrostem gęstości objętościowej wzrasta wytrzymałość na zginanie. Gęstość jest czynnikiem bardziej decydującym o wytrzymałości niż skład kompozytu – podobne zależności i obserwacje opisano również w literaturze (D. Barnat-Hunek i in. 2016; S. Elfordy i in. 2008).

Najdokładniejszą zależność uzyskano dla *Serii 3* – współczynnik determinacji wyniósł 0,963. Największy rozrzut wyników, świadczący o mniejszej zależności tych dwóch parametrów, wystąpił w *Serii 2* – współczynnik determinacji wyniósł 0,584. Niewiele wyższy współczynnik uzyskano dla kompozytów z *Serii 1* ($R^2 = 0,633$). Związane jest to z zastosowaniem paździerz konopnych *K1*, które charakteryzowały się większym zróżnicowaniem jeśli chodzi o długość, w porównaniu z paździerzami *K2*. Pojawiały się wśród nich paździerze o długościach rzędu kilku centymetrów, które utrudniały prawidłowe zagęszczenie próbek, przez co osłabieniu ulec mogła struktura kompozytu. W efekcie uzyskano duży rozrzut wyników. W *Serii 2* zastosowany był perlit, który wypełnił wolne przestrzenie między paździerzami, w efekcie czego otrzymano bardziej zwarty materiał niż w *Serii 1*, jednak kruszywo perlitowe nie wpływało na poprawę wytrzymałości na zginanie. W *Serii 3* również zastosowano paździerze *K1*, jednak oprócz nich zastosowano też paździerze lniane, które wypełniły wolne przestrzenie, ale również poprawiły wytrzymałość na zginanie, pełniąc funkcję zbrojenia.



Rys. 12.48. Zależności wytrzymałości na zginanie od gęstości objętościowej kompozytów z poszczególnych *Serii*

Kompozyty z *Serii 1* zawierały zmienną proporcję spoiwa do wypełniacza (paździerzy konopnych). Wraz ze zmniejszaniem ilości spoiwa następuje spadek wytrzymałości na zginanie. Jednak wyniki nie są zróżnicowane. Najwyższa średnia wytrzymałość stanowi 129% najniższej średniej wytrzymałości. Ilość spoiwa ma wpływ na wytrzymałość, jednak równie istotne jest oddziaływanie paździerzy konopnych, zwłaszcza tych o dłuższych frakcjach oraz włókien, które przejmowały obciążenia rozciągające. Paździerze zadecydowały o uzyskanej postaci odkształcenia podczas testu obciążania. Próbki nie ulegały całkowitemu przełamaniu, a jedynie doznawały ugięcia i zarysowania (Rys. 12.46).

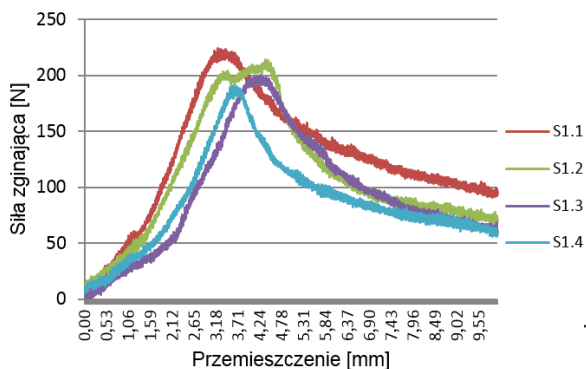
Kompozyty z *Serii 2*, oprócz paździerzy konopnych zawierały perlit ekspandowany. Na różnice w wynikach z tej *Serii* miała wpływ jedynie proporcja paździerzy konopnych do perlitu, gdyż ilość spoiwa pozostawała bez zmian. Wraz ze wzrostem udziału ilościowego perlitu wzrasta wytrzymałość na zginanie – najwyższa średnia wytrzymałość stanowi 148% najniższej średniej wytrzymałości z tej *Serii*. Obecność perlitu spowodowała uzyskanie bardziej zwartej struktury poprzez wypełnienie pustych przestrzeni pomiędzy paździerzami, czego efektem był wzrost wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem zawartości perlitu. Próbki po osiągnięciu strzałki ugięcia 20 mm ulegały całkowitemu przełamaniu (Rys. 12.46), w przeciwieństwie do próbek z *Serii 1*. Powodem była zmniejszona ilość paździerzy i włókien, przejmujących obciążenia rozciągające i utrzymujących kształt próbki poprzez jej przewiązanie, zszycie.

W przypadku *Serii 3* na wytrzymałość wpływ miał rodzaj wypełniacza i jego ilość. Najwyższą wytrzymałość osiągnął kompozyt zawierający jedynie paździerze lniane jako wypełniacz. Wytrzymałość ulegała zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości paździerzy lnianych. Mniejsze frakcje paździerzy lnianych, otoczone spoiwem wypełniły przestrzenie pomiędzy dłuższymi frakcjami paździerzy konopnych tworząc spójniejszą strukturę, która zapewniła lepsze parametry wytrzymałościowe. Podobnie w *Serii 2* na wyniki wpłynął perlit, jednak w przeciwieństwie do perlitu, paździerze lniane są materiałem włóknistym, pełniącym funkcję zbrojenia rozproszonego. Wyniki w *Serii 3* są zróżnicowane pomiędzy poszczególnymi recepturami. Najwyższa średnia wytrzymałość spośród wszystkich receptur stanowi 268% najniższej średniej wytrzymałości, co potwierdza znaczący wpływ proporcji obu wypełniaczy na wytrzymałość na zginanie.

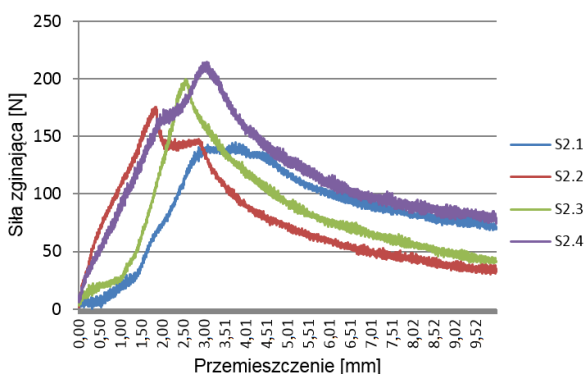
W *Serii 4*, podobnie jak w *Serii 1*, wpływ na różnice w wytrzymałości w poszczególnych recepturach miała proporcja spoiwa do wypełniacza (paździerzy konopnych). Tutaj jednak różnice są bardziej znaczące. Powodem wyraźniejszych różnic może być zastosowanie innych paździerzy niż w *Serii 1*. Paździerze wykorzystane w *Serii 4* są krótsze, w mniejszym stopniu zanieczyszczone włóknem, przez co przewiązanie było mniej skuteczne i o wytrzymałości zadecydowała bardziej proporcja spoiwa do paździerzy aniżeli sama obecność i przewiązanie paździerzy. Najwyższa średnia wytrzymałość

stanowi 160% najniższej średniej wytrzymałości (dla porównania w *Serii 1* było to 129%).

Na wykresach 12.49 i 12.50 przedstawiono przykładowe wykresy zależności przemieszczenia od siły zginającej dla receptur z *Serii 1* oraz *Serii 2*. Próbki z *Serii 1* osiągnęły maksymalną wytrzymałość przy przemieszczeniu głowicy równym około 4 mm, natomiast z *Serii 2* przy przemieszczeniu wynoszącym około 2,5 mm, jednak maksymalna siła niszcząca w obu *Seriach* była na podobnym poziomie. Kompozyty z *Serii 1* zawierają objętościowo więcej paździerzy konopnych względem próbek z *Serii 2*, które zawierały również kruszywo perlitowe. Przyczyniło się to do wydłużenia czasu przejmowania obciążeń oraz do przeniesienia obciążenia porównywalnego do *Serii 2* pomimo większego odkształcenia. Paździerze konopne zapewniły przewiązanie kompozytu w czasie oddziaływania omawianych obciążeń.



Rys. 12.49. Wykres zależności siły zginającej od przemieszczenia przedstawiający uśrednione wartości każdej z receptur *Serii 1*



Rys. 12.50. Wykres zależności siły zginającej od przemieszczenia przedstawiający uśrednione wartości każdej z receptur *Serii 2*

Analiza statystyczna

W *Serii 1* oraz *4* analizowanym statystycznie czynnikiem jest wpływ zawartości spoiwa (stosunek wagowy spoiwa do wypełniacza) na wytrzymałość na zginanie, w *Serii 2* wpływ zawartości perlitu ekspandowanego (udział wagowy w wypełniaczu) na wytrzymałość na zginanie, natomiast w *Serii 3* wpływ zawartości paździerzy lnianych (udział wagowy w wypełniaczu) na wytrzymałość na zginanie.

Test ANOVA wykazał, że we wszystkich czterech grupach (*Seria 1–4*) przynajmniej jedna zmienna niezależna (czynnik) wpłynęła na wyniki jednej zmiennej zależnej. Wartość statystyki F we wszystkich *Seriach* wyniosła więcej niż 1, natomiast wartości $p < 0,05$, przy czym w *Serii 3* $p \approx 0$, co świadczy o największym zróżnicowaniu średnich wyników wewnątrzgrupowych, natomiast w *Serii 1* $p = 6,8E-06$, co świadczy o najniższym poziomie istotności różnic wewnątrz grupy.

Test statystyczny (test Tukeya) wykazał, że jedynie w czterech porównywanych parach kompozytów uzyskano różnice średnich wartości wyników wytrzymałości na zginanie nieistotne statystycznie. Różnice te uzyskano porównując średnie wyniki wytrzymałości na zginanie kompozytów:

- *Seria 1* – porównując kompozyty oparte na paździerzach *K1* o proporcji spoiwa do paździerzy 2:1 i 1,83:1 ($p = 0,266$) oraz 1,67:1 i 1,5:1 ($p = 0,561$), czyli receptury o zbliżonych zawartościach spoiwa.
- *Seria 2* – porównując kompozyty z 30% i 40% zawartością perlitu ekspandowanego, czyli zestawiając parę receptur różniących się zawartością perlitu o 10% względem siebie ($p = 0,571$).
- *Seria 3* – porównując średnią wartość lambda kompozytu zawierającego 70% i 100% paździerzy konopnych ($p = 0,409$), czyli skrajnych receptur zawierających największe ilości poszczególnych wypełniaczy.
- W *Serii 4* różnice pomiędzy wszystkimi średnimi wynikami w poszczególnych recepturach okazały się istotne statystycznie.

13. Charakterystyka kompozytu wapienno-konopnego w przegrodach ściennych

13.1. Ogólne założenia przyjęte w analizie

W rozdziale przedstawiono analizę czterech przegród ściennych, wykonanych z kompozytu wapienno-konopnego otynkowanego obustronnie. Przyjęto do rozważania cztery wybrane kompozyty, scharakteryzowane we wcześniejszej części pracy (rozdział 12). Jako kryterium wyboru kompozytów wzięto pod uwagę wartości współczynnika przewodności cieplnej, które decydowały o możliwości wykorzystania tego materiału w ścianach zewnętrznych. Wartością maksymalną współczynnika przewodności cieplnej, stanowiącą kryterium wyboru receptury było $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Wartość tą wybrano jako graniczną, z uwagi na możliwość spełnienia wymagań cieplnych stawianych ścianom zewnętrznym ($U \leq 0,20 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) przy grubości warstwy kompozytu przyjmowanej w praktyce jako maksymalna (do 50 cm).

W ramach analizy przegród wykonano następujące działania:

- obliczenie temperatury powierzchni koniecznej do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej ściany
- obliczenie możliwości wystąpienia kondensacji międzywarstwowej w analizowanych ścianach
- obliczenie liniowych mostków cieplnych w ścianach zewnętrznych oraz narożach zewnętrznych.

Analizie poddano cztery przypadki ścian zewnętrznych wykonanych z kompozytu wapienno-konopnego. Wybrano kompozyty wykonane zgodnie z czterema różnymi recepturami, różniącymi się wybranymi parametrami wykorzystanymi w danej analizie – współczynnikiem przewodności cieplnej i paroprzepuszczalnością. Ściany oznaczono jako: wariant 1; wariant 2; wariant 3 oraz wariant 4. Konstrukcję ścian stanowi drewniany szkielet (słupy o przekroju $50 \times 150 \text{ mm}$ w rozstawie 500 mm), natomiast wypełnienie stanowi kompozyt wapienno-konopny o grubości, która zapewnia spełnienie obecnych wymagań cieplnych stawianych ścianom zewnętrznym, zgodnie z Warunkami Technicznymi obowiązującymi od 2021 roku, czyli $U_{max} = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Jako warstwy wykończeniowe zewnętrzne zastosowano tynk wapienny (15 mm), natomiast jako wewnętrzne – tynk gliniany (15 mm). Są to często przyjmowane rozwiązania w budownictwie naturalnym. Parametry materiałów tworzących analizowane przegrody przedstawiono w tabeli 13.1.

Tabela 13.1. Parametry kompozytów wapienno-konopnych, wyznaczone doświadczalnie w badaniach własnych oraz materiałów wykończeniowych analizowanych ścian, przyjęte z literatury [PN-EN ISO 10456; www.tierrafino.com]

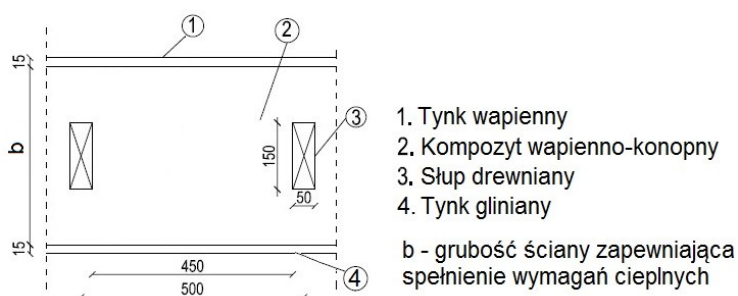
Material	Współczynnik przewodności cieplnej λ [W/(m·K)]	Współczynnik przepuszczalności pary wodnej δ [kg/(m ² ·s·Pa)]
Kompozyt S1.3	0,100	$3,37 \times 10^{-11}$
Kompozyt S2.3	0,088	$3,51 \times 10^{-11}$
Kompozyt S3.1	0,082	$3,62 \times 10^{-11}$
Kompozyt S4.1	0,094	$3,44 \times 10^{-11}$
Tynk zewnętrzny wapienny	0,80	$2,00 \times 10^{-11}$
Tynk wewnętrzny gliniany	0,91	$2,50 \times 10^{-11}$

W tabeli 13.2 przedstawiono uzyskane w obliczeniach współczynniki przenikania ciepła dla analizowanych ścian zewnętrznych. Obliczeń dokonano na podstawie procedur zawartych w normie PN-EN ISO 6946:1999, uwzględniając również drewniany szkielet (współczynnik λ dla drewna sosnowego przyjęto 0,16 W/(m·K)).

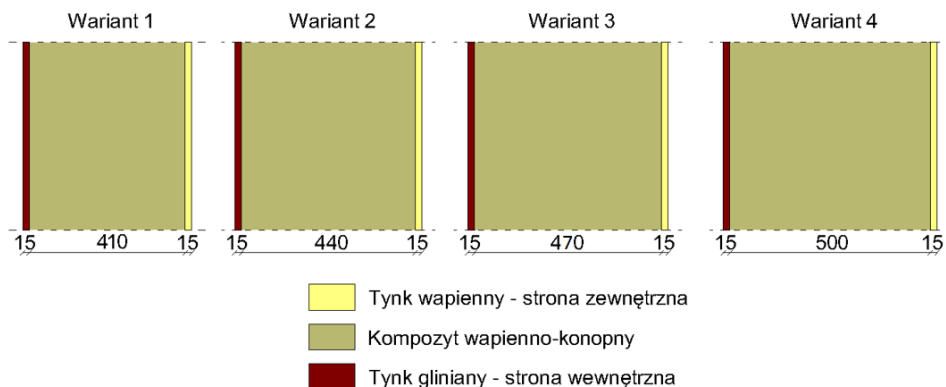
Tabela 13.2. Współczynniki przenikania ciepła ścian przyjętych do analizy

Przegroda	Wykorzystany kompozyt	Grubość warstwy kompozytu [m]	Współczynnik przenikania ciepła przegrody [W/(m ² ·K)]
Wariant 1	Kompozyt S3.1; $\lambda = 0,082$ W/(m·K)	0,41	0,20
Wariant 2	Kompozyt S2.3; $\lambda = 0,088$ W/(m·K)	0,44	0,20
Wariant 3	Kompozyt S4.1; $\lambda = 0,094$ W/(m·K)	0,47	0,20
Wariant 4	Kompozyt S1.3; $\lambda = 0,100$ W/(m·K)	0,50	0,20

Na rysunku 13.1 przedstawiono schemat ściany (przekrój poziomy), natomiast na rysunku 13.2 przedstawiono cztery warianty analizowanych ścian.



Rys 13.1. Schemat ściany zewnętrznej (przekrój poziomy) przyjęty do analizy. Wymiary podano w milimetrach



Rys. 13.2. Analizowane warianty ścian. Wymiary podano w milimetrach

W obliczeniach możliwości wystąpienia kondensacji powierzchniowej i międzywarstwowej pominięto wpływ drewnianych elementów konstrukcji na analizowane parametry, z uwagi na mały procentowy udział ich powierzchni w przekroju poprzecznym na długości 1 mb ściany.

Szczegółowe założenia i metody obliczeniowe zaprezentowano w poszczególnych, poniższych podrozdziałach.

13.2. Ocena możliwości wystąpienia kondensacji w przegrodzie

13.2.1. Określenie ryzyka wystąpienia kondensacji powierzchniowej

Metoda obliczeń

Przegrody zewnętrzne powinny być zaprojektowane z uwzględnieniem ryzyka wystąpienia powierzchniowej kondensacji pary wodnej. Na wewnętrznej powierzchni nieprzezroczystej przegrody zewnętrznej nie dopuszcza się wystąpienia kondensacji pary wodnej umożliwiającej rozwój grzybów pleśniowych. Opierając się na normie PN-EN ISO 13788, warunek ten sprawdzono poprzez obliczenie współczynnika temperaturowego f_{Rsi} . Ściana zewnętrzna, wg zaleceń w/w normy powinna charakteryzować się współczynnikiem temperaturowym nie większym niż jego wartość krytyczna $f_{Rsi,kryt}$. Współczynnik temperaturowy obliczono według wzorów (16) oraz (17):

$$f_{Rsi, \min} = \frac{\theta_{si, \min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (16)$$

$$f_{Rsi} = 1 - \frac{R_{si, \min}}{R_{T, \min}} \quad (17)$$

gdzie: $\theta_{si,min}$ – temperatura powierzchni wewnętrznej [°C]; θ_i – temperatura powietrza wewnętrznego [°C]; θ_e – temperatura powietrza zewnętrznego [°C]; $R_{si,min}$ – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody (0,25 (m²·K)/W); $R_{T,min}$ – najniższy opór cieplny sekcji wydzielonej z komponentu budowlanego [(m²·K)/W].

Aby możliwe było sprawdzenie warunku $f_{Rsi} > f_{Rsi,kryt}$ konieczne jest wyznaczenie ciśnienia pary wodnej nasyconej p_{sat} , ciśnienia rzeczywistego pary wodnej na powierzchni zewnętrznej p_e i wewnętrznej p_i przegrody, oraz obliczenie minimalnej dopuszczalnej temperatury $\theta_{si,min}$ będącą najniższą temperaturą powierzchni wewnętrznej, poniżej której zaczyna rozwijać się pleśń. Aby uniknąć rozwoju pleśni, wilgotność względna na powierzchni nie powinna przekraczać wartości 0,8. Wartości te obliczono wg wzorów (18–21):

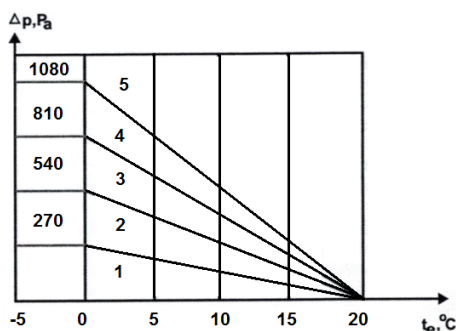
$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,26\theta_e}{237,5+\theta_e}} \quad \text{dla } \theta_e \geq 0^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta_e}{265,5+\theta_e}} \quad \text{dla } \theta_e < 0^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$p_e = \varphi_e \cdot p_{sat} \quad (20)$$

$$p_i = p_e + 1,1 \cdot \Delta p \quad (21)$$

Wartość Δp jest to nadwyżka ciśnienia atmosferycznego. W budynkach z wentylacją naturalną stanowi ona funkcję zewnętrznego ciśnienia pary i klasy obciążenia wilgotnością wewnętrzną budynku. Klasę wilgotności przyporządkowuje się wg tabeli zawartej w PN-EN ISO 13788. W obliczeniach przyjęto klasę 3, odpowiednią dla mieszkań mało zagęszczonych. Wartość Δp przyjęto na podstawie wykresu (Rys. 13.3).



Rys. 13.3. Zmiana klas wilgotności wewnętrznej w zależności od temperatury zewnętrznej [PN-EN ISO 13788]

Minimalną dopuszczalną temperaturę będącą najniższą temperaturą powierzchni wewnętrznej, poniżej której zaczyna rozwijać się pleśń obliczono wg wzorów (22–23):

$$\theta_{si,\min} = \frac{237,5 \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \begin{array}{l} \text{dla } p_{sat}(\theta_{si,\min}) \\ \geq 610,5 \text{ Pa} \end{array} \quad (22)$$

$$\theta_{si,\min} = \frac{265,5 \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \begin{array}{l} \text{dla } p_{sat}(\theta_{si,\min}) \\ < 610 \text{ Pa} \end{array} \quad (23)$$

Wartość ciśnienia kondensacji, przy której wilgotność względna na powierzchni nie przekroczy wartości 0,8 obliczono natomiast ze wzoru (24):

$$p_{sat}(\theta_{si,\min}) = \frac{p_i}{0,8} \quad (24)$$

Analizy stanu wilgotności ściany w budynku mieszkalnym (ogrzewanym) dokonano przyjmując jako lokalizację miasto Lublin. Średnie miesięczne wartości temperatur θ_e oraz wilgotności względnych powietrza zewnętrznego φ_e przyjęto na podstawie danych meteorologicznych dla stacji Lublin-Radawiec (www.transport.gov.pl) (Tabela 13.3).

Tabela 13.3. Zewnętrzna temperatura i wilgotność względna powietrza dla miasta Lublin [www.transport.gov.pl]

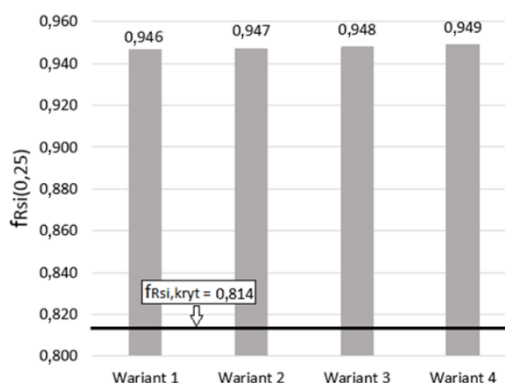
M-c	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
θ_e [°C]	-2,6	-1,9	3,2	9,2	14,4	16,2	16,9	16,9	12,8	8,5	1,3	-2,1
φ_e [%]	87	86	81	73	73	78	78	77	83	84	89	88

Wyniki i dyskusja

W tabeli 13.4 przedstawiono wyniki obliczeń wewnętrznej powierzchniowej temperatury niezbędnej do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchniowej. Na rysunku 13.4 zobrazowano zestawienie obliczonych współczynników temperaturowych. Analizie poddano cztery warianty ścian, różniących się parametrami kompozytów wypełniających, jednak regulując grubość ściany, w każdym wariantcie uzyskano ten sam współczynnik przenikania ciepła przegrody. W związku z tym przeprowadzone obliczenia wewnętrznej powierzchniowej temperatury niezbędnej do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchniowej dotyczą każdego z wariantów.

Tabela 13.4. Wyniki obliczeń wewnętrznej powierzchniowej temperatury niezbędnej do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchniowej

M-c	θ_e [°C]	φ_e [%]	p_e [Pa]	p_{sat} [Pa]	Δp [Pa]	p_i [Pa]	$p_{sat}(\theta_{si,min})$ [Pa]	$\theta_{si,min}$ [°C]	$f_{Rsi,min}$
I	-2,6	87	428	492	915	1435	1794	15,8	0,814
II	-1,9	86	449	522	887	1424	1780	15,7	0,803
III	3,2	81	624	770	680	1373	1716	15,1	0,709
IV	9,2	73	844	1156	437	1326	1657	14,6	0,496
V	14,4	73	1205	1650	227	1454	1818	16,0	0,287
VI	16,2	78	1430	1833	154	1599	1999	17,5	0,343
VII	16,9	78	1495	1917	126	1633	2041	17,8	0,301
VIII	16,9	77	1487	1931	126	1625	2032	17,8	0,277
IX	12,8	83	1221	1471	292	1542	1927	16,9	0,572
X	8,5	84	928	1105	466	1440	1800	15,8	0,639
XI	1,3	89	598	672	757	1431	1789	15,8	0,773
XII	-2,1	88	453	515	895	1438	1797	15,8	0,811



Rys. 13.4. Wartości współczynnika temperaturowego w ciągu roku w czterech wariantach analizowanych ścian zewnętrznych

Miesiącem krytycznym ze względu na poziom $f_{Rsi(0,25)}$ jest styczeń. Obliczony współczynnik temperaturowy dla tego miesiąca wyniósł 0,814, nieco mniejszą wartość współczynnika uzyskano dla grudnia, 0,811. W czterech analizowanych wariantach ścian współczynnik temperaturowy $f_{Rsi(0,25)}$ wyniósł 0,946–0,949. Wartości te są większe od współczynnika krytycznego, więc warunki dla rozwoju pleśni na powierzchni wewnętrznej ścian nie występują przez cały rok. Aby porównać uzyskane wyniki, należy wspomnieć, że Andy Shea (A. Shea i in. 2012), przy ścianie wykonanej z kompozytu wapienno-konopnego o grubości 200 mm, przy temperaturze zewnętrznej 6,6 °C i wewnętrznej 22,2 °C uzyskał wartość współczynnika temperatury równą 0,81, podczas gdy wartość współczynnika krytycznego wyniosła 0,75. W innych badaniach analizowano ścianę z kompozytu wapienno-konopnego ocieploną dodatkową wełną konopną (P. Brzyski 2016). Ściana o współczynniku przenikania ciepła wynoszącym około 0,25 W/(m²·K) charakteryzowała się współczynnikiem temperaturowym równym 0,94. Analiza była dokonywana w warunkach cieplno-wilgotnościowych takich jak w niniejszej pracy własnej.

13.2.2. Określenie możliwości wystąpienia kondensacji międzywarstwowej

Metoda obliczeń

Obliczenia wykonano w oparciu o normę PN-EN ISO 13788. Rozpoczęto je dla dowolnego miesiąca zwanego próbnym. Dla tego miesiąca obliczana jest temperatura na styku warstw obliczeniowych, ciśnienie pary nasyconej i rozkład pary w przegrodzie. Jeśli nie zostanie zaobserwowana kondensacja, to obliczenia należy powtórzyć dla kolejnych miesięcy, aż do stanu gdy:

- W żadnym z 12 miesięcy nie nastąpi kondensacja, wtedy przegrodę traktuje się jako wolną od kondensacji,
- W miesiącu, w którym jako pierwszym wystąpi kondensacja, należy uznać go za początkowy i kontynuować obliczenia dla kolejnych.

W celu określenia ryzyka wystąpienia kondensacji wewnątrz przegrody zdefiniowano dane klimatyczne – temperatury i wilgotności (θ_e, φ_e) dla danej lokalizacji (Lublin), a także wartość ciśnienia rzeczywistego p_i oraz p_e . Wartości te podano w tablicy 13.3 i 13.4 w podrozdziale 13.2.1.

Przegrodę budowlaną podzielono na szereg równoległych, jednorodnych warstw, dla których określono opory cieplne R oraz równoważne dyfuzyjne warstwy powietrza s_d wg wzoru (25):

$$S_d = \mu \cdot d_m \quad (25)$$

gdzie: μ – współczynnik oporu dyfuzyjnego [-], d_m – grubość warstwy materiału [m].

Tak przedstawiony opór dyfuzyjny warstwy materiału odpowiada grubości warstwy powietrza, która stawiałaby taki sam opór jak rozpatrywana warstwa materiału.

Warstwy o znacznym oporze cieplnym ($R > 0,25 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$), czyli warstwy kompozytu wapienno-konopnego, podzielono na pewną liczbę warstw o takim samym oporze cieplnym, nieprzekraczającym $0,25 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ – taki podpodział jest traktowany w obliczeniach jako układ oddzielnych warstw.

Obliczono narastający opór cieplny i grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym od strony zewnętrznej do każdej powierzchni stykowej n (26–27):

$$R'_n = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j \quad (26)$$

$$s'_{d,n} = \sum_{j=1}^n s_{d,j} \quad (27)$$

Całkowity opór cieplny i grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym wyraża się równaniami (28–29):

$$R'_T = R_{si} + \sum_{j=1}^N R_j + R_{se} \quad (28)$$

$$s'_{d,T} = \sum_{j=1}^N s_{d,j} \quad (29)$$

Następnie obliczono temperaturę na każdej powierzchni styku materiałów za pomocą równania (30):

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (30)$$

Zakładając warunki stanu ustalonego, rozkład temperatury w każdej warstwie jest liniowy.

Znając temperaturę na powierzchniach styku warstw przegrody, obliczono ciśnienie pary nasyconej na każdej powierzchni styku wg wzorów 18–19, opisanych w podrozdziale 13.2.1.

Strumień pary wodnej, przepływający przez przegrodę budowlaną, obliczono stosując wzór (31):

$$g = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_e}{s'_{d,T}} \quad (31)$$

Strumień kondensacji definiuje się jako różnicę między ilością wilgoci przenoszonej do powierzchni stykowej, a ilością wilgoci przenoszonej od powierzchni stykowej, na której występuje kondensacja. W przypadku wystąpienia kondensacji, jej strumień wyznacza się zgodnie ze wzorem (32):

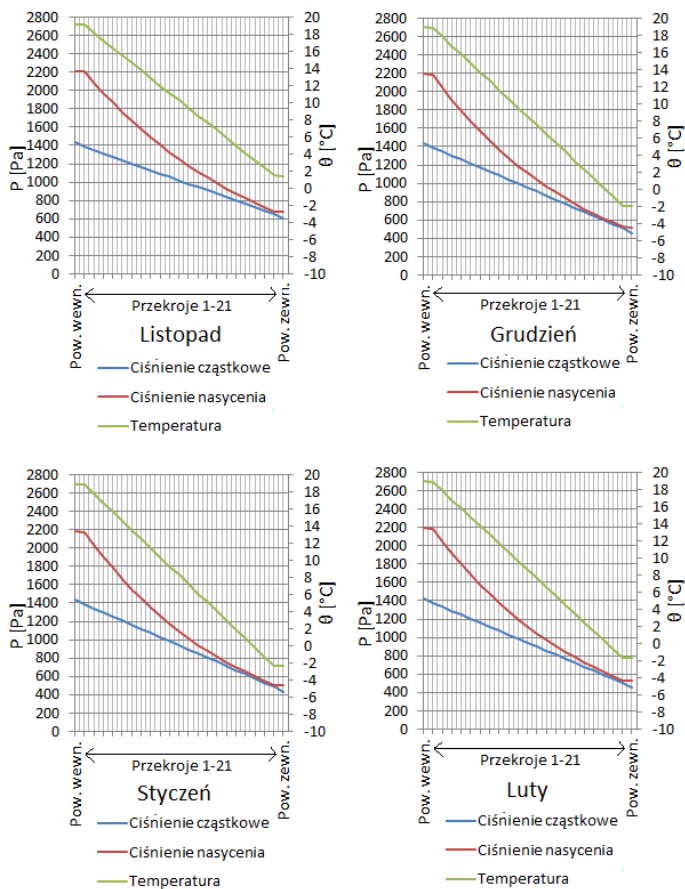
$$g_c = \delta_0 \cdot \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad (32)$$

Wyniki i dyskusja

Na wykresach (Rys. 13.5) przedstawiono rozkład temperatury oraz ciśnienia cząstkowego i nasycenia w przegrodzie ściennej wykonanej z kompozytu S3.1 (wariant 1). Grubość warstwy kompozytu wynosi 410 mm. Przegroda została podzielona na 22 warstwy obliczeniowe: 20 warstw kompozytu wapienno-konopnego o oporze cieplnym równym 0,250 (m²·K)/W; 1 warstwa tynku wapiennego o oporze cieplnym równym 0,019 (m²·K)/W oraz 1 warstwa tynku glinianego o oporze cieplnym równym 0,016 (m²·K)/W. Na styku każdej z warstw obliczono temperaturę oraz wartości ciśnienia cząstkowego i nasycenia. Wykresy przedstawiono dla 4 miesięcy z okresu jesienno-zimowego, w których z uwagi na najniższą średnią temperaturą zewnętrzną istnieje największe ryzyko wystąpienia zjawiska kondensacji.

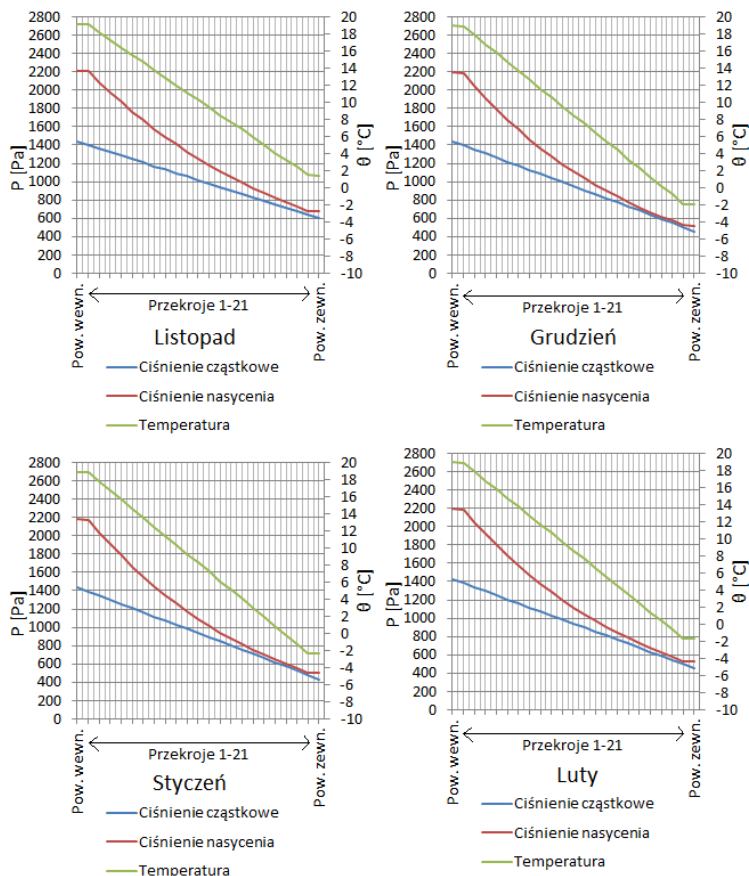
Temperatura ujemna utrzymuje się w warstwach obliczeniowych 19–22 w styczniu oraz w warstwach 20–22 w grudniu i lutym. Zasięgi te stanowią 10,6–13,4% całkowitej grubości ściany. W grudniu głębokość strefy ujemnych temperatur sięga 50,8 mm, w styczniu 58,8 mm, natomiast w lutym 46,7 mm.

We wszystkich miesiącach wartości ciśnienia nasycenia są wyższe od wartości ciśnienia cząstkowego, co oznacza brak kondensacji w przegrodzie. W miesiącu krytycznym, w którym występuje najniższa temperatura zewnętrzna, a strefa ujemnych temperatur sięga najgłębiej, wartość ciśnienia nasycenia jest większa od cząstkowego w najbardziej niekorzystnym przekroju (przekrój 21 – pomiędzy kompozytem a tynkiem zewnętrznym) zaledwie o 14 Pa. Jednak w miesiącu poprzedzającym styczeń, różnica jest mniejsza i wynosi 11 Pa, natomiast w lutym 26 Pa. Wraz ze wzrostem średniej temperatury zewnętrznej różnica ta wzrasta.



Rys. 13.5. Rozkład temperatury, ciśnienia cząstkowego i ciśnienia nasycenia w przegrodzie w wariancie 1 (grubość warstwy kompozytu 410 mm; $\lambda = 0,082 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), w miesiącach od listopada do lutego

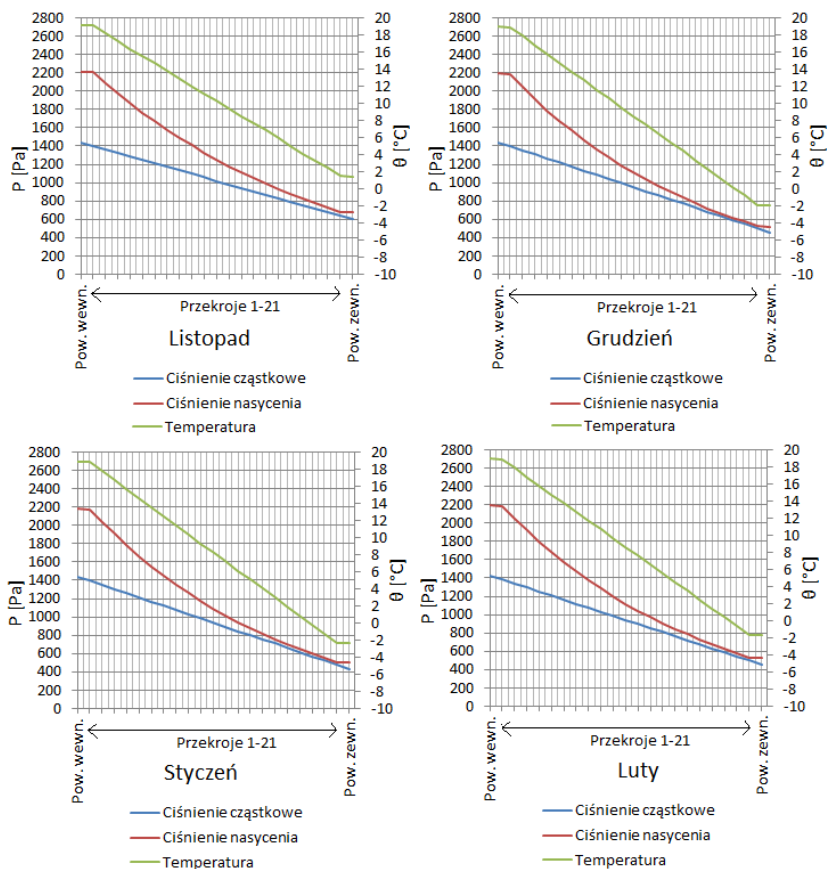
Na rysunku 13.6 przedstawiono wykresy przedstawiające rozkład temperatury oraz ciśnienia cząstkowego i nasycenia w przegrodzie ściennej wykonanej z kompozytu S2.3 (wariant 2). Grubość warstwy kompozytu wynosi 440 mm. Przegroda została podzielona na 22 warstwy obliczeniowe, podobnie jak w wariancie 1. Opór obliczeniowy każdej warstwy obliczeniowej kompozytu wapienno-konopnego wyniósł w tym przypadku $0,250 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$.



Rys. 13.6. Rozkład temperatury, ciśnienia cząstkowego i ciśnienia nasycenia w przegrodzie w wariantcie 2 (grubość warstwy kompozytu 440 mm; $\lambda = 0,088 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), w miesiącach od listopada do lutego

Temperatura ujemna utrzymuje się w warstwach obliczeniowych 19–22 w styczniu oraz w warstwach 20–22 w grudniu i lutym. Zasięgi te stanowią 10,5–13,4% całkowitej grubości ściany. W grudniu głębokość strefy ujemnych temperatur sięga 55,4 mm, w styczniu 63,2 mm, natomiast w lutym 49,5 mm. W wariantcie 2 również nie zaobserwowano kondensacji międzywarstwowej. W grudniu wystąpiło największe ryzyko kondensacji – różnica pomiędzy wartością ciśnienia nasycenia a cząstkowym w przekroju 21 wynosi 17 Pa. Z uwagi na większą wartość λ kompozytu oraz większą o 30 mm grubość ściany w wariantcie 2 (pomimo porównywalnych wartości współczynnika U przegrody w obu wariantach) głębokość przemarzania w ścianie zaprojektowanej wg wariantu 2 jest większa o 6–9% w porównaniu ze ścianą w wariantcie 1.

Na rysunku 13.7 przedstawiono wykresy przedstawiające rozkład temperatury oraz ciśnienia cząstkowego i nasycenia w przegrodzie ściennej wykonanej z kompozytu S4.1 (wariant 3). Grubość warstwy kompozytu wynosi 470 mm. Przegroda również została podzielona na 22 warstwy obliczeniowe. Opór obliczeniowy każdej warstwy obliczeniowej kompozytu wapienno-konopnego wyniósł $0,25 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$.

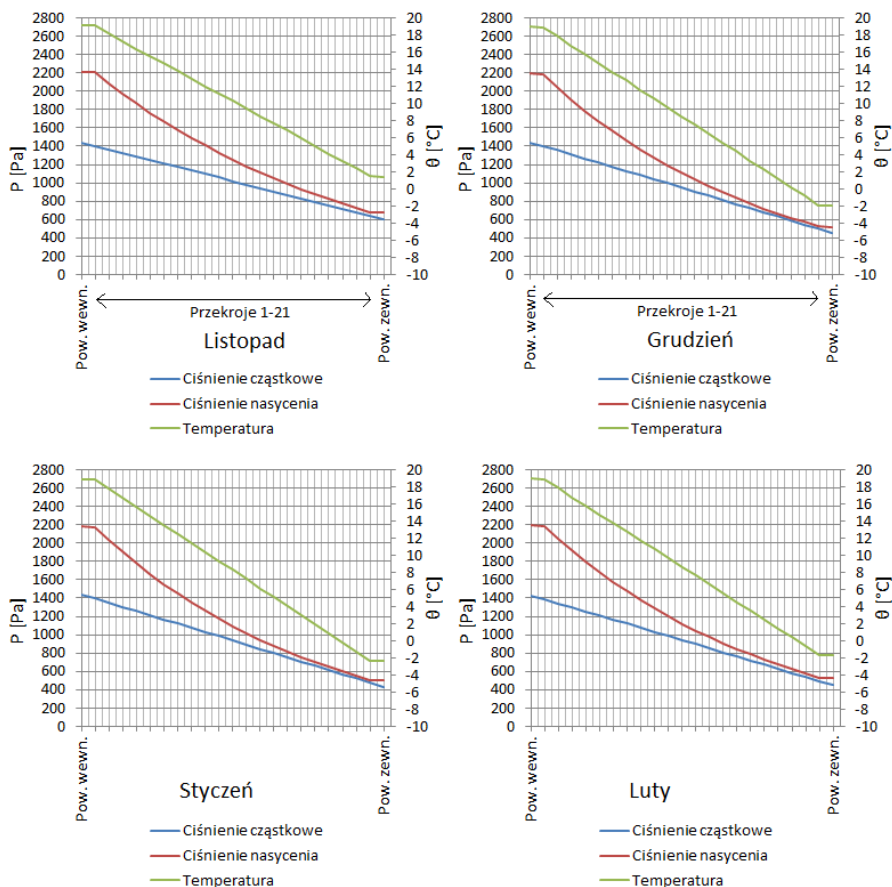


Rys. 13.7. Rozkład temperatury, ciśnienia cząstkowego i ciśnienia nasycenia w przegrodzie w wariantcie 3 (grubość warstwy kompozytu 470 mm; $\lambda = 0,094 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), w miesiącach od listopada do lutego

Temperatura ujemna utrzymuje się w warstwach obliczeniowych 19–22 w styczniu. Z kolei w grudniu i w lutym w warstwach 20–22. Zasięgi te stanowią 11,1–13,6% grubości ściany. W grudniu głębokość strefy ujemnych temperatur sięga 59,8 mm, w styczniu 68,2 mm, natomiast w lutym 55,7 mm. Głębokość przemarzania wzrosła w stosunku do wariantu 1 o 16–19,3%. W wariantcie 3, podobnie jak w poprzednich przypadkach, nie zaobserwowano

kondensacji wewnątrz przegrody. Różnica pomiędzy wartością ciśnienia nasycenia pary wodnej i ciśnienia cząstkowego wyniosła 20 Pa w przekroju pomiędzy warstwą kompozytu wapienno-konopnego, a tynkiem zewnętrznym (w grudniu).

Na rysunku 13.8 przedstawiono wykresy przedstawiające rozkład temperatury oraz ciśnienia cząstkowego i nasycenia w przegrodzie ściennej wykonanej z kompozytu S1.3 (wariant 4). Grubość warstwy kompozytu wynosi 500 mm. Przegroda została podzielona na 22 warstwy obliczeniowe. Opór obliczeniowy każdej warstwy obliczeniowej kompozytu wapienno-konopnego wyniósł 0,25 (m²·K)/W.



Rys. 13.8. Rozkład temperatury, ciśnienia cząstkowego i ciśnienia nasycenia w przegrodzie w wariantcie 4 (grubość warstwy kompozytu 500 mm; $\lambda = 0,100$ W/(m·K)), w miesiącach od listopada do lutego

Temperatura ujemna utrzymuje się w warstwach obliczeniowych: 19–22 (styczeń) oraz 20–22 (grudzień i luty). W grudniu głębokość strefy ujemnych

temperatur sięga 64,3 mm, w styczniu 73,2 mm, natomiast w lutym 58,5 mm. Zasięgi te stanowią 11–13,8% całkowitej grubości ściany. W porównaniu ze ścianą z wariantu 1, strefa temperatur ujemnych w ścianie w wariacie 4 zwiększyła swój zasięg o 24,5–26,6%. W wariacie 4 nie występuje ryzyko zjawiska kondensacji. Ciśnienie nasycenia pary wodnej w przekroju na styku warstwy kompozytu i tynku zewnętrznego jest w grudniu większe od ciśnienia cząstkowego o 24 Pa.

Przegrody z kompozytu wapienno-konopnego w przeciwieństwie do przegród tradycyjnych, czyli materiał murowy z ociepleniem i tynkami, pozbawione są warstwowego układu materiałów o różnych stopniach paroprzepuszczalności. Kompozyt wapienno-konopny, stanowiący grubość przegrody charakteryzuje się wysoką paroprzepuszczalnością oraz wysokim oporem cieplnym. Największe ryzyko wystąpienia kondensacji wewnątrz przegrody występuje na styku warstw, z których ta umieszczona od zewnętrznej strony charakteryzuje się większym oporem dyfuzyjnym - przede wszystkim w strefie niskich temperatur, gdzie para wodna wydostająca się z pomieszczenia osiąga temperaturę powodującą jej skroplenie. W przypadku analizowanych ścian, kompozyt pokryty jest obustronnie tynkami. Jednak są to tynki o niskim oporze dyfuzyjnym, umożliwiające przepływ pary wodnej przez przegrodę. Od strony zewnętrznej zastosowany został tynk wapienny, który pomimo tego, że w miesiącach zimowych znajduje się w strefie ujemnych temperatur oraz posiada większy opór dyfuzyjny i przewodność cieplną od sąsiadującego z nim kompozytu wapienno-konopnego, to z uwagi na jego małą grubość (15 mm) nie zaburzył otwartości dyfuzyjnej przegrody w każdym z analizowanych wariantów.

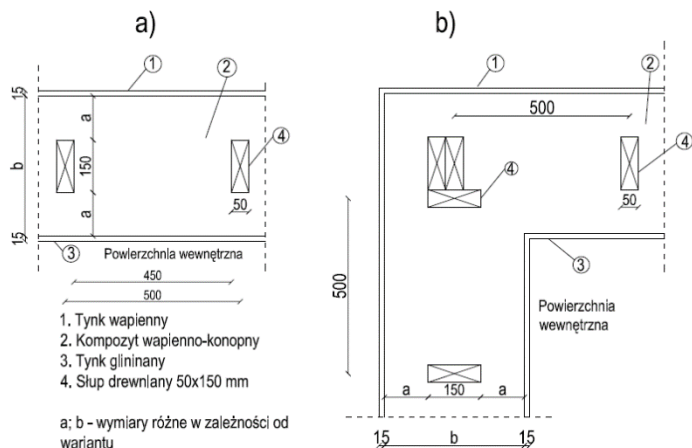
13.3. Analiza występowania mostków termicznych w ścianie

Analizowane węzły i przegrody

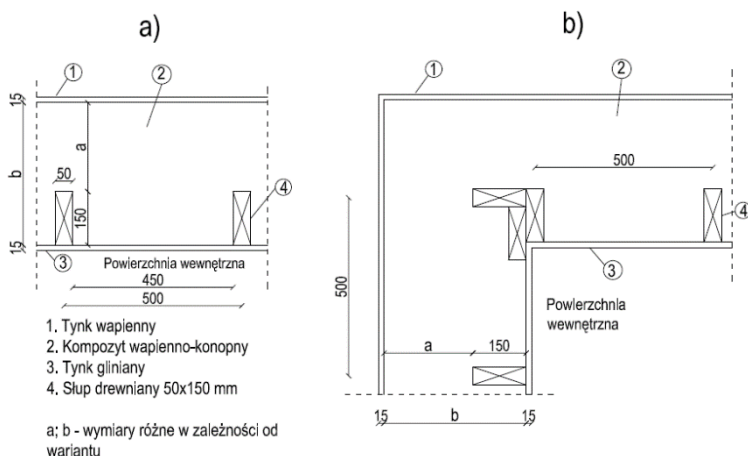
Węzły i przegrody wykorzystane w analizie to: narożniki wypukłe ścian zewnętrznych oraz ściany zewnętrzne. Analiza ma na celu wykazanie, w jakim stopniu elementy drewniane w węźle wpływają na przepływ ciepła oraz na rozkład temperatury w obszarze węzła. Wszystkie węzły są rozważane dla dwóch typów ścian, różniących się lokalizacją konstrukcji ścian. W pierwszym wariacie ścian, szkielet ściany umieszczony jest wzdłuż osi symetrii ściany. W drugim wariacie szkielet drewniany został umieszczony po wewnętrznej stronie ściany. Są to typowo stosowane w praktyce rozwiązania. Do analizy przyjęto grubości warstw kompozytu wg wariantów 1–4 omówionych w podrozdziale 13.1 (410; 440; 470; 500 mm). W każdym przypadku przyjęto zewnętrzny tynk wapienny o grubości 15 mm oraz wewnętrzny tynk gliniany o grubości 15 mm.

Konstrukcją ściany są słupy drewniane o przekroju poprzecznym 50×150 mm w rozstawie 500 mm. W narożach przyjęto słupy o większym przekroju (trzy

słupy o przekroju 50×150 mm połączone ze sobą). Przekroje ścian przedstawiono na rysunkach 13.9–13.10.



Rys. 13.9. Schemat ściany (a) oraz naroża zewnętrznego (b) z konstrukcją umieszczoną w środku



Rys. 13.10. Schemat ściany (a) oraz naroża zewnętrznego (b) z konstrukcją umieszczoną po wewnętrznej stronie

Podstawa analizy

Norma PN-EN ISO 14683 przedstawia następujące metody obliczeniowe, w porządku malejącym (stopień dokładności):

- obliczenia numeryczne zgodnie z PN-EN ISO 10211 (typowa dokładność $\pm 5\%$)
- katalogi mostków termicznych (typowa dokładność $\pm 20\%$)
- obliczenia ręczne (typowa dokładność $\pm 20\%$)

- domyślne wartości ψ podane przez normę PN-EN ISO 14683 (typowa dokładność $\pm 50\%$).

Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ charakteryzuje dodatkowe straty ciepła w miejscu występowania liniowego mostka cieplnego, odniesione do metra bieżącego tego mostka.

Obliczenia numeryczne zapewniają najbardziej dokładnie wyniki. W celu odwzorowania warunków rzeczywistych prowadzone były badania nad opracowaniem parametru termicznego charakteryzującego mostki termiczne w warunkach dynamicznych (K. Martin i in. 2012) i nad jego wdrożeniem w kategoriach dynamicznej symulacji energii (A.E. Ben-Nakhi 2003, Y. Gao i in. 2008).

W niniejszej pracy, rozkład temperatury w opisanych ścianach oraz narożach zewnętrznych oraz analizy mostków termicznych dokonano metodą numeryczną przy użyciu oprogramowania Therm 7.4 (www.windows.lbl.gov). Jest to darmowe oprogramowanie stworzone i dystrybuowane przez Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, USA (R. Mitchel i in. 2011). Program został opracowany do analizy 2D w zakresie przenikania ciepła w warunkach stacjonarnych przez produkty i wyroby budowlane. Obecnie jest on powszechnie stosowany w ocenie termicznej przegród budowlanych i połączeń budowlanych (S. Real i in. 2016, C. Murad i in. 2015, F. Cappelletti i in. 2011, F. Stazi i in. 2014).

W normie ISO 15099:2003, na której bazuje program, dwuwymiarowe równania przenikania ciepła są rozwiązane numerycznie dla poszczególnych elementów przy użyciu metody elementów skończonych.

Proces modelowania w programie składa się z następujących etapów (Mitchell i in. 2011):

- zdefiniowanie modelu (w tym definicja geometrii, przypisanie właściwości materiału i warunków brzegowych)
- generowanie siatki
- obliczanie temperatury i strumienia ciepła przez analizator elementów skończonych
- generowanie wyników na podstawie obliczeń dla danego elementu.

Wyniki są wyświetlane w formie graficznej jako izotermy i szkice strumienia ciepła, umożliwiając wizualną i jakościową ocenę mostka cieplnego. Informacje o współczynniku przenikania ciepła (U [$W/(m^2 \cdot K)$]) uśrednione dla całego elementu mogą być wykorzystane do dalszej ilościowej oceny połączenia, a mianowicie obliczenia liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ [$W/(m \cdot K)$].

Procedura obliczeniowa zgodna z normą PN-EN ISO 10211 wymaga modelowania elementu w ten sposób, że jego obszar jest rozszerzony o co najmniej 1 m od geometrycznego środka mostka termicznego, w celu zachowania

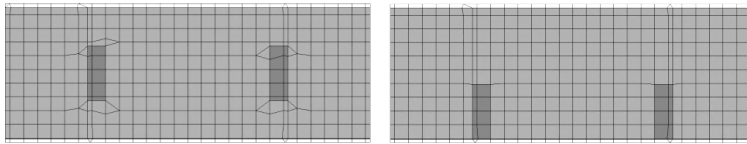
jednowymiarowego przepływu ciepła w płaszczyźnie przekroju (traktowany jak powierzchnia adiabatyczna). Jeśli w przegrodach budynku występują powtarzalne elementy jak np. drewniane słupy w ścianie, płaszczyzna przekroju powinna być umieszczona pomiędzy nimi.

Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ obliczono zgodnie ze wzorem (33):

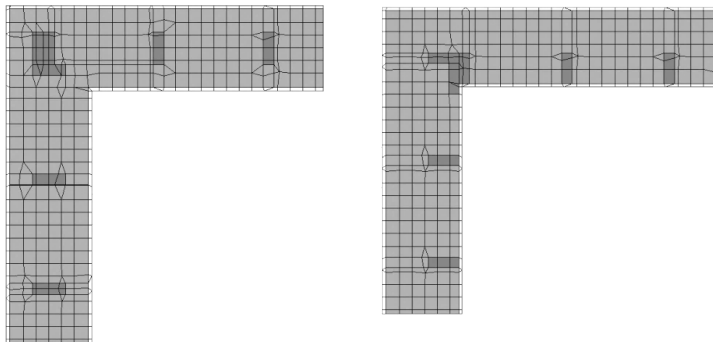
$$\psi = L^{2D} - \sum_{i=1}^j U_i \cdot l_i \quad (33)$$

gdzie: L^{2D} – współczynnik sprzężenia cieplnego uzyskany z analizy 2D modelowanego elementu [W/(m·K)], U_i – współczynnik przenikania ciepła i -tego komponentu modelowanego elementu [W/(m²·K)], l_i – długość przypisana do wartości współczynnika U_i [m].

Na rysunkach 13.11 i 13.12 przedstawiono wygenerowane siatki elementów skończonych dla przykładowych spośród analizowanych ścian i naroży (wariant 1). Wielkość pól w siatce wpływa na dokładność wyników. Zagęszczenie siatki zwiększa dokładność obliczeń. Błąd oszacowania uśrednionego współczynnika przenikania ciepła w analizie nie wynosi więcej niż 3%.



Rys. 13.11. Siatki elementów skończonych w modelach ścian przyjęte do obliczeń



Rys. 13.12. Siatki elementów skończonych w modelach narożników zewnętrznych przyjęte do obliczeń

Właściwości cieplne materiałów i elementów zastosowanych przy modelowaniu wraz z warunkami brzegowymi zestawiono w tabelach 13.5 oraz

13.6. Temperaturę zewnętrzną przyjęto jako średnią dla miesiąca stycznia, dla miejscowości Lublin.

Tabela 13.5. Właściwości cieplne głównych materiałów i elementów

Material budowlany/element	λ [W/(m·K)]
Kompozyt wapienno-konopny	0,082–0,100
Drewniany element konstrukcyjny	0,16
Tynk wapienny	0,80
Tynk gliniany	0,91

Tabela 13.6. Warunki brzegowe przyjęte w obliczeniach

Powierzchnia	Temperatura [°C]	Opór przejmowania ciepła przez powierzchnię [(m²K)/W]	Typ
Wewnętrzna	+20	0,13	Uproszczony*
Zewnętrzna	-2,6	0,04	Uproszczony*
Wycięte panele	–	–	Adiabatyczny

* Uproszczony model oznacza, że konwekcyjna i radialna wymiana ciepła została opisana przez opór przejmowania ciepła przez powierzchnię.

Wyniki i dyskusja

W celu oceny wpływu obecności szkieletu drewnianego w ścianie na jej współczynnik przenikania ciepła, w tabeli 13.7 przedstawiono współczynniki U ścian oraz naroży bez uwzględnienia obecności szkieletu. W tabelach 13.8–13.9 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionego współczynnika przenikania ciepła oraz liniowych współczynników przenikania ciepła ψ w analizowanych wariantach ścian oraz narożników. Uwzględniono lokalizację szkieletu, zastosowano różne wartości λ oraz różne grubości warstw kompozytu (jednakowy współczynnik przenikania ciepła).

Tabela 13.7. Współczynnik przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych oraz naroży zewnętrznych bez uwzględnienia drewnianej konstrukcji

Współczynnik przewodności cieplnej kompozytu [W/(m·K)]	Grubość warstwy kompozytu [mm]	Współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² ·K)]	
		Ściana	Węzeł naroża
0,082	410	0,1923	0,1529
0,088	440	0,1923	0,1506
0,094	470	0,1923	0,1482
0,100	500	0,1923	0,1460

Tabela 13.8. Ściany zewnętrzne: uśredniony współczynnik przenikania ciepła oraz liniowy współczynnik przenikania ciepła, pokazujące wpływ lokalizacji drewnianego szkieletu

Współczynnik przewodności cieplnej kompozytu [W/(m·K)]	Grubość warstwy kompozytu [mm]	Uśredniony współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² ·K)]		Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [W/(m·K)]	
		Pozycja drewnianego szkieletu		Pozycja drewnianego szkieletu	
		centralnie	po wewnętrznej stronie	centralnie	po wewnętrznej stronie
0,082	410	0,1976	0,1979	0,0027	0,0028
0,088	440	0,1966	0,1968	0,0022	0,0023
0,094	470	0,1958	0,1960	0,0018	0,0019
0,100	500	0,1952	0,1953	0,0015	0,0015

Tabela 13.9. Narożniki zewnętrzne: uśredniony współczynnik przenikania ciepła oraz liniowy współczynnik przenikania ciepła

Współczynnik przewodności cieplnej kompozytu [W/(m·K)]	Grubość warstwy kompozytu [mm]	Uśredniony współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² ·K)]		Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [W/(m·K)]	
		Pozycja drewnianego szkieletu		Pozycja drewnianego szkieletu	
		centralnie	po wewnętrznej stronie	centralnie	po wewnętrznej stronie
0,082	410	0,1574	0,1631	-0,121	-0,112
0,088	440	0,1542	0,1599	-0,129	-0,121
0,094	470	0,1511	0,1570	-0,137	-0,130
0,100	500	0,1484	0,1544	-0,145	-0,139

W tabelach 13.10 i 13.11 przedstawiono wyniki obliczeń uśrednionego współczynnika przenikania ciepła oraz liniowych mostków termicznych dla ścian i naroży w dwóch wariantach lokalizacji szkieletu, w których zastosowano jeden kompozyt ($\lambda = 0,082 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) przy zmiennej grubości ścian (różne wartości współczynnika U). W przypadku ścian, współczynnik U liczony jest dla powtarzalnego elementu (dla obszaru pełnego rozstawu słupów), natomiast w narożu dla całej długości zamodelowanego naroża w rzucie.

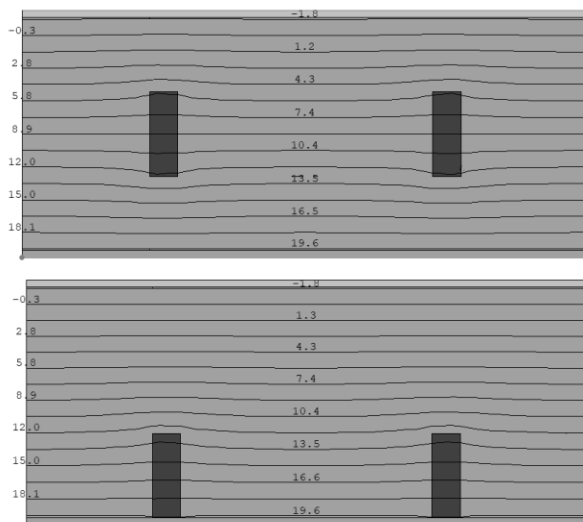
Tabela 13.10. Ściany zewnętrzne: uśredniony współczynnik przenikania ciepła oraz liniowy współczynnik przenikania ciepła, pokazujące wpływ lokalizacji drewnianego szkieletu

Współczynnik przewodności cieplnej kompozytu [W/(m·K)]	Grubości warstw [m] (tynk/kompozyt/tynk)	Uśredniony współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² ·K)]		Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [W/(m·K)]	
		Pozycja drewnianego szkieletu		Pozycja drewnianego szkieletu	
		centralnie	po wewnętrznej stronie	centralnie	po wewnętrznej stronie
0,082	0,015/ 0,41/ 0,015	0,1976	0,1979	0,0027	0,0028
	0,015/ 0,44/ 0,015	0,1843	0,1845	0,0023	0,0024
	0,015/ 0,47/ 0,015	0,1726	0,1728	0,0020	0,0021
	0,015/ 0,50/ 0,015	0,1624	0,1626	0,0018	0,0019

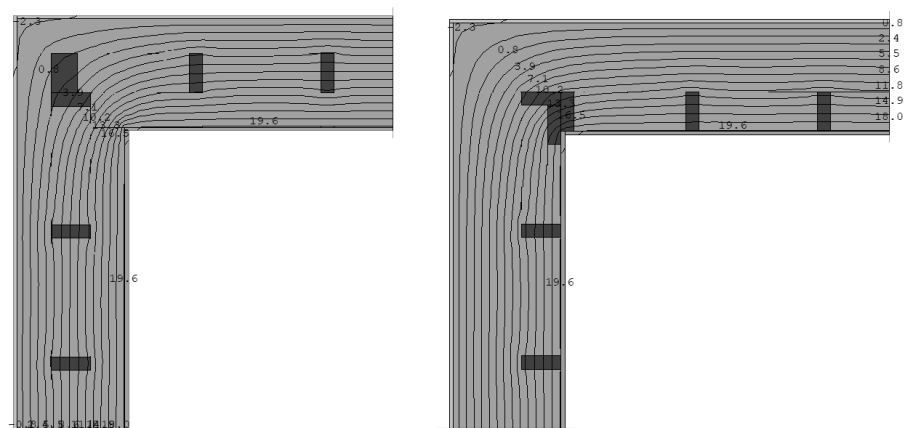
Tabela 13.11. Narożniki zewnętrzne: uśredniony współczynnik przenikania ciepła oraz liniowy współczynnik przenikania ciepła

Współczynnik przewodności cieplnej kompozytu [W/(m·K)]	Grubości warstw [m] (tynk/kompozyt/tynk)	Uśredniony współczynnik przenikania ciepła [W/(m ² ·K)]		Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [W/(m·K)]	
		Pozycja drewnianego szkieletu		Pozycja drewnianego szkieletu	
		centralnie	po wewnętrznej stronie	centralnie	po wewnętrznej stronie
0,082	0,015/ 0,41/ 0,015	0,1574	0,1631	-0,1211	-0,1122
	0,015/ 0,44/ 0,015	0,1445	0,1502	-0,1211	-0,1126
	0,015/ 0,47/ 0,015	0,1333	0,1391	-0,1208	-0,1127
	0,015/ 0,50/ 0,015	0,1235	0,1293	-0,1207	-0,1133

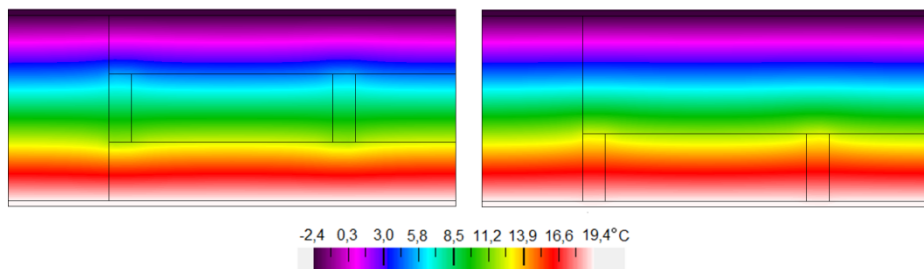
W programie możliwe jest przedstawianie wyników rozkładu temperatury w przegrodzie w postaci izoterm lub w skali barwnej. Na rysunkach 13.13–13.16 przedstawiono graficznie wyniki dla jednego z analizowanych wariantów (wariant 1) w ścianach zewnętrznych oraz narożach zewnętrznych o dwóch układach szkieletu drewnianego. Z uwagi na trudno dostrzegalne różnice w rozkładzie temperatury na przykładzie izoterm oraz map w skali barwnej pomiędzy analizowanymi przypadkami, w rozdziale zawarto jedynie przykładowe obrazy.



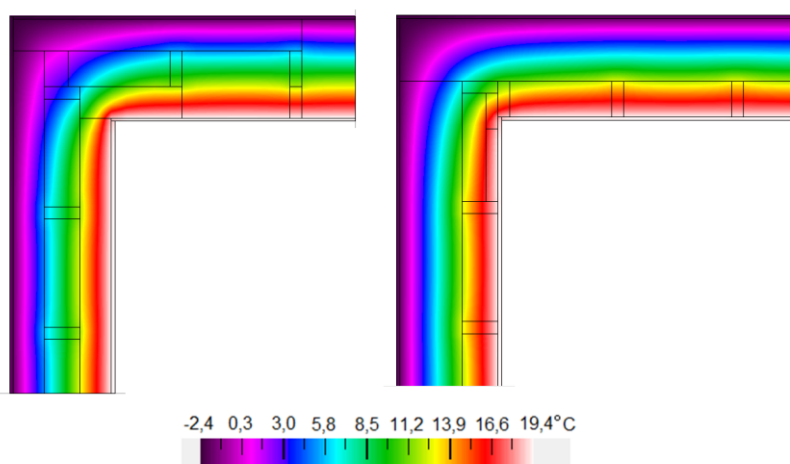
Rys. 13.13. Rozkład izoterm w dwóch konfiguracjach ścian zewnętrznych (wariant 1): Grubość warstwy kompozytu 410 mm, $\lambda=0,082 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$



Rys. 13.14. Rozkład izoterm w dwóch konfiguracjach naroży (wariant 1): Grubość warstwy kompozytu 410 mm, $\lambda=0,082 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$



Rys. 13.15. Mapa rozkładu temperatury w dwóch konfiguracjach ścian zewnętrznych (wariant 1):
Grubość warstwy kompozytu 410 mm, $\lambda=0,082$ W/(m·K)



Rys. 13.16. Mapa rozkładu temperatury w dwóch konfiguracjach narożników zewnętrznych
(wariant 1): Grubość warstwy kompozytu 410 mm, $\lambda = 0,082$ W/(m·K)

Przewodnictwo cieplne drewna jest wyższe niż kompozytu wapienno-konopnego. Obecność drewnianych słupów w przegrodzie zwiększyło jej współczynniki przenikania ciepła U o 1,5–2,9% (ściany) oraz o 1,6–6,7% (węzeł naroża) w porównaniu z przegrodą bez elementów drewnianych. Może to być związane z mniejszym gradientem temperatury w przekroju poprzecznym słupów. Są one minimalnym mostkiem termicznym – liniowy współczynnik przenikania ciepła zmienia się od 0,0015 W/(m·K) do 0,0028 W/(m·K) w ścianach. Współczynnik ψ w narożach zewnętrznych przyjmuje wartości ujemne w zakresie od -0,1122 W/(m·K) do -0,1452 W/(m·K). Wartości współczynnika ψ w ścianach wydają się być niewielkie, jednak należy pamiętać o tym, że słupy w konstrukcji mają zwykle długość rzędu kilku metrów, jak również osiowy rozstaw słupów jest nieduży – 500 mm. Pomimo różnych wartości lambda kompozytu wapienno-

-konopnego (0,082–0,100 W/(m·K)), analizowane przegrody charakteryzują się porównywalnym współczynnikiem przenikania ciepła (około 0,20 W/(m²K)), z uwagi na różne przyjęte grubości przegród, co było założeniem obliczeń. W wyniku tego, elementy drewniane stanowią liniowe mostki cieplne na podobnym poziomie, bez zauważalnej zależności od przewodności cieplnej kompozytu. Pomimo różnic pomiędzy właściwościami cieplnymi głównych komponentów (słup i kompozyt), czynnikiem decydującym o zbliżonych wartościach ψ była grubość warstwy kompozytu i współczynnik U . Inne wnioski wynikają z przeprowadzonej analizy ścian i naroży z użyciem jednego rodzaju kompozytu ($\lambda = 0,082$ W/(m·K)) w zależności od grubości jego warstwy (410–500 mm). W tym przypadku wraz ze wzrostem grubości ściany, czyli zmniejszeniem współczynnika przenikania ciepła wpływ liniowych mostków cieplnych jest mniejszy, dlatego że w przekroju zwiększa się udział materiału o mniejszej wartości przewodności cieplnej. Uśredniony współczynnik U wraz ze wzrostem grubości ściany zmienia się od około 0,20 W/(m²K) do około 0,16 W/(m²K) w ścianie zewnętrznej oraz od około 0,16 W/(m²K) do około 0,12 W/(m²K) w narożniku zewnętrznym. W ścianie zewnętrznej liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ wyniósł 0,0018–0,0028 W/(m·K) i malał wraz ze wzrostem grubości ściany.

Ustawienie konstrukcji drewnianej w środku ściany jest minimalnie lepszym rozwiązaniem w odniesieniu do właściwości izolacyjnych. Współczynnik przenikania ciepła U jest niższy dla tego rozwiązania o 0,05% do 0,15%, a wartości ψ są niższe w przypadku środkowego ustawienia słupów o mniej niż 5,5%. W przypadku węzła naroża zewnętrznego, różnica jest bardziej widoczna – współczynnik przenikania ciepła U dla wariantów z konstrukcją umieszczoną centralnie jest mniejszy o 3,5–4,5% w porównaniu z uzyskanymi wartościami w wariantach z konstrukcją zlokalizowaną po wewnętrznej stronie ściany. Różnice pomiędzy wartościami ψ w dwóch wariantach lokalizacji szkieletu wynoszą od 6,1% do 7,4% na korzyść środkowej lokalizacji konstrukcji drewnianej. W przypadku analizy wariantu różnych grubości ścian przy jednakowym współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda=0,082$ W/(m·K) zauważyć można podobną zależność – współczynnik U ściany z konstrukcją umieszczoną w środku jest niższy o około 0,11–0,15% w porównaniu ze ścianą z konstrukcją po wewnętrznej stronie. W przypadku całego węzła (naroża) różnica wynosi również około 3,4–4,5%. Wartości ψ są niższe w przypadku środkowego ustawienia słupów w ścianie o 3,4–5,3%, natomiast w węźle naroża są mniejsze o 6,5% do 7,9%.

14. Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania surowców z polskich upraw konopi włóknistych. Badano i poddano ocenie odmianę konopi Białobrzeskie, pochodzące z dwóch źródeł, od dwóch producentów. Stosowność wykorzystania paździerzy konopnych jako składnik materiału budowlanego – kompozytu wapienno-konopnego związana jest ze zrównoważonym rozwojem w budownictwie. Zdrewniałe części łodyg konopi włóknistych przez wielu rolników traktowane były jako odpady, a sprzedawane były głównie jako wyściółki dla zwierząt.

Niski ciężar, wysoka porowatość oraz dobre parametry termoizolacyjne paździerzy konopnych decydują o zasadności ich wykorzystania jako wypełniacz w izolacyjnych materiałach ściennych. Paździerze są wydajnym materiałem – na 1 m³ mieszanki wapienno-konopnej wykorzystywanych jest około 125 kg paździerzy. Z 1 hektara upraw możliwe jest do uzyskania około 6–7 ton paździerzy, czyli 48–56 m³ mieszanki. Taka ilość wystarczy do wykonania ścian zewnętrznych w domu jednorodzinny parterowym o powierzchni zabudowy około 80–100 m².

Zastosowane spoiwo składało się głównie z wapna hydratyzowanego, czyli materiału naturalnego i paroprzepuszczalnego, zabezpieczającego paździerze i konstrukcję drewnianą przed korozją biologiczną, a także biodegradowalnego (może również po rozbiórce stanowić nawóz w celu odkwaszenia ziemi). Wapno jest spoiwem dostępnym lokalnie, produkowanym w Polsce. Lokalne pozyskanie materiałów było jednym z założeń pracy. Zdecydowano się na wykorzystanie jako dodatku powszechnie dostępnego spoiwa, czyli cementu portlandzkiego. Jednak w takiej ilości, która nie ograniczy paroprzepuszczalności. Kolejny dodatek w postaci pucolany (metakaolin), zapewniającej częściowe właściwości hydrauliczne spoiwa w kompozycie, jest również produkowany i dostępny w Polsce. Literatura zagraniczna często podaje badania oparte na komercyjnym spoiwie przeznaczonym do wykonywania kompozytu wapienno-konopnego, jednak w Polsce jest ono dostępne jedynie po sprowadzeniu, a także posiada wysoką cenę.

Częściowe zamienniki paździerzy konopnych, czyli paździerze lniane oraz perlit ekspandowany pozyskano z polskich upraw oraz polskich składów budowlanych.

Wykorzystując paździerze konopne w przyjętych do badań proporcjach względem masy spoiwa od 1:1,4 do 1:2 otrzymano kompozyty wapienno-konopne o gęstości objętościowej od 397,7 do 483,5 kg/m³. Pod względem gęstości objętościowej, kompozyt można porównać do autoklawizowanego betonu komórkowego, który jest wykorzystywany jako materiał ścienny nośny. Jednak wytrzymałość ABK o gęstości 300 kg/m³ wynosi 1,5 MPa. Wg normy EN 771-4 najniższa wytrzymałość na ściskanie ABK nie powinna być niższa niż 1 MPa. Najwyższa wytrzymałość na ściskanie spośród badanych kompozytów

wyniosła 0.85 MPa. Dlatego autor zaznacza, że kompozyt wapienno-konopny nie nadaje się jako materiał nośny, lecz jako wypełnienie ścian w drewnianej konstrukcji szkieletowej, głównie z uwagi na dobre parametry termoizolacyjne. W przypadku kompozytu wapienno-konopnego istotne jest zachowanie materiału podczas obciążania. W przeciwieństwie do materiałów sztywnych i twardych takich jak beton zwykły, zniszczenie kompozytu nie następuje w sposób eksplozywny, lecz podczas wzrastającego obciążenia, materiał odkształca się, ugina (do pewnego momentu bez widocznych pęknięć) i kompresuje – porowata struktura ulega zagęszczeniu.

Właściwości termoizolacyjne badanych kompozytów określone parametrem λ wyniosły od 0,082 do 0,122 W/(m·K). Na wartość wpływ miała przede wszystkim proporcja spoiwa do wypełniacza (im więcej spoiwa tym słabsza izolacyjność termiczna), ale również poszczególne składniki mieszanki. Najlepszymi parametrami charakteryzowały się kompozyty z największą zawartością paździerzy konopnych. Wraz ze wzrostem zawartości paździerzy lnianych wzrastała wartość współczynnika przewodności cieplnej, natomiast wraz ze wzrostem zawartości perlitu ekspandowanego – malała.

Materiały budowlane mające porowatą strukturę, nie poddane zabiegom hydrofobizacji, charakteryzują się wysoką nasiąkliwością. Kompozyt wapienno-konopny wykazał w badaniach nasiąkliwość wagową rzędu 89,3–148,3%. Istotna jest nasiąkliwość wczesna – po 5 sekundach od zanurzenia w wodzie kompozyt wykazał nasiąkliwość masową rzędu 28–67%. Właściwość ta jest ważna w przypadku np. oddziaływania deszczu. Jednak warstwa zewnętrznego tynku wapiennego oraz odpowiednio wysunięty okap zabezpieczą powierzchnię materiału przed bezpośrednim kontaktem z wodą.

Kompozyt wapienno-konopny z uwagi na wysoką paroprzepuszczalność ($\mu = 5,52\text{--}5,95$) jest korzystnym materiałem dla ścian zewnętrznych, przy zachowaniu odpowiednich okładzin zewnętrznych i wewnętrznych, zapewniających otwartość dyfuzyjną całej przegrody np. tynk gliniany oraz wapienny, które zastosowano w analizie. Nie jest wskazane stosowanie okładzin zewnętrznych znacząco ograniczających otwartość dyfuzyjną, np. tynk cementowo-wapienny czy cementowy.

Z uwagi na dobre właściwości termoizolacyjne, materiał ten przeznaczony jest głównie do ścian zewnętrznych, dlatego też rozważano możliwość wystąpienia kondensacji. Przy zastosowaniu analizowanych kompozytów jako materiałów ściennych w ścianach zewnętrznych, stosując się do obecnych wymagań cieplnych stawianych ścianom zewnętrznym ($U \leq 0,20$ W/(m²K)), ryzyko kondensacji powierzchniowej oraz międzywarstwowej nie występuje. Ma to związek z tym, że na całej grubości ściany występuje materiał o wysokiej paroprzepuszczalności oraz dobrej izolacyjności termicznej. Wykończenie ściany stanowią tynki naturalne, które nie stanowią bariery dla dyfuzji pary wodnej. Największe ryzyko wystąpienia kondensacji międzywarstwowej występuje

w grudniu, w strefie styku tynku zewnętrznego z kompozytem w ścianie o najmniejszej grubości.

Z analiz mostków termicznych w ścianie wynika, że konstrukcja drewniana nie stanowi znaczącego wpływu na zwiększony przepływ ciepła. Konstrukcja drewniana umieszczona po wewnętrznej stronie ściany stanowi większy mostek termiczny w przegrodzie, jednak różnice są nieznaczne. Można stwierdzić zatem, że decyzja o lokalizacji osi szkieletu drewnianego w ścianie uzależniona powinna być bardziej względami technologicznymi niż kwestiami ograniczenia strat ciepła. Przedstawione w analizie przekroje, rozstawy elementów drewnianych są typowe w budownictwie mieszkalnym, dlatego uzyskane wyniki mogą być pomocne do oceny efektywności energetycznej podczas projektowania domów mieszkalnych w tej technologii.

Przeprowadzone badania własne mogą być pomocne w praktycznych zastosowaniach w przypadku wykonywania przegród ściennych zewnętrznych na bazie kompozytu wapienno-konopnego, jednak potrzebne są kontynuacje badań nad materiałem w innych aspektach.

15. Wnioski końcowe

Możliwe jest wykonanie kompozytów na bazie paździerzy pozyskanych z plonów polskich upraw konopi przemysłowych i lnu włóknistego oraz ogólnie dostępnych składników spoiwa na bazie wapna hydratyzowanego o właściwościach porównywalnych do kompozytów opisanych w literaturze, przygotowanych na innych rodzajach paździerzy oraz spoiwie (np. komercyjnym). Nie jest zatem konieczne stosowanie wyłącznie certyfikowanych produktów sprzedawanych jako przeznaczone do tego rodzaju budownictwa. Raporty oceny cyklu życia przytoczone w przeglądzie literatury potwierdzają korzystny bilans CO₂ kompozytów wapienno-konopnych, co jest zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury oraz przeprowadzonych analiz rezultatów badań przedstawionych w niniejszej pracy sformułowano wnioski końcowe, będące odniesieniem do postawionych w pracy celów:

Wnioski będące odpowiedzią na cel szczegółowy dotyczący wpływu rodzaju, zawartości oraz długości frakcji paździerzy, na właściwości kompozytu wapienno-konopnego:

- W pracy zastosowano dwa rodzaje paździerzy konopnych różniące się procentową zawartością paździerzy o różnych długościach oraz paździerze lniane charakteryzujące się największym rozdrobnieniem. Wykazano wpływ stosowania różnych długości paździerzy oraz ich zawartości w składzie kompozytu na jego właściwości.
- Formowanie próbek z mieszanek wapienno-konopnych zawierających paździerze konopne *K1*, było bardziej problematyczne aniżeli z mieszanek zawierających paździerze *K2*, z powodu większego zróżnicowania długości, oraz zawartości paździerzy o długości powyżej 30 mm. Frakcje o największych długościach utrudniały właściwe zagęszczenie mieszanki, czego efektem były wolne przestrzenie między nimi, a tym samym trudności w zachowaniu jednorodności próbek. Negatywnym następstwem tego zjawiska był m.in. wzrost nasiąkliwości.
- Paździerze konopne o małych frakcjach, a także paździerze lniane zwiększają zapotrzebowanie mieszanki na spoiwo oraz wodę, czego efektem jest wzrost gęstości stwardniałego kompozytu (większy udział masy spoiwa oraz większa podatność na zagęszczenie). Negatywnym następstwem tego zjawiska był spadek izolacyjności termicznej, natomiast pozytywnym spadek nasiąkliwości materiału.
- Zmiany w proporcji wagowej paździerzy do spoiwa powodowały najbardziej zauważalne zmiany w poszczególnych właściwościach kompozytu wapienno-konopnego. Na przykładzie badania wartości współczynnika przewodzenia ciepła wszystkich receptur kompozytu, różnice w wartości współczynnika

między kompozytami zawierającymi największą zawartość paździerzy, a tymi zawierającymi najmniejszą ich ilość wynosiła od 9,3% do 38,6%. Największe różnice (powyżej 30%) wystąpiły w *Serii 1*, zawierającej paździerz o dłuższych frakcjach (*KI*).

Wnioski będące odpowiedzią na cel szczegółowy dotyczący wpływu perlitu ekspandowanego na właściwości kompozytu wapienno-konopnego:

- Częściowe zastąpienie paździerzy konopnych *KI* perlitem ekspandowanym wpłynęło na właściwości kompozytu. Dowiedziono, iż stosując perlit w odpowiednich proporcjach w stosunku do paździerzy konopnych, możliwe jest uzyskanie w praktyce pożądaných właściwości. Różnice w wartościach poszczególnych właściwości pomiędzy recepturami nie są jednak znaczne z uwagi na stosowanie jednakowej proporcji wagowej spoiwa do wypełniacza.
- Wraz ze wzrostem udziału perlitu w składzie kompozytu, wzrasta jego gęstość objętościowa. Zastąpienie paździerzy perlitem w ilości 50% (względem całkowitej masy wypełniacza) spowodowało wzrost gęstości o 6,6% w stosunku do kompozytu zawierającego najmniejszą ilość perlitu (20% wagowo). Wzrost gęstości spowodowany był częściowym wypełnieniem wolnych przestrzeni pomiędzy paździerzami kruszywem perlitowym.
- Wraz ze wzrostem udziału perlitu w kompozycie nastąpił spadek przewodności cieplnej wyrażonej współczynnikiem λ . Kompozyt zawierający największą ilość perlitu charakteryzuje się wartością współczynnika λ mniejszą o 9,2% w stosunku do kompozytu zawierającego najmniejszą ilość perlitu. Spadek przewodności cieplnej może być spowodowany ograniczeniem przewodzenia ciepła przez konwekcję w największych wolnych przestrzeniach pomiędzy paździerzami, po częściowym wypełnieniu ich kruszywem ciepłochronnym. Uzyskane wartości λ świadczą o możliwości stosowania kompozytów zawierających perlit wg przedstawionych w pracy receptur do wykonywania ścian zewnętrznych spełniając obecne wymagania odnośnie współczynnika U przy grubościach nieprzekraczających 50 cm.
- Zwiększanie zawartości perlitu ekspandowanego spowodowało redukcję nasiąkliwości wagowej ze 135,4% do 110,8%. Ważną obserwacją jest zmniejszenie nasiąkliwości o blisko połowę w początkowych sekundach po zanurzeniu w wodzie próbek zawierających perlit w porównaniu z próbkami zawierającymi jedynie paździerz konopne (*Seria 1*), przy jednakowej proporcji wagowej spoiwa do wypełniacza. Jest to związane ze zmniejszeniem objętości wolnych przestrzeni pomiędzy paździerzami, wskutek częściowego wypełnienia ich perlitem.

Wnioski będące odpowiedzią na cel szczegółowy dotyczący wpływu paździerzylnianych na właściwości kompozytu wapienno-konopnego:

- Częściowe zastąpienie paździerzylnianych *KI* paździerzami lnianymi wpłynęło na właściwości kompozytu. Wykazano możliwość wykorzystania kolejnego odpadu pochodzącego z upraw rolnych, co jest zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju w budownictwie.
- Z uwagi na drobniejszą frakcję paździerzylnianych w porównaniu z paździerzami konopnymi *KI*, wraz ze wzrostem ich udziału w składzie kompozytu, wzrasta jego gęstość objętościowa. Całkowite zastąpienie paździerzylnianych lnianymi doprowadziło do wzrostu gęstości objętościowej o 15,5% w stosunku do kompozytu niezawierającego paździerzylnianych.
- Częściowe wypełnienie wolnych przestrzeni pomiędzy paździerzami konopnymi, drobniejszymi lnianymi, spowodowało, że struktura kompozytu była bardziej zwarta. Efektem tego był wzrost parametrów wytrzymałościowych i spadek nasiąkliwości wagowej. Kompozyty zawierające paździerzylniane wykazały najwyższą wytrzymałość na ściskanie (0,53–0,85 MPa) oraz na zginanie (0,098–0,239 MPa) spośród wszystkich przebadanych w ramach pracy receptur. Jest to istotny wniosek w aspekcie praktycznym, kiedy ważna jest nośność przegrody.
- Zwiększanie zawartości paździerzylnianych wpływa niekorzystnie na parametry cieplne kompozytu. Próbki zawierające 70% oraz 100% paździerzylnianych w stosunku do całkowitej masy wypełniacza charakteryzują się wartością współczynnika przewodności cieplnej $> 0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, co wyklucza zastosowanie kompozytu wg tych receptur jako materiału ściennego spełniającego obecne wymagania cieplne dla ścian zewnętrznych nie przekraczających 50 cm grubości.

Wnioski będące odpowiedzią na cel szczegółowy dotyczący oceny przydatności wykorzystania kompozytu wapienno-konopnego jako materiału ściennego na podstawie analizy cieplno-wilgotnościowej przegród:

- Możliwe jest wykonanie ściany zewnętrznej z kompozytu wapienno-konopnego wolnej od kondensacji pary wodnej, zarówno powierzchniowej jak i międzywarstwowej stosując receptury będące przedmiotem analiz. Wynika to z niskich wartości współczynników oporu dyfuzyjnego kompozytu ($\mu = 5,52\text{--}5,94$) oraz warstw wykończeniowych – tynku wapiennego oraz glinianego. W ścianach wykonanych w tej technologii nie występują materiały o skrajnie różniących się oporach dyfuzyjnych, co mogłoby zadecydować o kondensacji na styku pomiędzy tymi warstwami. Ponad 90% grubości ściany stanowi jeden materiał – kompozyt wapienno-konopny. Celem dokładniejszego przeanalizowania możliwości wystąpienia

niekorzystnych zjawisk wilgotnościowych w ścianie należałoby przeprowadzić symulację lub badania w warunkach rzeczywistych w cyklu dobowym lub godzinowym.

- W analizowanych układach warstw ścian zewnętrznych nie występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej. Współczynnik temperaturowy dla miesiąca krytycznego (styczeń) wyniósł 0,814 i jest on mniejszy od wartości współczynnika temperaturowego wyliczonego dla analizowanych wariantów przegród ($f_{R_{si}(0,25)} = 0,946-0,949$).
- Największe ryzyko wystąpienia kondensacji międzywarstwowej występuje na styku kompozytu wapienno-konopnego z tynkiem zewnętrznym w miesiącu grudzień. Jednak ciśnienie nasycenia pary wodnej w przekroju na styku warstwy kompozytu i tynku zewnętrznego jest w tym miesiącu w analizowanych przypadkach większe od ciśnienia cząstkowego o 11–24 Pa. Wraz ze wzrostem grubości ściany, pomimo zbliżonych wartości współczynnika U , zmniejszone jest ryzyko wystąpienia kondensacji międzywarstwowej.
- Strefa ujemnych temperatur w przegrodzie występuje w miesiącach grudzień – luty, a w miesiącu krytycznym (styczeń) wynosi od 58,8 mm do 73,2 mm, a jej głębokość wzrasta wraz ze wzrostem grubości warstwy kompozytu (410–500 mm) przy zachowaniu porównywalnego współczynnika przenikania ciepła przegrody ($U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Analizy ścian oraz węzłów w różnych konfiguracjach pod względem grubości warstwy kompozytu, usytuowania szkieletu oraz przewodności cieplnej kompozytu wykazały, że drewno stanowiące konstrukcję nie wpływa znacząco na podwyższenie uśrednionego współczynnika przenikania ciepła. Świadczy to o tym, że elementy te są nieznacznym mostkiem termicznym. Obecność elementów drewnianych zwiększa współczynnik przenikania ciepła U dla analizowanych przegród nie więcej jak o 6,7%. Należy jednak pamiętać, że w rzeczywistej ścianie słupy mają wysokość blisko 3 m, a ich rozstaw osiowy wynosi około 500 mm.
- W przypadku analizy mostków termicznych w przegrodach o różnej grubości warstw kompozytu (410–500 mm) oraz jednakowym współczynnikiem przenikania ciepła ($U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), słupy drewniane stanowią porównywalny mostek termiczny we wszystkich wariantach.
- Liniowy współczynnik przenikania ciepła w ścianach waha się w granicach 0,0015 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ do 0,0028 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, natomiast w węźle naroża zewnętrznego od -0,1122 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ do -0,1452 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.
- Lokalizacja szkieletu drewnianego w środku ściany jest minimalnie lepszym rozwiązaniem pod względem właściwości izolacyjnych przegrody. Współczynnik przenikania ciepła U jest niższy dla tego rozwiązania o 0,05% do 0,15%, (ściany) oraz o około 3.5% (naroża), a wartości ψ są niższe w przypadku środkowego ustawienia słupów o mniej niż 5,5% (ściany) oraz mniej niż 8% (naroża).

- W przypadku analizy mostków termicznych w przegrodach o różnej grubości warstw kompozytu (410–500 mm) oraz stałej wartości współczynnika przewodności cieplnej (0,082 W/(m·K)), liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ wyniósł w analizowanych ścianach 0,0018–0,0028 W/(m·K) i malał wraz ze wzrostem grubości ściany.

Literatura

- Allin S., *Building with hemp*. Seed Press, 2012.
- Amziane S., Arnaud L., *Bio-aggregate-based Building Materials*, ISTE, London, 2013.
- Anastaselos D., Giama E., Papadopoulos A.M., *An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions*, "Energy and Buildings", 2009, vol. 41/11, p. 1165–1171 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.003>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Andrejkovičová S., Velosa A., Gameiroc A., Ferraz E., Rocha F., *Palygorskite as an admixture to air lime–metakaolin mortars for restoration purposes*, "Applied Clay Science", 2013a, vol. 83–84, p. 368–374 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.07.020>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Andrejkovičová S., Velosa A.L., Rocha F., *Air lime–metakaolin–sepiolite mortars for earth based walls*, "Construction and Building Materials", 2013b, vol. 44, p.133–141 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.008>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Arizzi A., Cultrone G., Brümmer M., Viles H., *A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing*, "Construction and Building Materials", 2015, vol. 75, p. 375–384 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.026>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Arnaud L.: *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, John Wiley & Sons, 2013.
- Arnaud L., Gourlay E., *Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes*, "Construction and Building Materials", 2012 vol. 28/1, p. 50–56 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Asdrubali F.: *Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control*. W: Proceedings of Euronoise, Tampere, Finland, 2006.
- Asdrubali F.: *The role of Life Cycle Assessment (LCA) in the design of sustainable buildings: thermal and sound insulating materials*. W: Proceedings of Euronoise, Edinburg, Scotland, 2009.
- Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov K.V., *A review of sustainable materials for acoustic applications (Review)*, "Building Acoustics", 2012, vol. 19, no. 4, p. 283–312 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1260/1351-010X.19.4.283>
- Balčiūnas G., Vėjelis S., Vaitkus S., Kairytė A., *Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials*, "Procedia Engineering", 2013, vol. 57, p. 159–166 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.023>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Balčiūnas G., Vėjelis S., Lekūnaitė L., Kremensas A., *Assessment of structure influence on thermal conductivity of hemp shives composite*, "Environmental Engineering and Management Journal", 2016, vol. 15/3, p. 699–705 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.075>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Barclay M., Holcroft N., Shea A.D., *Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings*, "Building and Environment", 2014, vol. 80,

- p. 204–212 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.003>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Brzyski P., *Properties of Hemp-Flax Composites for Use in the Building Industry*, “Journal of Natural Fibers”, 2017, vol. 14, p. 410–425 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Fic S., *Mechanical and thermal properties of hemp-lime composites*, “Composites Theory and Practice”, 2015, vol. 1, p. 21–27.
- Ben-Nakhi A.E., *Development of an integrated dynamic thermal bridging assessment environment*, “Energy and Building”, 2003, vol. 35, p. 375–82 [dostępne on-line], DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00106-8), [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Benfratello S., Capitano C., Peri G., Rizzo G., Scaccianocce G., Sorrentino G., *Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite*, “Construction and Building Materials”, 2013, vol. 48, p. 745–754 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Berge B.: *The ecology of building materials (2nd ed.)*, Architectural Press, Oxford, UK, 2009.
- Bevan R., Woolley T.: *Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites*, Bracknell, 2010.
- Bogacz E., Kicińska-Jakubowska A., Zimmiewska M., Romanowska B., *Charakterystyka włókien lykowych*, „Len i Konopie, Biuletyn Informacyjny Polskiej Izby Lnu i Konopi”, 2012, vol. 19, p. 37–44.
- Boutin M.P., Flamin C., Quinton S., Gosse G., Inra L.: *Étude: des caracteristiques environnementales du chanvre par l’analyse de son cycle de vie [Study of environmental characteristics of hemp by means of an analysis of its lifecycle]*. Ministère de l’Agriculture et de la Pêche [Ministry of Agriculture and Fishery], 2005.
- Bribian I.Z., Capilla A.V., Uson A.A., *Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential*, “Building and Environment”, 2011, vol. 46, no. 5, p. 1133–1140 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Brigitte de Bruijn P., Jeppsson K.H., Sandin K., Nilsson C., *Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres*, “Biosystems Engineering”, 2009, vol. 103, no. 4, p. 474–479 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Broutman L., Krock R.: *Modern Composites Materials*, A.D. Publishing Company, California, 1967.
- Brzyski P., *Risk assesment of water vapor condensation in wall made of hemp-lime composite*, “Architecture Civil Engineering Environment”, 2016, vol. 2, p. 47–56 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.21307/acee-2016-021>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Brzyski P., *Wpływ dodatków mineralnych na konsystencję i wytrzymałość zapraw wapiennych*, „Materiały Budowlane”, 2017, vol. 6
- Brzyski P., Barnat-Hunek D., Suchorab Z., Łagód G., *Composite Materials Based on Hemp and Flax for Low-Energy Buildings*, “Materials”, 2017a, vol. 10, no. 5, 510 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10050510>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].

- Brzyski P., Barnat-Hunek D., Fic S., Szelaż M., *Hydrophobization of Lime Composites with Lignocellulosic Raw Materials from Flax*, “Journal of Natural Fibers”, 2017b, vol. 14, no. 5, p. 609-620 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1250024>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Brzyski P., Fic S., *Kondensacja w przegrodzie ściennej z kompozytu wapienno-konopnego – ocena możliwości wystąpienia*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA”, 2016 vol. XXXIII, z. 63/4/16, p. 33–42
- BRE Global 2009, Fire resistance test in accordance with BS EN 1365-1:1999 on a Lime Technology Ltd, 3 m × 3 m Tradical®Hemcrete®loaded wall, Test Report No. 250990.
- Badanie współczynnika przewodzenia ciepła kostek słomy, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2015.
- Cabeza F.L., Barreneche C., Miró L., Morera J.M., Bartolí E., Fernández A.I., *Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2013, vol. 23, p. 536–542 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Cappelletti F., Corrado V., Gasparella A., Gorrino A., *Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings*, In: CLIMA 2010, 10th Rehva World Congress “Sustainable Energy Use in Buildings”, Antalya, 9–12 May, 2010.
- Cappelletti F., Gasparella A., Romagnoni P., Baggio P., *Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls*, “Energy and Buildings”, 2011, vol. 43, p. 1435–1442 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.004>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Cerezo V.: *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique* Saint Valérien. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon; 2005.
- Citterio M., Cocco M., Erhorn-Kluttig H.: *Thermal bridges in the EBPD context: overview on MS approaches in regulations*, In: ASIEPI information paper, 2008.
- Collet F., Chamoin J., Pretot S., Lanos C., *Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes*, “Energy and Buildings”, 2013, vol. 62, p. 294–303 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Collet F., Pretot S., *Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content*, “Construction and Building Materials”, 2014, vol. 65, p. 612–619 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Cripps A., Handyside A., Dewar L., Fovargue J.: *Crops in construction handbook*, London, UK: CIRIA, 2004.
- Daly P., Ronchetti P., Woolley T.: *Hemp Lime Bio-composite as a Building Material in Irish Construction*, STRIVE Report 2009-ET-DS-2-S2, Environmental Protection Agency, Wexford, Ireland, 2009.
- Degrave-Lemeurs M., Gle P., de Menibus A.H., *Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders*, “Construction and Building Materials”, 2018, vol. 160, p. 462–474 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].

- Ding J.T., Li Z.: *Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete*, *Acı Materials Journal*, Technical Paper 99-M39, 2002.
- Dylla A.: *Fizyka cieplna budowli w praktyce. Obliczenia cieplno-wilgotnościowe*. Warszawa, PWN, 2015.
- Dylla A.: *Praktyczna fizyka cieplna budowli*, Bydgoszcz, Wydawnictwa uczelniane UTP, 2009.
- Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L., *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process*, "Construction and Building Materials", 2008, vol. 22, p. 2116–2123 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Evola G., Margani G., Marletta L., *Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate*, "Energy and Buildings", 2011, vol. 43, p. 2385–93 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.028>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Evrard A.: *Sorption behaviour of Lime-Hemp Concrete and its relations to indoor comfort and energy demand*, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, 2006.
- Fic S., Brzyski P., Szelaǳ M.: *Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry*, "Ecological and Chemistry Engineering. A", 2013, vol. 7–8, p. 25–31 [dostępne on-line], DOI: [https://doi.org/10.2428/ecea.2013.20\(07\)084](https://doi.org/10.2428/ecea.2013.20(07)084), [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Fic S., Brzyski P., *Badanie kompozytu opartego na lekkich wypełniaczach (len i perlit) do zastosowań w budownictwie jako materiał ścienny*, „Przegląd Budowlany”, 2015a, vol. 2, p. 30–35.
- Fic S., Brzyski P., Szewczak A., Jarosz-Hadam M., *Wybrane właściwości lekkich kompozytów na bazie wypełniaczy celulozowych do zastosowania w budownictwie ekologicznym*, „Czasopismo Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury, JCEEA”, 2015b vol. XXXII, z. 62/2/15, p. 61–70.
- Gameiro A., Santos Silva A., Faria P., Grilo J., Branco T., Veiga R., Velosa A., *Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder: aggregate ratio*, "Cement & Concrete Composites", 2014, vol. 45, p. 264–271 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Gao Y., Roux JJ., Zhao LH., Jiang Y., *Dynamical building simulation: a low order model for thermal bridges losses*, "Energy and Building", 2008, vol. 40, p. 2236–2243 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.003>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Garcia-Gonzales S., Hospido A., Feijoo G., Moreira M.T., *Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills: Hemp and flax*, "Resources Conservation and Recycling". 2010, vol.54, no. 11, p. 923–930 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.011>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Gartner E., *Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements*, "Cement and Concrete Research", 2004, vol. 34, no. 9, p. 1489–1498 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].

- Gherghisan A.M, Cismaru I., *Research concerning the influence of matrix in hemp hurds composites on thermal conductivity*, “Pro Ligno”, 2013, vol. 9, p. 26–33.
- Glé P., Gourdon E., Arnaud L., *Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity*, “Applied Acoustics”, 2011, vol. 72, no. 5, p. 249–259 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Glouannec P, Collet F, Lanos P, Mounanga C, Pierre T, Poullain P., *Propriétés physiques de bétons de chanvre*, “Materials Technology”, 2011, vol. 99, p. 657–65 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1051/mattech/2011047>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Gourlay E, Arnaud L.: *Comportement hygrothermique des murs de béton de chanvre*. In: Proceedings of the Actes du congrès SFT, France, Le Touquet, 2010.
- Grelat A.: *Utilisation des matériaux renouvelables en parois de maisons individuelles à ossature bois. Rapport final de l'Annexe 3 – Expérimentations en laboratoire, Instrumentation in situ*. Fédération Française Du Bâtiment, France, 2005.
- Gümüşkaya E., Usta M., Balaban M., *Carbohydrate components and crystalline structure of organosolv hemp (Cannabis sativa L.) bast fibers pulp*, “Bioresource Technology”, 2007, vol. 98, p. 491–497 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.031>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Hirst E, Walker P, Paine K, Yates T., *Characterisation of low density hemp-lime composite building materials under compression loading*. In: The 2nd international conference on sustainable construction materials and technologies, Italy, 2010.
- Ingrao C., Lo Giudice A., Bacenetti J., Tricase C., Dotelli G., Fiala M., Siracusa V., Mbohwa C., *Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2015, vol. 51, p. 29–42 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Ingrao C., Lo Giudice A., Tricase C., Rana R., Mbohwa C., Siracusa V., *Recycled-PET fibre based panels for building thermal insulation: Environmental impact and improvement potential assessment for a greener production*, “Science of the Total Environment”, 2014, vol. 493, p. 914-929 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.022>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Ip K., Miller A., *Life cycle greenhouse gas emissions of hemp—lime wall constructions in the UK*, “Resources, conservation and recycling A”, 2012, vol. 69, p. 1–9 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Jasiczak J., Mikołajczak P.: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Alma Mater, Poznań, 2003.
- Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S., *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?*, “Composites Part A: Applied Science and Manufacturing”, 2004, vol. 35, p. 371–376 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Kaynakli O., *A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2012, vol. 16/1, p. 415–425 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].

- Kidalova L., Terpakova N.E., Sicakova A., *Use of magnesium oxide-cement binder in composites based on hemp shives*, "Journal of Environmental Science and Engineering", 2011, vol. 5, p. 736–741 [dostępne on-line], DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ct.67.1.15000>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Kinnane O., Reilly A., Grimes J., Pavia S., Walker R., *Acoustic absorption of hemp-lime construction*, "Construction and Building Materials", 2016, vol. 122, p. 674–682 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Kotwica Ł., Pichór W., Kapelusznia E., Różycka A., *Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material*, "Journal of Cleaner Production", 2017, vol. 140, no. 3, p. 1344–1352 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.018>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Kuklik P.: Odporność ogniowa konstrukcji drewnianych, rozdział w podręczniku pt. Konstrukcje drewniane, Projekty pilotażowe Leonardo da Vinci, 2008.
- Latif E., Ciupala M.A., Wijeysekera D.C., *The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels*, "Construction and Building Materials", 2014, vol. 73, p. 205–213 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.060>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Lawrence M., Heath A., Walker P., *Determining moisture levels in straw bale construction*, "Construction and Building Materials", 2009, vol. 23, p. 2763–2768 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.390>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Lee H.H., Oh H.R., Lim J.H., Song S.Y., *Evaluation of the Thermal Environment for Condensation and Mold Problem Diagnosis Around Built-in Furniture in Korean Apartment Buildings during Summer and Winter*, "Energy Procedia", 2016, vol. 96, p. 601–612 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.108>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Le A.T., Gacoin A., Li A., Mai T.H., Rebay M., Delmas Y., *Experimental investigation on the mechanical performance of starch–hemp composite materials*, "Construction and Building Materials", 2014, vol. 61, p. 106–113 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.084>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Lertsutthiwong P., Khunthon S., Siralertmukul K., Noomun K., Chandkrachang S., *New insulating particle boards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel*, "Bioresource Technology", 2008, vol. 99, p. 4841–4845 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.051>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Le Troëdec M., Peyratout C.S., Smith A., Chotard T., *Influence of various chemical treatments on the interactions between hemp fibres and a lime matrix*, "The Journal of the European Ceramic Society", 2009, vol. 29, p. 1861–1868 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.016>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Łukowski P., *Możliwości modyfikacji spoiwa wapiennego domieszkami i dodatkami*, „Materiały Budowlane”, 2010 vol. 458/10, s. 31 – 32
- Maalouf C., Le A.D.T., Umurigirwa S.B., Lachi M., Douzane O., *Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions*

- in France, "Energy and Buildings", 2014, vol. 77, p. 48–57 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.040>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Mańkowski J., Kubacki A., Kołodziej J., Pniewska I., Baraniecki P., *Nowa metoda rekultywacji terenów zdegradowanych w rejonie KWB Konin z zastosowaniem uprawy konopi włóknistych*, „Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych”, Poznań, 2013.
- Martin K., Escudero C., Erkoreka A., Flores I., Sala JM., *Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges*, "Energy and Building", 2012, vol. 55, p. 704–714 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.024>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Mazhoud B., Collet F., Pretot S., Lanos C., *Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites*, "Construction and Building Materials", 2017, vol. 155, p. 1126–1137 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Minke G, Mahlke F.: *Building with straw*, Birkhauser, 2005.
- Mitchell R., Kohler C., Zhu L., Arasteh D., Carmody J., Huizenga C., Curcija D.: *Therm 6.3 / Window 6.3 NFRC Simulation Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, December, 2011.
- Morrison T.M., McDonald D.C, Sutton J.A., *Plant growth in expanded perlite*, "New Zealand Journal of Agricultural Research", 1960, vol. 3:3, p. 592–597 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1080/00288233.1960.10426641>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Motori A., Manzi S., Montecchi M., Canti M.: *A preliminary study of the physical and mechanical properties of sustainable hemp fibers based composite materials for building insulated walls*, in: Proceedings of ECCM15-15th European Conference on Composite Materials, Venice (Italy) 24-28 June (2012) 1–8.
- Murad C., Doshi H., Ramakrishnan R., *Impact of insulated concrete curb on concrete balcony slab*, "Procedia Engineering", 2015, vol. 118, p. 1030–1037 [dostępne on-line], DOI: [10.1016/j.proeng.2015.08.545](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.545), [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Neville A.M., *Właściwości Betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2012.
- Nguyen T.: *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*, PhD thesis. Université de Bretagne Sud, France, 2010.
- Norton A., Murphy R., Hill C., Newman G.: *The life cycle assessment of natural fibre insulation materials*, Proceedings of the 11th international conference on non-conventional materials and technologies (NOCMAT), 6–9 September, Bath, UK, 2009.
- Osiecka E.: *Wapno w budownictwie - tradycja i nowoczesność*, Kraków, 2006.
- Paiva H., Esteves L.P., Cachim P.B., Ferreira V.M., *Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents*, "Construction and Building Materials", 2009, vol. 23, p. 1141–1146 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Paiva A., Pereira S., Sá A., Cruz D.: *A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particle boards*, "Energy and Buildings", 2012, vol. 45, p. 274–279 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Pavlik Z., Jirickova M., Cerny R., Sobczuk H., Suchorab Z.: *Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method*, "Journal

- of Building Physics”, 2006, vol. 30/1, p. 59–70 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259106064356>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Pervaiz M.: *Carbon storage potential in natural fiber Composites*, “Resources, Conservation and Recycling”, 2003, vol. 39, p. 325-340 [dostępne on-line], DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8), [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Półka M.: *Analiza toksyczności produktów rozkładu termicznego i spalania uzyskanych w wybranych materiałach epoksydowych* „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza”, 2010, 3, p. 73-81
- Pretot S., Collet F., Garnier C.: *Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating*, “Building and Environment”, 2014, s. 72, p. 223–231 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Rahim M., Douzane O., Tran Le A.D., Promis G., Laidoudi B., Crigny A., Dupre B., Langlet T., *Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity*, “Energy and Buildings”, 2015, vol. 88, p. 91–99 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Rahim M., Douzane O., Tran Le A.D., Promis G., Langlet T., *Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete*, “Construction and Building Materials”, 2016, vol. 102, p. 679–687 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Real S., Gomes M.G., Rodrigues A.M., Bogas J.A., *Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings*, “Construction and Building Materials”, 2016, vol. 121, p. 460–470 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Reddy B.V.V., *Sustainable materials for low carbon buildings*, “International Journal of Low-Carbon Technologies”, 2009, vol. 4, p. 175–81 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Rentsen B.: *Characterization of flax shives and factors affecting the quality of fuel pellets from flax shives*, A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Science In the Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, 2010.
- Różycka A., Pichór W., *Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete*, “Construction and Building Materials”, 2016, vol. 120, p. 65–71 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.019>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- 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, vol. 77, p. 219–226 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Schiavoni S., D'Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F., *Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 2016, vol. 62, p. 988–1011 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Schwarzova I., Stevulova N., Melichar T., *Lightweight Composites Based on Technical Hemp Hurds in Construction Industry*, “Chemical Engineering Transactions”, 2017, vol. 57,

- p. 1369–1374 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1757229>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Sedlbauer K., *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Fakultät Bauingenieur-und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, Dissertation, 2001.
- Sengul O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M.A., *Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete*, “Energy and Buildings”, 2011, vol. 43, p. 671–676 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Shea A., Lawrence M., Walker P., *Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building*, “Construction and Building Materials”, 2012, vol. 36, p. 270–275 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Shrestha S.S., Biswas K., Desjarlais A.O., *A protocol for lifetime energy and environmental impact assessment of building insulation materials*, “Environmental Impact Assessment Review”, 2014, vol. 46, p. 25–31 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.002>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Siddique R., Klaus J., *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review*, “Applied Clay Science”, 2009, vol. 34, p. 392–400 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Sørensen J.S.: *Comparison of wet oxidation and enzyme treatment*, Bachelor Project, Plant Fibre Laboratory, Department of Agricultural Sciences, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, 1997.
- Staniszewski B: *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne*. Państwowe wydawnictwo naukowe, Warszawa, 1980.
- Stazi F., Tomassoni E., Bonfigli C., Di Perna C., *Energy, comfort and environmental assessment of different building envelope techniques in a Mediterranean climate with a hot dry summer*, “Applied Energy”, 2014, vol. 134, p. 176–196 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.023>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Stefanidou M., Assael M., Antoniadis K., Matziaroglou G., *Thermal conductivity of building materials employed in the preservation of traditional structures*, “International Journal of Thermophysics”, 2010 vol. 31, s. 844–851 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0750-8>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Stevulova N., Kidalova L., Junak J., Cigasova J., Terpakova E., *Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites*, “Procedia Engineering”, 2012, vol. 42, p. 496–500 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.441>
- Stevulova N., Kidalova L., Cigasova J., Junak J., Sicakova A., Terpakova E., *Lightweight Composites Containing Hemp Hurds*, “Procedia Engineering”, 2013, vol. 65, p. 69–74 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.013>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Stikute A., Kukle S., Shakhmenko G., *Ecological Materials for Frame Housing*, “Scientific Journal of Riga Technical University”, 2011 vol. 6, s. 43–48.
- Stylianou S.A., Rose J.M., *Drop-to-filmwise condensation transition; heat transfer measurement for ethanediol*, “Heat and Mass Transfer”, Pergamon Press, 1983.

- Suchorab Z., Jarmula M., Sobczuk H., Pavlik Z., Cerny R., *Application of the TDR method for capillary rise measurement in a model wall made of red brick*, „Proceedings of Ecopole”, 2009 vol. 3/1, s. 207–2013.
- Suchorab Z., Majerek D., Brzyski P., Raczkowski A., Sobczuk H., *Estimation of Water Absorption Coefficient Using the TDR Method*, “AIP Conference Proceedings”, 2017, vol. 1866, p. 040038–1 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4994518>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Tahir P., Ahmed A.B., Saifulazry S.O.A., Ahmed Z., *Review of bast fiber retting*, “Bio Resources”, 2011 vol. 6, s. 5260–5281.
- Tesarek P., Tydlitat V., Drchalova J., Rowanikowa P., Cerny R., *Właściwości zaprawy wapiennej z dodatkiem metakaolinitu*, „Cement Wapno Beton”, 2005 vol. 4., s. 175–182.
- Thomsen B.A., Rasmussen S., Bohn V., Nielsen Vad K., Thygesen A.: *Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment of the chemical compositions of the fibres*, Technical University of Denmark, 2005.
- Thomson A., Walker P., *Durability characteristics of straw bales in building envelopes*, “Construction and Building Materials”, 2014, vol. 68, p. 135–141 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.041>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Tran Le A., Maalouf C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F., *Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope*, “Energy and Buildings”, 2010, vol. 42, p. 1797–1806 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Tran Le A.: *Etude des transferts hygrothermique dans le beton de chanvre et leur application au batiments*. In: PhD thesis, de l’Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2011.
- Valadez-Gonzalez A., Cervantes-Uc J.M., Olayo R., Herrera-Franco P.J., *Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites*, “Composites Part B: Engineering”, 1999, vol. 30, p. 309–320 [dostępne on-line], DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00054-7), [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Van-der-Werf H.: *Life cycle analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts*, “Euphytica”, 2004 vol. 140, p. 13–23 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-004-4750-2>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Walker R., Pavia S.: *Hydration of lime hemp concretes made with commercial binder*. Ireland: Civil Engineering Research in Ireland. Queen’s University Belfast, 2014a.
- Walker R., Pavia S.: *Impact of water retainers in the strength, drying and setting of hemp–lime concrete*. In: Proceedings of the BCRI bridge infrastructure concrete research Ireland, Trinity College and DIT, 2012, p. 355–60.
- Walker R., Pavia S., Mitchell R., *Mechanical properties and durability of hemp–lime concretes*, “Construction and Building Materials”, 2014b, vol. 61, p. 340–348 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Walker R., Pavia S., *Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes*. “Construction and Building Materials”, 2014c, vol. 64, p. 270–276 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Werner F., Taverna R., Hofer P., Richter K., *Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates*, “Annals

- of Forest Science”, 2005, vol. 62, no. 8, p. 889–902 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2005080>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Williams A., *Essential guides for building designers: lime green – traditional mortar mixes for today* – NBS shortcut 88, 2009.
- Zhang L.L., Zhu R.Y., Chen J.Y., Chen J.M., Feng X.X., *Seawater-retting treatment of hemp and characterization of bacterial strains involved in the retting process*, “Process Biochemistry”, 2008, vol. 43, p. 1195–1201 [dostępne on-line], DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.06.019>, [data dostępu: 10 stycznia 2020].
- Zimmiewska M., Mańkowski J., Władyka-Przybylak M., *Włókna naturalne, rodzaje, właściwości, kierunki zastosowań*, Biokompozyty z surowców odnawialnych, Praca zbiorowa pod redakcją S. Kuciela, H. Rydarowskiego, Kraków, 2012, s. 16–34
- ASTM E96 – Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
- PN-B-02855:1988 – Ochrona przeciwpożarowa budynków – Metoda badania wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiałów
- PN-EN 196-1:2016 – Metody badania cementu.
- PN-EN 459-1:2015-06 – Wapno budowlane – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
- PN-EN 459-2:2010 – Wapno budowlane – Część 2: Metody badań.
- PN-EN 771-4+A1:2015-10 – Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.
- PN-EN 1363-1:2020-07 – Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne
- PN-EN 1364-1:2015-08 – Badania odporności ogniowej elementów nienośnych – Część 1: Ściany
- PN-EN 1365-1:2013-04 – Badania odporności ogniowej elementów nośnych – Część 1: Ściany
- PN-EN 13501-1:2019-02 – Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków – Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień
- PN-EN 15804+A2:2020-03 – Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
- PN-EN 1925:2001 – Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej.
- PN-EN 1936:2010 – Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości.
- PN-EN 1946-2:2000 – Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych – Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła - Pomiary metodą osłoniętej płyty grzejnej.
- PN-EN ISO 6946: 2008 – Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- PN-ISO 8302:1999 – Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym - Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną.
- PN-EN ISO 10211:2008 – Mostki cieplne w budynkach – Strumienie ciepła i temperatury powierzchni – Obliczenia szczegółowe.

- PN-EN ISO 10456:2009 – Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Tabelaaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
- PN-EN 12086:2013-07 – Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie – Określanie właściwości przenikania pary wodnej.
- PN-EN 12390-7:2011 – Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.
- EN ISO 12572 – *Hygrothermal performance of building materials and products determination of water vapour transmission properties*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2001.
- PN-EN ISO 13787:200 – Wyroby do izolacji cieplnej wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych – Określanie deklarowanego współczynnika przewodzenia ciepła.
- PN-EN ISO 13788: 2013–05 – Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- PN-EN ISO 14683: 2008 – Mostki cieplne w budynkach – Liniowy współczynnik przenikania ciepła - Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- ISO 15099:2003 – Thermal performance of windows, doors and shading devices. Detailed calculations, International Organization for Standardization, Switzerland.
- Karta techniczna Astra MK-40 [data dostępu: 10 stycznia 2020] Dostępny w World Wide Web: www.astra-polska.com
- Carmeuse and IsoHemp: Hemp Building Seminar in Belgium 2016 [data dostępu: 10 stycznia 2020] Dostępny w World Wide Web: www.carmeuse.eu
- Karta techniczna cementu CEM II/B-V 32,5 R [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.cemex.pl
- Strona internetowa producenta (Saint-Astier) materiałów budowlanych opratyh na wapnie [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.c-e-s-a.fr
- Listę Krajowego Rejestru Odmian w Polsce [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.cobor.pl
- Karta techniczna gipsu wykorzystanego w badaniach [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.dolinanidy.com
- Produkt firmy Dunagro [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.dunagrohempgroup.nl
- Karta techniczna wapna wykorzystanego w badaniach [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.lhoist.com
- Karta techniczna perlitu wykorzystanego w badaniach [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.perlitpolska.pl
- Budynek La Maison d'Adam [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.spottinghistory.com

Parametry techniczne wełny konopnej [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.thermo-natur.de

Opis system paneli z kompozytu wapienno-konopnego [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.the-self-build-guide.co.uk

Parametry techniczne tynku glinianego [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.tierrafino.com

Dane meteorologiczne do analiz ciepłno-wilgotnościowych [dostęp 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.transport.gov.pl

Stroina internetowa producenta (Vicat) materiałów budowlanych opratyh na wapnie [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.vicat.com

Oprogramowanie Therm [data dostępu: 10 stycznia 2020]. Dostępny w World Wide Web: www.windows.lbl.gov