Naprawy zabytkowych murów warstwami uzupełniającymi z dodatkiem biowęgla

Daniel Tokarski
Irena Ickiewicz

Politechnika Białostocka
Białystok 2021

Daniel Tokarski, Irena Ickiewicz

NAPRAWY ZABYTKOWYCH MURÓW WARSTWAMI UZUPEŁNIAJĄCYMI Z DODATKIEM BIOWĘGLA

Politechnika Białostocka
OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2021

Recenzenci:
dr hab. inż. Maria Wesołowska, prof. UTP
dr hab. inż. Robert Wójcik, prof. UWM

Redaktor naukowy dyscypliny inżynieria lądowa i transport:
prof. dr hab. inż. Czesław Miedziałowski

Redakcja i korekta językowa:
be correct Edyta Chrzanowska

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów
Zdjęcie na okładce: Free-Photos
https://pixabay.com/pl/photos/
mur-z-ceg%C5%82y-cegie%C5%82-ceg%C5%82a-t%C5%82o-bloki-1245825/

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2021

ISBN 978-83-66391-59-8
ISBN 978-83-66391-60-4 (eBook)
DOI: 10.24427/978-83-66391-60-4

Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).
Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łuczak

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

Spis treści

Wykaz symboli i oznaczeń 5
Przedmowa 7
Wstęp 9
1. Oddziaływanie otoczenia na obiekty zabytkowe 11
1.1. Procesy destrukcyjne materiałów ceramicznych 12
1.1.1. Czynniki klimatyczne 12
1.1.2. Korozja chemiczna 16
1.1.3. Korozja biologiczna – grzyby domowe, pleśniowe i mykotoksyny 18
1.1.4. Korozja mechaniczna 24
1.1.5. Wpływ topografii terenu i jakości podłoża 25
2. Uszkodzenia spowodowane wadami wykonawstwa oraz warunkami użytkowania 27
2.1. Procesy destrukcyjne spowodowane warunkami użytkowania 28
3. Prace konserwatorsko-restauratorskie murowanych ścian budynków zabytkowych 31
3.1. Analiza przydatności stosowanych technik i materiałów 33
3.2. Zabezpieczenia 35
3.3. Uzupełnianie ubytków przy użyciu cegieł i zapraw 38
3.4. Strukturalne wzmacnianie murów 40
3.5. Oczyszczanie, odsalanie i osuszanie nawierzchni ścian 42
3.6. Metody zwalczania grzybów w budownictwie 44
4. Warstwy uzupełniające – materiały i metodyka badań 47
4.1. Materiały zastosowane w składzie zaprawy uzupełniającej 47
4.2. Badania cech materiałowych warstw uzupełniających 50
4.2.1. Właściwości cieplne 50
4.2.2. Właściwości mechaniczne 52
4.2.3. Właściwości fizyczne 53
4.3. Badania termowizyjne 57
4.4. Pomiary temperatury i wilgotności 58
4.5. Badania mikrobiologiczne 59

5. Projektowanie warstw uzupełniających stosowanych w ścianach budynków zabytkowych ... 61
5.1. Wymagania stawiane warstwom uzupełniającym ... 61
5.2. Dobór optymalnego składu mieszanki zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla ... 64
5.3. Projektowanie składu zaprawy ... 66
5.4. Optymalny skład mieszanki zaprawy cementowej do warstw uzupełniających ... 74
5.5. Badania cech materiałowych powstałego kompozytu ... 75
5.5.1. Właściwości cieplne ... 75
5.5.2. Właściwości mechaniczne ... 77
5.5.3. Właściwości fizyczne ... 78
5.6. Zalecenia praktyczne do projektowania warstw uzupełniających ... 85
6. Wpływ zastosowanych warstw uzupełniających na stan cieplno-wilgotnościowy oraz mykologiczny przegród budynków zabytkowych ... 87
6.1. Analiza wyników jednorodności cieplnej ścian murowych uzyskanych przy użyciu kamery termowizyjnej ... 88
6.2. Pomiary termowizyjne – zestawienie filtrów korekcyjnych ... 93
6.3. Kontrola stanu mykologicznego pomieszczeń poddanych renowacji ... 94
Kierunki dalszych badań ... 95
Literatura ... 97
Normy i akty ustawodawcze ... 102
Źródła internetowe ... 103
Spis tabel ... 105
Spis rysunków ... 107
Streszczenie ... 109
Summary ... 111

Wykaz symboli i oznaczeń

A	–	powierzchnia pomiarowa ciepłomierza [m^2]
A'	–	powierzchnia ściskana [cm^2]
b/c	–	współczynnik biowęgiel cement
b_i	–	parametry modelu (współczynnik regresji) opisujące wpływ i-tej zmiennej
b_0	–	wyraz wolny
c/k	–	współczynnik cement kruszywo
°C	–	stopnie Celsjusza
d	–	grubość badanej próbki
ε	–	składnik losowy (S_e)
jtk	–	jednostki tworzące kolonię
λ	–	współczynnik przewodzenia ciepła próbki [W/(m · K)]
m_w	–	masa próbki nasyconej wodą [g]
m	–	masa próbki wysuszonej do stałej masy [g]
m'	–	przyrost masy próbek [%]
m_c	–	masa próbki zawilgoconej przez kapilarne podciąganie wody [kg]
m_s	–	masa próbki w stanie wysuszonym [kg]
$np.$	–	niepoliczalne
P	–	siła niszcząca [kN]
Q	–	uśredniony sygnał elektryczny z obu ciepłomierzy
q	–	gęstość strumienia ciepła przepływającego przez próbkę [W/m^2]
R_c	–	wytrzymałość na ściskanie [MPa]
$Scal(Tm)$	–	współczynnik kalibracyjny odpowiadający średniej temperaturze Tm
w/c	–	współczynnik woda cement
ΔT	–	różnica temperatur pomiędzy powierzchniami próbki [K]
$\Delta T'$	–	różnica temperatur z obu płyt
Δx	–	grubość próbki [m]

Przedmowa

Aktualność tematu jest związana z koniecznością ochrony obiektów zabytkowych przed zniszczeniami spowodowanymi długotrwałym oddziaływaniem środowiska. Jednym z takich oddziaływań jest wilgoć. Zawilgocone powierzchnie ulegają destrukcji, co objawia się ubytkami w spoinach, niszczeniem (odpadaniem) tynków itp. Zawilgocone przegrody są również dobrym podłożem dla rozwoju grzybów pleśniowych, które ze względu na swoją ekspansywność są zdolne do zasiedlania niemal wszystkich materiałów budowlanych. Porażone przez grzyby powierzchnie stanowią zagrożenie zarówno dla konstrukcji, jak i zdrowia użytkowników zabytkowych obiektów budowlanych.

W ramach pracy naukowej podjęto badania w kierunku opracowania składu warstwy uzupełniającej ubytki w zabytkowych ścianach ceglanych i tynkach z zastosowaniem wypełniacza w postaci biowęgla. Zaprojektowana zaprawa powinna być optymalna pod względem podstawowych cech fizycznych, a jednocześnie zredukować przyczyny rozwoju szkodliwych grzybów pleśniowych.

Praca powstała we współpracy z sektorem przemysłowym. Badania przyczyniły się znacząco do transferowania wiedzy w układzie międzyregionalnym pomiędzy sektorami przedsiębiorstw, akademickim i naukowo-badawczym.

dr inż. Daniel Tokarski
dr hab. inż. Irena Ickiewicz, prof. PB

Wstęp

Konstrukcje murowe zaliczane są do grupy najtrwalszych w budownictwie. Przeciętny okres ich eksploatacji szacuje się na 150–200 lat. W tym stosunkowo długim czasie ulegają one procesowi niszczenia i degradacji zarówno przez czynniki fizyczne, chemiczne, biologiczne czy mechaniczne, jak i długoletnie zaniedbania. Renowacja zabytkowych konstrukcji murowych ma na celu przywrócenie im dawnej świetności oraz podwyższenie ich długowieczności. Dzięki zabiegom konserwatorskim prowadzonym w tym kierunku zostaje to najczęściej osiągnięte. Niestety zdarzają się również sytuacje, kiedy przeprowadzona renowacja nie przynosi oczekiwanych efektów, a w skrajnych przypadkach prowadzi do znacznych uszkodzeń lub nawet zniszczeń zabytkowych murów. Stan konstrukcji murowych w okresie porestauracyjnym uzależniony jest od wielu czynników, do których zaliczyć można:

- trafność rozpoznania przyczyn powodujących niszczenie konstrukcji oraz ich skuteczne usunięcie bądź ograniczenie,
- umiejętności i doświadczenie wykonawców robót,
- właściwy dobór materiałów i metod prac restauracyjnych,
- doświadczenie konserwatorów,
- kontrolę i nadzór wykonywanych prac.

W ramach przeciwdziałania powyższym zjawiskom dokonuje się napraw i wzmocnień. Istotnym zagrożeniem dla konstrukcji budynku, wystroju wnętrza, a także zdrowia przebywających w nim użytkowników jest wilgoć kondensacyjna i kapilarna. Wilgoć kapilarna jest podstawową przyczyną wytrącania się niszczących soli, kondensacyjna natomiast prowadzi do rozwoju toksycznych grzybów pleśniowych. Długi czas zawilgocenia przegród powoduje znaczne ubytki zarówno w warstwach konstrukcyjnych, jak i wykończeniowych (tynki, posadzki itp.). Stąd też aktualność tematu jest związana z koniecznością konserwacji przegród budynków zabytkowych, jak również z uzupełnianiem ubytków warstw konstrukcyjnych oraz zniszczonych tynków.

W ostatnich latach okazało się, że pomimo naukowego podejścia do optymalizacji procedur, jak też doskonalenia środków konserwatorskich oraz zwiększenia kontroli poszczególnych procesów, wiele prac renowacyjnych kończy się niepowodzeniem. Przyczyn upatruje się w niedostatecznym przygotowaniu wykonawców do prac restauracyjnych lub nieodpowiednim doborze metod bądź środków konserwacyjnych. W wielu pracach [10÷13, 34÷37, 45÷47, 59, 68, 70] autorzy, jako częstą przyczynę

zniszczenia murów ceglanych po przeprowadzonej restauracji, wskazują niewłaściwe stosowanie zapraw wapiennych, cementowych lub cementowo-wapiennych w miejsce istniejących. Przy nieodpowiednim zastosowaniu wyżej wymienionych zapraw po pewnym czasie lico cegieł ulega stopniowemu niszczeniu. Proces ten obejmuje coraz głębsze ich warstwy, uszkadzając również spoiny murów. Powyższe właściwości kapilarne cegieł powodują szybsze i skuteczniejsze odparowanie z nich wody niż w przypadku zapraw cementowych i cementowo-wapiennych. Zjawisko to zachodzi szczególnie w pobliżu styku cegieł z zaprawą, gdzie występuje najsilniejsze odparowanie wody. W miejscach tych dochodzi do kumulacji zawartych w cegłach i zaprawie soli, które się krystalizują, następuje także osłabienie i dezintegracja cegieł [10÷13, 59].

W przypadku nieudanych renowacji czy zabiegów naprawczych udokumentowano, że ani czyste zaprawy wapienne, ani cementowe nie sprawdzają się w trwałych naprawach murów obciążonych wilgocią i solami. Dlatego też na podstawie dostępnej literatury dotyczącej prac renowacyjnych i zapraw uzupełniających za podstawowy składnik projektowanej mieszanki cementowej wybrano **biowęgiel** (z ang. *biochar*). Jest to innowacyjny surowiec powstający w procesie pirolizy biomasy w postaci zrębków drzewnych, pozostałych po obróbce mechanicznej drewna. Dwie najistotniejsze właściwości biowęgla to:

- niska przewodność cieplna,
- zdolność do absorpcji wody do pięciu razy większej niż ciężar własny.

Te właściwości oznaczają, że biowęgiel jest odpowiednim materiałem do izolacji i regulacji wilgotności w budynkach o zabudowie historycznej. Po analizie literatury można stwierdzić, że istnieje możliwość wykonania zapraw tynkarskich łączących wapno z cementem oraz biowęglem w proporcji do 50% objętości piasku [107]. Tynki z dodatkiem biowęgla:

- regulują wilgotność pomieszczeń w zakresie 45÷70% (wilgotność optymalna dla zdrowia człowieka),
- zapobiegają osuszaniu powietrza w pomieszczeniach,
- wiążą toksyny, oczyszczają powietrze, a także są grzybobójcze.

Od ponad 10 lat bada się zastosowanie biowęgla jako substancji zmieniającej glebę, z kolei zwęgloną biomasę wykorzystywano w materiałach budowlanych już w drugiej połowie XIX w. [110]. Duże znaczenie w trafności doboru warstwy uzupełniającej (także jej składu) ma poprawna diagnostyka przyczyn zniszczenia przegród (w tym spoin i tynków), stąd też bardzo istotny jest właściwy wybór odpowiedniej aparatury badawczej [10÷13, 19, 76, 84].

1. Oddziaływanie otoczenia na obiekty zabytkowe

Cechą wyróżniającą budynek zabytkowy spośród innych obiektów technicznych jest jego trwałość, mierzona w dziesiątkach, a nawet setkach lat. Jest ona rozumiana jako zdolność do spełniania wymaganych funkcji przez określony czas w danych warunkach użytkowania. Materiały zastosowane do wzniesienia konstrukcji budowli znajdują się w złożonej przestrzeni obciążeń chemicznych, fizycznych oraz mechanicznych. Wśród tych obciążeń wyróżnia się: destrukcję chemiczną, elektrochemiczną, a także wywołaną cyklicznym pęcznieniem i skurczem destrukcję mrozową bądź cieplno-wilgotnościową, jak również mające podobny charakter (zmienne naprężenia) zmęczenie mechaniczne oraz erozję, która obejmuje procesy mechanicznego niszczenia pod wpływem czynników zewnętrznych (np. ścieranie). Także oddziaływania organizmów żywych, np. owadów, zwierząt, mikroorganizmów, jak też wandalizm człowieka, działają negatywnie na wykorzystane materiały [7, 87, 89].

Zabytki, głównie murowane, z biegiem czasu ulegają naturalnemu zniszczeniu, na co wpływ mają wspomniane wyżej procesy destrukcyjne. Istotne tu są różne czynniki – począwszy od właściwości fizykochemicznych materiałów, poprzez rodzaj konstrukcji, wiek budynku, warunki pracy, na wadach wykonawstwa czy tzw. zdarzeniach losowych skończywszy. Niektóre z oddziaływań niszczących przebiegają powoli, powodując w materiałach niedostrzegalne zmiany lub odkształcenia. Inne z kolei zachodzą szybko i gwałtownie, niepostrzeżenie prowadząc do nagłych uszkodzeń, a często nawet całkowitego zniszczenia [32, 44, 47]. Do długotrwałych procesów destrukcyjnych zalicza się m.in. odkształcenia spowodowane nieprzerwanie działającą siłą ciężkości, czego konsekwencją są nieznaczne ugięcia stropów i deformacje sklepień, a także osiadanie podpór.

W poprawnych pod względem technicznym budynkach zabytkowych wyżej wymienione odkształcenia nie są nazbyt groźne, pod warunkiem że nie towarzyszy im np. zjawisko rozkładu materiału. Długotrwałe oddziaływanie środowiska, zwłaszcza jego czynników fizycznych, takich jak zmiany wilgotności względnej otaczającego powietrza, wiatru, opadów atmosferycznych czy temperatury, wpływa na starzenie się materiałów konstrukcyjnych ścian murowych, co jest szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji nieosłoniętych. Jest to jednak naturalny i trudny do zahamowania proces. Nie można również zapomnieć o znacznym wpływie wody i wilgoci wskutek kondensacji pary wodnej, jak też kapilarnego podciągania wody z podłoża [3, 7, 82÷83].

Starzenie się budowli jest ściśle powiązane z rozkładem chemicznym. Na skutek działania szkodliwych substancji użyte materiały po pewnym czasie ulegają przeobrażeniom chemicznym zachodzącym w wyniku synergii wielu procesów chemicznych, fizycznych, a czasami również biologicznych. Destrukcja chemiczna w znacznym stopniu związana jest także z niesprzyjającym środowiskiem otaczającym budynek. Wiele zniszczeń w konstrukcjach murowych obiektów zabytkowych wywoływanych jest przez czynniki mechaniczne: zmiany w podłożu, zmiany pobliskich stosunków wodnych, naruszenie równowagi mas ziemnych, wstrząsy oraz drgania inicjowane głównie przez bodźce zewnętrzne. Oddziaływania te **naruszają spoistość konstrukcji**, a także sprzyjają rozwojowi procesów destrukcyjnych innego pochodzenia. Niepożądane działania czynników fizycznych, chemicznych i mechanicznych mogą spotęgować i w konsekwencji przyspieszyć powstanie wad materiałów użytych do wzniesienia budynku, wad rozwiązań konstrukcyjnych, wykonawstwa budowlanego, warunków użytkowania i działalności człowieka. Oczywiście zabytki architektoniczne mogą ulec zniszczeniu w wyniku szczególnie dotkliwych i trudnych do opanowania pożarów, powodzi, wstrząsów sejsmicznych czy działań wojennych.

Analizując przyczyny i skutki oddziaływania procesów i czynników niszczących, nie można pominąć wpływu bliskiego otoczenia budynku. W ciągu dekad zmieniają się formy życia, potrzeby, a przede wszystkim wymagania techniczne. Zmiana warunków środowiskowych wokół budowli prowadzi do przekształcania powierzchni terenu oraz znajdujących się na niej zasobów, co pociąga za sobą destrukcję nawet najdoskonalszych technicznie, konstrukcyjnie i materiałowo budynków zabytkowych. Nadzór nad objawami i skutkami zniszczeń, a także analiza czynników niszczących i procesów destrukcyjnych mają niezwykle ważne znaczenie w działalności konserwatorskiej. Jedynie znajomość charakteru zniszczeń oraz przyczyn uszkodzeń pozwala w sposób odpowiedni dobrać środki techniczne niezbędne do zachowania tych budynków [3, 7, 32, 44, 47, 57, 82÷83].

1.1. Procesy destrukcyjne materiałów ceramicznych

1.1.1. Czynniki klimatyczne

W istotny sposób na trwałość budynków wpływa położenie geograficzne, a konkretnie związany z nim klimat. W tym przypadku procesy destrukcyjne są wywoływane przez zmiany temperatury i wilgotności powietrza, oddziaływanie promieni słonecznych, wiatru czy opadów atmosferycznych. Skutki działania tych czynników są różne, niektóre występują gwałtownie, inne – początkowo niezauważalne – stają się widoczne dopiero po bardzo długim okresie. Ponieważ konstrukcje murowe poddawane są znaczącemu nagrzewaniu promieniami słonecznymi lub oziębianiu

przez niskie temperatury, budynki narażone są na zmiany wymiarów przestrzennych. W związku z tym na powierzchni murów powstają deformacje przybierające często postać wybrzuszeń, ukazują się drobne spękania i rysy. Promienie słoneczne przyspieszają także procesy starzenia się materiałów wskutek oddziaływania ultrafioletowego.

W wyniku działania ruchów termicznych znacząco zwiększa się tempo starzenia warstw ochronnych (izolacji), które oddzielają się od powierzchni ścian i konstrukcji, ułatwiając w ten sposób przenikanie do wnętrza przegrody wody pod różnymi postaciami. W konsekwencji zmiennych warunków klimatycznych w materiałach uzupełniających i konstrukcjach zauważalne jest osłabienie spoistości struktury oraz wzrost ich kruchości. Stają się one bardziej porowate, pęcznieją i kruszą się, w związku z czym zmniejsza się ich ciężar właściwy i obniżają się właściwości mechaniczne. W następstwie powstają naprężenia wewnętrzne, co przy jednoczesnym działaniu nierównomiernie rozłożonych sił wewnętrznych skutkuje lokalną koncentracją naprężeń, deformacjami, spadkiem wytrzymałości, a w rezultacie zniszczeniem murów. Zniszczenia i deformacje przebiegają tym szybciej, im więcej nieregularności strukturalnych w materiale konstrukcyjnym, słabsza przyczepność zaprawy do materiałów i im więcej pustek, szczelin oraz pęknięć w przekroju pracującym [8, 81, 99].

Często procesy destrukcyjne są dziełem wiatru. Huragany lub silne podmuchy wiatru mogą powodować nagłe zniszczenia w postaci zerwanych dachów, wybitych okiennic czy przewróconych ścian. Bezpośrednie działanie wiatru przyczynia się do erozji kaolicznej materiałów ceramicznych, a nawet konstrukcji. Zjawisko to polega na wysysaniu i odrywaniu od powierzchni przegrody słabo zespolonych cząstek zwietrzelinowych, przenoszeniu ich i uderzaniu nimi o płaszczyznę lica materiału. Proces ten powoduje zaokrąglanie ostrych krawędzi, deformację profili, a nawet tworzenie się bruzd i spękań w budowli. Wiatr jest również czynnikiem sprzyjającym korozji chemicznej. Korozja chemiczna została omówiona w dalszej części pracy.

Szczególną uwagę należy zwrócić na aspekty związane z procesami oddziaływania wody i wilgoci. Wpływ wody na konstrukcje budowlane łączy w sobie wiele procesów destrukcyjnych, zarówno fizycznych, chemicznych, jak i biologicznych. W konstrukcjach murowych wilgoć może się pojawić wskutek [3, 30, 41, 81÷83]:

- wilgoci kondensacyjnej, absorpcji wilgoci znajdującej się w powietrzu przez higroskopijne i porowate materiały,
- przenikania pary wodnej w szczeliny, co powoduje skraplanie się jej wewnątrz konstrukcji,
- wilgoci kapilarnej, tzn. kapilarnego podciągania wody z podłoża.

Zawilgocenie struktury murów w zabytkach architektury stanowi najistotniejsze ogniwo procesu ich zniszczenia, zwłaszcza gdy woda zawiera agresywne, szkodliwe domieszki. Mury posiadające niejednorodną strukturę i zawierające w swoim składzie materiały higroskopijne podczas nasycania wodą stają się mniej odporne

na deformacje i tracą pierwotną wytrzymałość oraz nośność [3, 30]. Woda deszczowa wnika w przegrodę poprzez pęknięcia, w wyniku nieszczelności pokrycia często dochodzi do zawilgocenia dachów. Na skutek powstania przecieków następuje także zawilgocenie ścian i innych elementów konstrukcyjnych budynku. W takich warunkach ściany nie wysychają przez wiele lat i w niektórych przypadkach poziom wilgotności z biegiem czasu wzrasta. W tak zawilgoconych przegrodach nie tylko następuje niszczenie warstw konstrukcyjnych, lecz także spada ich izolacyjność cieplna. Przegrody ulegają zniszczeniu wskutek pęcznienia materiałów i rozpuszczania substancji wiążącej. Niejednokrotnie dochodzi też do zawilgocenia przez deszczówkę dolnych partii budynku wskutek odprysków wody od gruntu. Ma to miejsce wówczas, gdy zabytek jest posadowiony zbyt nisko i izolacja pozioma ścian znajduje się poniżej wysokości, na jaką odbijają się krople wody deszczowej [31, 52, 75, 83]. Opady atmosferyczne wpływają na zachwianie struktury oraz właściwości materiału konstrukcyjnego poprzez oddziaływanie erozyjne, wypłukiwanie rozpuszczalnych w wodzie substancji z zewnętrznych powierzchni, co przyczynia się do znacznego zawilgocenia przegród. Erozyjna działalność polega na rozmywaniu powierzchni materiału przez wody opadowe zanieczyszczone często gazami i pyłami wydalanymi do atmosfery przez piece, zakłady przemysłowe, pojazdy samochodowe itp. Częstotliwość i natężenie opadów są zróżnicowane w czasie, co uniemożliwia dokładne i wnikliwe przewidywanie powodowanego przez nie zawilgocenia [75, 83]. Zaobserwowano natomiast, że jest ono większe w rejonach, gdzie częściej pojawiają się opady i silny wiatr.

Negatywnym zjawiskiem jest również **kondensacja pary wodnej** w przegrodach budowlanych, która zachodzi w przypadku występowania dużych wartości wilgotności względnej otoczenia (powietrza wewnętrznego). Kondensacja jest zależna od temperatury na powierzchni przegrody, co bezpośrednio wynika z właściwości cieplnych materiałów, z których jest wykonana. Kondensacja może nastąpić tylko wtedy, gdy wewnątrz budynku utrzymuje się bardzo wysoka wilgotność powietrza. Kiedy wilgotne powietrze styka się z zimną powierzchnią przegrody, której temperatura jest niższa od temperatury punktu rosy powietrza wewnętrznego, zachodzi skraplanie [31, 32, 52, 83] – może do niego dojść zarówno na powierzchni przegrody, jak i w jej wewnętrznych warstwach. Następstwem zawilgocenia jest obniżenie własności izolacyjnych i niszczenie materiału konstrukcyjnego. Woda, która do niego przeniknie – tak w postaci wilgoci kondensacyjnej międzywarstwowej, jak i wilgoci kapilarnej – w warunkach znacznych zmian temperatury jest szczególnie niebezpieczna. Podczas zamarzania woda zwiększa swoją objętość o ~10%, co powoduje znaczny wzrost ciśnienia na otaczający materiał [3, 32]. Wraz z dalszym spadkiem temperatury zwiększa się objętość zamarzniętej wody wypełniającej pory oraz wzrasta ciśnienie wywierane na ścianki kapilar. Przy spadku temperatury do:

- 0°C ciśnienie na ścianę materiału wynosi 10 MPa,
- –1°C ciśnienie wzrasta do 113,9 MPa,
- –20°C ciśnienie wzrasta do 205 MPa.

Zjawisko to powoduje powstanie nadmiernych odkształceń, które w konsekwencji prowadzą do naruszenia spoistości i zwięzłości struktury muru, przesunięcia lub pękania materiału oraz powstawania deformacji w postaci wybrzuszeń i oddzielania się warstw. Szczególnie niebezpieczna jest woda zawierająca rozpuszczone sole. Mogą się one znajdować w wodzie gruntowej, do której dostają się z nawozów sztucznych, soli stosowanych do posypywania nawierzchni w okresie zimowym, a także zanieczyszczeń przemysłowych. Ponadto związki te występują również w wodzie morskiej przenoszonej przez wiatr, a w budynku mogą się też znaleźć w wyniku stosowanych podczas konserwacji nieodpowiednich odczynników, zapraw czy preparatów. Destrukcyjne działanie tego żywiołu jest także związane z wodami płynącymi w rzekach lub spływającymi po powierzchni terenu w kierunku zabudowy. Wsiąkając w grunt, przyczyniają się one do naruszenia układu hydrogeologicznego podłoża budowli. Woda może również wpływać pośrednio na konstrukcje murowane. Wskutek oddziaływania wilgoci dochodzi do korozji elementów stalowych [3, 31÷32].

Na skutek podciągania kapilarnego woda dostająca się do fragmentów budynku, zagłębionych np. w wilgotnym gruncie, może dochodzić nawet do 4 m wysokości [60]. W tym przypadku procesy destrukcyjne zachodzą w wyniku krystalizacji oraz powiększania się kryształów soli, które wraz z roztworem przemieszczają się z głębszych kapilar do powierzchniowych, po czym osadzają się na powierzchni lub w porach powierzchniowych budynku zabytkowego. Największe skupiska soli tworzą się w partiach budynku narażonych na najintensywniejsze odparowywanie wody. W wyniku krystalizacji w porach powstają zarodki krystalizacyjne, które z czasem znacznie się powiększają. Jeśli dojdzie do całkowitego wypełnienia porów, to dalszy wzrost kryształków będzie powodował nacisk na otaczające ścianki, co w konsekwencji doprowadzi do rozsadzenia struktury materiału, czyli jego destrukcji. Występujące w procesie ciśnienie krystalizacyjne jest dostatecznie duże, aby przy powtarzających się cyklach rozpuszczania i krystalizacji soli, podczas schnięcia materiałów porowatych doprowadzić do obniżenia wytrzymałości mechanicznej, a w efekcie kruszenia i odpadania fragmentów zapraw i cegieł [10÷13]. Solami wywołującymi największe szkody są te, które krystalizują się ze zmienną ilością wody w temperaturze otoczenia, czyli siarczany sodu i magnezu oraz węglan sodu. Zwiększanie stopnia uwodnienia przez wyżej wymienione sole, podczas którego do ich kryształów przyłączają się cząsteczki wody, powoduje zwykle ich znaczne powiększanie się. Wzrost objętości przekracza wówczas nawet 300%. Ogromne ciśnienie wywierane na ścianki kapilar w konsekwencji kilkakrotnej hydratacji i dehydratacji może spowodować całkowite zniszczenie materiału konstrukcyjnego. O wiele mniej szkodliwe jest oddziaływanie siarczanu wapnia, który w wyrobach ceramiki budowlanej występuje w postaci uwodnionej, czyli jako gips. Wynika to przede wszystkim z jego ograniczonej rozpuszczalności. Niemniej jednak ceramika zawierająca powyżej 1% siarczanu wapnia, wystawiona na działanie czynników atmosferycznych, również może ulegać destrukcji [3, 10÷13, 30, 41, 60, 82÷83].

1.1.2. Korozja chemiczna

Tempo rozwoju cywilizacyjnego ostatniego stulecia, a zwłaszcza rozwoju przemysłu, było bardzo dynamiczne, co pociągnęło za sobą wzrost skażeń środowiska naturalnego (powietrza, wody i gleby). Umiejscowienie budynku w pobliżu ośrodków przemysłowych stwarza warunki procesom korozyjnym związanym z oddziaływaniem agresywnych substancji zawartych w atmosferze. Te szkodliwe wtrącenia dostają się do powietrza w postaci m.in. dymów, pyłów, szkodliwych gazów czy spalin samochodowych. W krajach rozwijających się największy udział w skażeniu powietrza mają ruch drogowy oraz przemysł. Z kolei wody gruntowe i powierzchniowe zanieczyszczane są związkami, które przedostają się do nich z wody atmosferycznej, cząstek sadzy i pyłów osiadłych na powierzchni terenu, ścieków przemysłowych czy składników zawartych w gruncie [36, 56, 74].

Murowane budynki zabytkowe są zagrożone głównie wtedy, gdy nie są osłonięte przez warstwy pokrywające ich konstrukcję. Brak takiej warstwy na ścianach muru sprawia, że szkodliwe substancje lotne osiadają na zewnętrznych powierzchniach konstrukcji i przenikają do jej wnętrza, po czym w wyniku chemicznego łączenia się ze składnikami zawartymi w użytych materiałach prowadzą do ich niszczenia. Destrukcja może być różna, w głównej mierze zależy od panujących w danym miejscu warunków czy zawartości szkodliwych substancji w otaczającym środowisku. Efekty agresji chemicznej są uwarunkowane rodzajem atakowanego materiału, a także charakterem i stężeniem atakujących substancji oraz warunków, w jakich działają. Te szkodliwe związki wchodzą w różnorodne reakcje chemiczne z materiałem atakowanym. Znane są reakcje w środowisku wodnym, jak też procesy utleniania, uwęglania czy hydratacji. Efekty korozji chemicznej nie są zauważalne od razu, zwłaszcza przy niewielkim stopniu zanieczyszczenia wody, powietrza lub jeśli nie następuje ubytek masy tworzywa.

Objawami alarmującymi o zachodzeniu przemian chemicznych w strukturze muru są wykwity, spulchnienia materiału czy plamy. Procesy korozyjne w murach przebiegają szczególnie energicznie w środowisku nawodnionym, jeśli obfituje ono w rozpuszczone kwasy (zwłaszcza siarkowy i węglowy), zasady o odpowiednim stężeniu oraz różnego rodzaju rozpuszczone sole siarczanowe, najwolniej zaś zachodzą w środowisku suchym oraz przy spadkach temperatury otoczenia poniżej 0°C. Przy temperaturach niższych od –20°C może dojść do całkowitego ustania korozji chemicznej. Niemniej jednak nawet w tak zdawałoby się niesprzyjających warunkach następuje niszczenie konstrukcji murowanych przez znajdujące się w powietrzu gazy, pyły soli i inne substancje [3, 7, 81].

Powstawanie kwasów jest związane w głównej mierze z rozpuszczaniem się w wodzie dwutlenku węgla oraz innych gazów – tlenków siarki, azotu, chlorowodorów czy fluorowodorów zawartych w powietrzu. W wyniku reakcji kwasu węglowego z węglanami, przede wszystkim wapnia, powstaje kwaśny węglan wapnia, charakteryzujący się znacznie większą rozpuszczalnością niż węglan obojętny. Kwas

węglowy prowadzi do rozkładu powierzchni materiałów nieporowatych, które w konsekwencji tracą poler. Z kolei w materiałach porowatych węglan wapnia rozpuszcza się w strefie zawilgocenia, a następnie w procesie schnięcia materiału migruje w stronę porów powierzchniowych i w nich odkłada się ponownie jako węglan wapnia. Odbywa się to cyklicznie, a w przypadku wielokrotnego powtarzania się dochodzi do zawężenia kapilar powierzchniowych, ich uszczelnienia lub wytworzenia się na ich powierzchni nawarstwień. Wówczas można zaobserwować osłabienie wewnętrznych partii kamieni, zapraw czy cegieł, z czasem coraz większe, przy jednoczesnym wzmocnieniu i uszczelnieniu powierzchniowych warstw materiałów przez odkładające się sole. Ostatecznie powoduje to pękanie oraz łuszczenie się materiału i odsłanianie zdezintegrowanych wewnętrznych partii kamienia. Jeszcze łatwiej proces powstawania nawarstwień i uszczelniania powierzchni zewnętrznej zachodzi w przypadku kwasu siarkowego, gdyż przemiana węglanu wapnia w gips wiąże się z powiększeniem objętości o około 95%.

Dodatkowym czynnikiem niszczącym jest w tym przypadku woda znajdująca się w porach materiału użytego do wzniesienia konstrukcji, która wskutek uszczelnienia warstwy zewnętrznej przez odkładające się nawarstwienia solne nie może wydostać się na zewnątrz. W efekcie reakcji kwasu węglowego z innymi składnikami materiałów budowlanych powstają nowe minerały, które mają właściwość pęcznienia i są łatwo wypłukiwane z kamieni. Powoduje to osłabienie struktury muru, kamieni i zwiększa ich podatność na zniszczenie.

Destrukcja związana z kwasami – węglowym i siarkowym – jest długotrwała i o wiele bardziej skomplikowana niż w przypadku oddziaływania innych kwasów, jak choćby solnego i azotowego. Ponieważ te dwa ostatnie są mocne, w związku z tym działają znacznie energiczniej. Reagują bardzo szybko, głównie z węglanami występującymi na powierzchni materiału, niszcząc coraz to głębsze jego warstwy. Produktami reakcji są rozpuszczalne sole (chlorek i azotan wapnia), związki o ograniczonej rozpuszczalności (siarczan wapnia), a także nierozpuszczalne, tj. fluorek wapnia. Efektami ich powstania są nieodwracalny proces niszczenia wapieni i dezintegracja granularna piaskowców [10÷13].

Do szczególnie niebezpiecznych gazów zaliczamy fluor i jego pochodne oraz tlenki siarki, które bardzo negatywnie wpływają nie tylko na same budowle, lecz także na organizmy żywe. Szkodliwość pyłów jest uzależniona od składu chemicznego i stopnia rozdrobnienia. Najmniej szkodliwe są pyły gruboziarniste, najbardziej zaś te silnie rozdrobnione. Jeśli mają one agresywne właściwości, dochodzi do reakcji ze składnikami muru, co daje nowe związki (sole), które w głównej mierze wywołują omawiane wcześniej procesy niszczące [31, 52]. Szczególnym niebezpieczeństwem dla materiałów murowych są wodne roztwory związków, które reagując z rozpuszczonymi składnikami mineralnymi materiału konstrukcyjnego, tworzą agresywne sole. W wyniku różnorodnych reakcji powstają głównie związki siarczanów tworzących kryształy, które wywierają ciśnienie na ścianki kapilar bądź osadzają się na zewnętrznej powierzchni materiału konstrukcyjnego.

Minerały węglowe zawarte w surowcach produkcyjnych ceramiki budowlanej podczas wypalania przechodzą w inne związki, np. zamieniają się w tlenek wapnia, a ten, reagując z wilgocią, przechodzi w wodorotlenek wapnia. Nowo utworzony związek charakteryzuje się około dwukrotnie większą objętością niż tlenek węgla, co jest podstawową przyczyną uszkodzeń lica ceramicznego. Inne minerały, tj. dolomit czy magnezyt, pod działaniem bardzo wysokiej temperatury tworzą tlenki wapnia lub magnezu [36÷37]. Tlenek magnezu natomiast razem z tlenkiem siarki, zawartym chociażby w zanieczyszczonym powietrzu, może tworzyć szkodliwy siarczan magnezu, o którym wspomniano w punkcie 1.1.1 (czynniki klimatyczne).

Rozwój korozji powierzchniowej i wgłębnej zachodzi przede wszystkim w materiałach mniej odpornych, częściowo zanieczyszczonych tlenkami żelaza zawartymi w krzemianach, piaskiem, związkami węgla czy substancjami organicznymi. Bardzo duże znaczenie mają także warunki, w jakich zachodzą procesy korozyjne. Zniszczenia powodowane korozją chemiczną mają różnoraki charakter, a ich procesy często są bardzo złożone. Tego typu korozja jest szczególnie niebezpieczna dla zabytków architektury, szczególnie tych, których materiały i konstrukcje mają nadwerężoną i higroskopijną strukturę [3, 7, 10÷13, 31, 36÷37, 52, 65, 74÷75, 81].

1.1.3. Korozja biologiczna – grzyby domowe, pleśniowe i mykotoksyny

W pewnych warunkach materiały budowlane i wzniesione z nich budynki narażone są na szkodliwe działanie różnych grup mikroorganizmów wpływających na ich stan techniczny, a także na zdrowotność użytkowników. W budowlach o tradycyjnych konstrukcjach szczególne znaczenie mają tzw. grzyby domowe, rozwijające się głównie na materiałach organicznych, a także grzyby pleśniowe. Znaczne szkody w zabytkowych budynkach murowanych powodowane są przez czynniki o charakterze biologicznym, w głównej mierze mikroorganizmy, rośliny, owady czy większe zwierzęta, które bezpośrednio bądź przez inne konstrukcje oddziałują na materiały murowe. Proces destrukcji w tym przypadku polega na porażeniu części organicznych znajdujących się w strukturze murów lub z nimi sprzężonych. Najistotniejszym źródłem zakażenia obiektów jest woda gruntowa podciągana kapilarnie, która transportuje z gleby bakterie, glony i inne drobnoustroje [59]. Ich rozwój i intensywność działania są uzależnione od panujących warunków klimatycznych, tj. wilgotności i temperatury, oraz od składu chemicznego podłoża. Dynamicznie rozwijają się w miejscach silnie i długotrwale zawilgoconych (przy gruncie, zepsutych rynnach, na terenach zacienionych itp.) oraz wiosną i jesienią na powierzchni całych obiektów budowlanych, gdy są one przez długi czas nasączone wodą. Optymalna wilgotność powietrza dla mikroorganizmów wynosi około 90%, czyli w porze deszczowej, najlepszą zaś temperaturą dla szybkiego rozwoju procesów korozji biologicznej jest temperatura około 18÷20°C. Mikroorganizmy dzielą się na autotroficzne (samożywne),

do których zaliczamy glony, porosty, niektóre bakterie czy wyższą roślinność zieloną, oraz heterotroficzne (cudzożywne), w których skład wchodzą grzyby i większość bakterii [10÷13, 59]. Wpływ wszystkich mikroorganizmów oraz roślinności można rozpatrywać w trzech aspektach:

- oddziaływania chemicznego,
- działań mechanicznych,
- stałego zawilgocenia i zmian barwy budynku.

Oddziaływanie chemiczne zachodzi wówczas, gdy roślinność zielona w procesach metabolicznych oraz wydzielane przez drobnoustroje kwasy organiczne działają na materiał konstrukcyjny. Kwasy szczawiowy, mlekowy czy octowy powodują rozkład węglanu wapniowego zapraw i tynków, a także zwiększają rozpuszczalność w wodzie materiałów ilastych, z których zbudowane są cegły, w wyniku czego powstają sole. Schemat niszczenia jest więc zbliżony do sposobu działania kwasów nieorganicznych. Działanie mechaniczne polega na rozsadzaniu materiału konstrukcyjnego głównie przez glony i porosty, jak też przez roślinność oplatającą niezabezpieczone powierzchnie. Wrastając w szczeliny i pory przypowierzchniowe, wyżej wymienione organizmy wywierają coraz to większe ciśnienie na ścianki, co w konsekwencji prowadzi do rozsadzania, kruszenia i łuszczenia się powierzchni materiałów oraz rozluźniania najbardziej spojonych murów. W następstwie tych procesów tworzą się warunki sprzyjające penetracji innych czynników destrukcyjnych, przede wszystkim wilgoci.

Pośredni wpływ procesów korozji biologicznej sprowadza się do oddziaływania organizmów na konstrukcje drewniane sprzężone z murem. Grzyb domowy w sprzyjających warunkach w ciągu kilkunastu miesięcy może doprowadzić do utraty ponad 90% wytrzymałości drewna [74, 79]. Wskutek działania grzybów czy owadów dochodzi do deformacji elementów drewnianych, co w rezultacie może prowadzić do uszkodzenia układów murowanych. Procesy destrukcyjne mogą być też dziełem zwierząt, a w przypadku ścian murowanych z kamienia pełnego szczególnie ptaków. Przyczyniają się one głównie do podwyższenia wilgotności i wydzielania szkodliwych soli.

Grzyby powodują nie tylko szkody techniczne w budynkach, lecz także niekorzystnie wpływają na zdrowie człowieka. Są to organizmy pośrednie pomiędzy roślinami a zwierzętami, należące do plechowców (*Thallophyta*). W odróżnieniu od roślin nie mogą pobierać pokarmu z dwutlenku węgla (CO_2) z powietrza i przerabiać go na związki organiczne. Z tego powodu żywią się głównie substancją organiczną nagromadzoną przez rośliny i zwierzęta. W budynkach najczęściej rozwijają się grzyby należące do klasy podstawczaków (*Basidiomycotina*), powodujące rozkład drewna i innych materiałów organicznych. W zależności od budowy strzępek i sposobu rozmnażania wyróżnia się kilka grup mikroorganizmów zwanych klasami:

- sprzężniaki (grzyby pleśniowe),
- workowce (grzyby pleśniowe),
- grzyby niedoskonałe (grzyby pleśniowe),
- podstawczaki (grzyby domowe).

Grzyby pleśniowe mogą porazić budynek lub jego drewniane elementy zarodnikami, grzybnią, sznurami bądź owocnikami. Grzyby te są organizmami wielokomórkowymi, których ciało złożone jest z nitkowatych strzępek tworzących rozgałęzioną grzybnię, penetrującą podłoże wzrostu. Wzrost grzybni odbywa się w części szczytowej strzępek. Komórki grzybów otoczone są ścianą komórkową zbudowaną z chityny, lipidów, białek i glukanu. Strzępki grzybów mogą być niepodzielone przegrodami lub podzielone ścianami poprzecznymi (septami). Element zarażający, tzw. zarodnik, po dostaniu się do budynku rozpoczyna swój rozwój. Wytwarza on strzępkę, która szybko się rozwija i rozgałęzia w grzybnię, ta zaś rozpoczyna swoją działalność od pobierania pokarmów. Strzępki grzyba, które dostały się do komórek elementów drewnianych, rozwijają się tam, tworząc gęste rozgałęzienia – najczęściej w komórkach promieni rdzeniowych, a także cienkościennych komórkach przyrostu wczesnego. Wskutek rozwoju grzybnia wytwarza owocniki i sznury. O ile grzybnia i sznury grzybów pleśniowych rozprzestrzeniają się zwykle w budynku pod podłogą i są widoczne dopiero po pewnym czasie, o tyle owocniki grzybów domowych powstają na zewnętrznej powierzchni podłogi, zazwyczaj w miejscach osłoniętych, w narożnikach [74, 88]. Organizmy te zaliczane są do domeny *Eukarya* (jądrowce), królestwa *Fungi* (grzyby). Wśród grzybów pleśniowych zasiedlających materiały budowlane dominują gatunki należące do gromad *Neocallimastigomycota*, *Zygomycota* oraz *Ascomycota*.

Na skutek występowania mikroorganizmów na powierzchni murów ceglanych wzrasta ich zawilgocenie. Zamarzający w porach lód zwiększa objętość i kruszy materiał konstrukcyjny. Rozwój drobnoustrojów, zwłaszcza grzybów pleśniowych, znacznie zmienia też wyjściową barwę. Grzyby pleśniowe, które występują głównie na ścianach piwnicznych, sprzyjają powstawaniu licznych drobnych czarnych plam [3, 10÷13, 90]. Z kolei te gromadzące się na materiałach budowlanych niszczą materię budowlaną, są także przyczyną zagrożeń zdrowotnych, wśród których do najpoważniejszych należą mikozy, alergie, mykotoksykozy czy hemosyderoza płuc [88÷91].

Podstawowym elementem odróżniającym grzyby domowe od pleśniowych jest grzybnia ze strzępkami w postaci różnokolorowych cienkich niteczek. Strzępka może być rozrostowa, wełniasta, puszysta lub zbita. Pochłania ona tlen (potrzebny do procesów życiowych), wydala wodę i dwutlenek węgla. Budowa sznurów jest prosta albo rozgałęziona, są one różnej długości (do 10 m) i grubości (2–8 mm), mogą się składać z kilku rodzajów strzępek. Sznury tworzą się po sześciu–siedmiu miesiącach od chwili porażenia. Pośród owocników wyróżniamy muszlowe, kapeluszowe lub wachlarzowate, różne mogą być też ich hymenofory, np. blaszkowe, rurkowe, fałdowane z kolcami. Podobnie zarodniki – mogą się różnić pod względem wielkości, budowy i koloru: owalne, cylindryczne, kuliste, zabarwione na brązowo, żółto lub czerwono, wielkości około 5 μm. Grzyby domowe rozwijające się w budynkach zabytkowych powodują rozkład drewna, a także innych materiałów organicznych [51, 87, 90÷91]. Tabela 1.1 zawiera podział tych grzybów pod względem ich siły niszczącej i skali występowania na elementach drewnianych.

Grzyby domowe potrzebują do wzrostu korzystnych warunków, mogą się rozwijać jedynie w odpowiednim środowisku, mając pożywienie, adekwatną wilgotność podłoża (>20%), temperaturę (22–35°C), dostęp powietrza, brak światła oraz odpowiedni odczyn środowiska. Zarodniki i grzybnia grzyba domowego właściwego (a zarazem większości gatunków) najlepiej rozwijają się w środowisku lekko kwaśnym, bardzo słabo zaś w zasadowym. Optymalne pH dla prawie wszystkich gatunków wynosi 4–6. Wyżej wymienione warunki muszą występować łącznie. Grzyby domowe w przeciwieństwie do pleśniowych są mniej szkodliwe dla zdrowia ludzi, za to mogą w krótkim czasie spowodować znaczne uszkodzenia budowli drewnianych i budynków z elementami konstrukcyjnymi wykonanymi z drewna [90÷91].

TABELA 1.1. Gatunki grzybów domowych występujących w budynkach

Grupa	Gatunek	Opis
I grupa	• grzyb domowy biały (*Poria vaillantii*) • grzyb domowy właściwy (*Serpula lacrymans*) • grzyb piwniczny (*Coniophora puteana*)	Najczęściej występujące w budynkach, powodujące rozległy i szybki rozkład drewna
II grupa	• gmatwek dębowy (*Daedalea quercina*) • grzyb kopalniany (*Paxillus panuoides*) • grzyb podkładowy (*Lentinus lepideus*) • grzyb słupowy (*Gloeophyllum sepiarium*) • hubka różnobarwna (*Trametes versicolor*) • wroślak rzędowy (*Trametes serialis*)	Mniej szkodliwe, o dużej sile niszczenia, występujące gniazdowo
III grupa	• czuprynka kulista (*Chaetomium globosum*) • grzyb składowy (*Peniophora gigantea*) • powłocznik gładki (*Corticium laeve*)	Powodują powolny i powierzchniowy rozkład drewna

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [91].

W tabeli 1.2 przedstawiono wybrane alergeny grzybów pleśniowych, na które mogą być narażeni użytkownicy przestrzeni budynków zabytkowych.

TABELA 1.2. Alergeny grzybów pleśniowych

Pleśń/Alergen	Masa cząsteczkowa (kDa)	Nazwa biochemiczna
Alternaria alternata		
Alt a 1	28	Nieoznaczona
Alt a 4	57	Izomeraza disiarczkowa
Alt a 5	45	Enolaza
Alt a 6	11	Białko kwaśne rybosomalne P2
Alt a 10	53	Dehydrogenaza aldehydowa

Pleśń/Alergen	Masa cząsteczkowa (kDa)	Nazwa biochemiczna
Cladosporium herbarium		
Cla h 3	53	Dehydrogenaza aldehydowa
Cla h 4	11	Białko kwaśne rybosomalne P2
Cla h 6	46	Enolaza
Cladosporium cladosporioides		
Cla c 9	36	Wakuolarna proteaza serynowa
Aspergillus fumigatus		
Asp f 1	18	Rybonukleaza
Asp f 3	19	Białko peroksysomalne
Asp f 5	40	Metaloproteinaza
Asp f 8	11	Białko rybosomalne P2
Aspergillus flavus		
Asp fl 13	34	Alkaliczna proteaza serynowa
Aspergillus niger		
Asp n 14	105	Beta-ksylozydaza
Asp n 18	34	Wakuolarna proteaza serynowa
Asp n 25	66÷100	3-fitaza B
Penicillium chrysogenum		
Pen ch 13	34	Alkaliczna proteaza serynowa
Pen ch 18	32	Wakuolarna proteaza serynowa
Pen ch 20	68	N-acetyloglukozaminidaza
Penicillium brevicompactum		
Pen b 13	33	Alkaliczna proteaza serynowa
Pen b 26	11	Białko kwaśne rybosomalne P1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [51].

Niektóre grzyby pleśniowe z różnych gatunków produkują toksyny. Mykotoksyny to toksyczne związki organiczne o masie cząsteczkowej w granicach 200÷800 Da, wytwarzane przez grzyby pleśniowe należące m.in. do rodzajów *Aspergillus*, *Alternaria*, *Penicillium*. Wszystkie mykotoksyny są trujące dla człowieka, zwierząt, roślin i mikroorganizmów, a na ich wydajność wpływa wiele czynników, takich jak skład chemiczny podłoża, obecność niektórych mikroelementów i mikroorganizmów towarzyszących, temperatura, wilgotność środowiska. Produkcja tych substancji jest właściwością szczepową, w obrębie jednego gatunku mogą występować ponadtysiąckrotne różnice w ilościach mykotoksyn wytwarzanych przez różne szczepy, choć zdarzają się również takie, które nie mają tej zdolności [38, 79].

Obecność mykotoksyn w zagrzybionych obiektach zabudowy historycznej, chociaż poruszana przez wielu autorów, jest nadal mało poznana. Spektrum oddziaływania biologicznego mykotoksyn jest szerokie, obejmuje m.in. działanie genotoksyczne, rakotwórcze, estrogenne, cytotoksyczne i wiele innych niekorzystnych oddziaływań [2, 4÷5, 20]. Dane literaturowe wskazują, że grzyby obecne w środowisku ogólnym mogą negatywnie wpływać na zdrowie ludzi. Istotne jest stosowanie

się do zaleceń dotyczących eliminacji grzybów z przestrzeni obiektów zabytkowych. Problem występowania w budownictwie szkodliwych dla zdrowia ludzi mikroorganizmów jest ciągle aktualny, a wszelkie procesy mające na celu ich usunięcie wiążą się bezpośrednio z niezwykle ważną profilaktyką zdrowotną. Stan przejawiający się złym samopoczuciem i ogólnym spadkiem odporności organizmu jest określany jako zespół chorego budynku (z ang. *Sick Building Syndrome*, *SBS*). Towarzyszą mu osłabienie, bóle, zawroty głowy, chroniczne zmęczenie, kaszel, kłopoty ze snem i nudności [26÷28]. Wśród czynników odpowiedzialnych za SBS znajdują się:

a) **zanieczyszczenia chemiczne** – zanieczyszczenia z zewnątrz, tj. spaliny samochodowe i inne produkty uboczne spalania, mogą się dostać do budynku przez otwory wentylacyjne i wylotowe (łazienek i kuchni), okna oraz źle umieszczone otwory wlotowe powietrza. Przez te ostatnie mogą się dostać również azbest, kurz i ołów. Zanieczyszczenia chemiczne mogą też pochodzić z wewnątrz, są to tzw. lotne związki organiczne. Ich głównymi źródłami są kleje, wykładziny, maszyny kopiujące, pestycydy, produkty z drewna, środki czyszczące itp. Do wzrostu zanieczyszczeń chemicznych pomieszczeń przyczyniają się także dym tytoniowy, produkty uboczne spalania z pieca i niewentylowane ogrzewacze pomieszczeń;
b) **zanieczyszczenia biologiczne** – obejmują pyłki, bakterie, wirusy oraz grzyby pleśniowe. Rozmnażają się one w wodzie nagromadzonej w nawilżaczach, rurach odpływowych, kanałach, na płytach sufitowych, izolacji, tapicerce i dywanach. Zanieczyszczeniami biologicznymi są również odchody owadów i ptaków. Tego rodzaju zanieczyszczenia powodują gorączkę, kaszel, ucisk w klatce piersiowej, dreszcze, bóle mięśni oraz reakcje alergiczne. W budynkach biurowych z dużą liczbą pracowników choroby przenoszone są drogą powietrzną (sprzyja temu klimatyzacja) i mogą szybko się rozprzestrzeniać między jednostkami;
c) **niewystarczająca wentylacja** – nieprawidłowo działające systemy klimatyzacyjne, wentylacje i ogrzewanie. Objawy choroby występują częściej w budynkach klimatyzowanych niż w tych z naturalną wentylacją;
d) **promieniowanie elektromagnetyczne** – rozbudowane okablowanie bez odpowiedniego uziemienia wytwarza wysokie pole magnetyczne, co zostało powiązane bezpośrednio z przyczynami nowotworów. Sprzęty AGD i RTV, tj. kuchenki mikrofalowe, telewizory czy komputery, emitują promieniowanie elektromagnetyczne, które jonizuje powietrze, co wpływa niekorzystnie na użytkowników pomieszczeń;
e) **czynniki psychologiczne** – nadmierny stres w pracy, słabe relacje interpersonalne, zła komunikacja i niezadowolenie.

Użytkownicy budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej, u których występuje zespół chorego budynku, mają niespecyficzne objawy. Zły stan zdrowia zwiększa absencję chorobową, a także powoduje spadek wydajności pracowników. Syndrom chorego budynku służy do opisania sytuacji, w której osoby znajdujące się w budynkach doświadczają znaczących skutków zdrowotnych, także tych związanych z dyskomfortem, powiązanych bezpośrednio z czasem przebywania w nich [51, 87, 90÷91].

1.1.4. Korozja mechaniczna

W wyniku działania czynników mechanicznych powstają ubytki w ścianach murowych spowodowane ścieraniem, wymywaniem, mogą się też pojawić pęknięcia lub rozwarstwiania materiału konstrukcyjnego. Destrukcję tę można podzielić na wewnętrzną – o charakterze zarówno statycznym, jak i dynamicznym oraz zewnętrzną – z charakterystycznym dynamicznym sposobem działania. Statyczny charakter oddziaływań wewnętrznych polega w głównej mierze na występowaniu długotrwałych naprężeń o wysokich wartościach i jest także nazywany korozją naprężeniową. W wyniku tego procesu zachodzą miejscowe uszkodzenia, które rozwijając się, prowadzą do poważnych zniszczeń, a nawet katastrof budowlanych. Tego typu korozja jest szczególnie trudna do wykrycia w materiałach mineralnych, ponieważ w jej przebiegu brak widocznych objawów. W materiałach ceramicznych, zaprawach czy kamieniach sposób odkształcania przekroju pracującego jest niejednorodny. Ta zależność w przypadku murów ceglanych jest również przyczyną ich zniszczenia jeszcze przed utratą wyczerpania wytrzymałości cegły na ściskanie. Wzrastające naprężenia pociągają za sobą rozszczepianie struktury, co obserwujemy w postaci pęknięć spoin. Szczególnie narażone na korozję naprężeniową są konstrukcje, na które oddziałują lokalnie skoncentrowane obciążenia, a więc ściany nośne, kolumny czy filary. Objawem destrukcji są tu miejscowe ugięcia lub przemieszczenia – nie są groźne, jeśli nie powodują zmęczenia materiałów i zmiany ich właściwości fizycznych. Długotrwałe występowanie naprężeń wspomagane siłami wewnętrznymi może jednak doprowadzić do nagłego zniszczenia elementów, a w konsekwencji do katastrofy. Należy nadmienić, że szczególne zagrożenie powstaje wskutek nakładania się procesu korozji naprężeniowej z innymi czynnikami wywołującymi zniszczenia, zwłaszcza wilgocią i korozją atmosferyczną [3, 31÷32, 60].

Procesy destrukcyjne wywoływane oddziaływaniami dynamicznymi są związane z ruchem i działalnością ludzi oraz maszyn zarówno wewnątrz budynku zabytkowego, jak i poza nim, ale mogą mieć też charakter niezależny od działalności człowieka, np. naturalne zjawiska sejsmiczne. Działania człowieka i maszyn sprowadzają się do ruchu ciężkich pojazdów czy przelotów samolotów. Drgania i wstrząsy oddziałują bezpośrednio na budynek bądź są na niego przekazywane za pośrednictwem podłoża. W efekcie struktura materiału ulega rozluźnieniu, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie nośności, które prowadzi do deformacji zabytku, spękania, a niekiedy poważnych zniszczeń. Podobne następstwa są spowodowane naturalnymi zjawiskami sejsmicznymi, w wyniku których przemieszczają się masy ziemne, uszkadzając w ten sposób fundamenty i inne elementy nośne. Dla dzisiejszych zabytków architektury nie mniej negatywne w skutkach są operacje wojenne – bomby i pociski artyleryjskie powodują nie tylko ubytki materiału, lecz także przyczyniają się w głównej mierze do osłabienia ogólnej sztywności konstrukcji, przy czym nie muszą one oddziaływać bezpośrednio na budynek. Często siła podmuchu lub drgania wywołana spadającym pociskiem prowadzi do większych szkód niż drgania sejsmiczne czy silne huragany. Zniszczenie elementów stalowych (np. kotwi, ściągów czy rozpór) – przede wszystkim

w wyniku procesów korozji chemicznej – również przyczynia się do destrukcji materiału murowego i utraty jego stabilności [31÷32, 60].

1.1.5. Wpływ topografii terenu i jakości podłoża

Uszkodzenie konstrukcji budynku zabytkowego może też wynikać z przeobrażeń zachodzących w środowisku ściśle związanym z obiektem, w szczególności zaś z naruszenia stabilności terenu i podłoża. Procesy związane ze zmianą topografii terenu i utratą wymaganej jakości podłoża są skomplikowane i trudne do wyjaśnienia. Powodem takiego stanu rzeczy są niepoznane jeszcze, często anomalne zjawiska zachodzące w gruncie latami. W dotychczasowych badaniach wśród okoliczności wywołujących destrukcyjny wpływ na warstwę nośną budynków zabytkowych wyróżniono [54, 60]:

- niekorzystną konfigurację fundamentów,
- nieodpowiednią do panujących warunków ziemnych konstrukcję,
- niewłaściwą eksploatację terenu wokół budowli,
- zmiany warunków hydrogeologicznych,
- zjawiska sejsmiczne.

Wymienione zjawiska powodują nierównomierne osiadanie poszczególnych części budowli, co w konsekwencji prowadzi do powstania rys i spękań. Budynki zabytkowe, których zarys jest wydłużony lub załamany, mające nieprawidłowo ukształtowane fundamenty bądź niewyważoną statycznie bryłę, wpływają na przemieszczanie gruntu z racji niejednakowego nacisku, a co za tym idzie, nierównomiernego osiadania. Niewłaściwa eksploatacja terenu sąsiadującego z budynkiem wiąże się z przemieszczaniem dużych mas ziemnych, niszczeniem lasów, eksploatacją podziemną. Wspomniane wyżej okoliczności często występują w pobliżu wyrobisk podziemnych, na skutek ruchów tektonicznych tworzą się różnorodne deformacje czy zauważalne pełzanie terenu powodujące naruszenie równowagi mas ziemnych, czego efektem są uszkodzenia ścian murowych budynków zabytkowych. Znaczne zniszczenia mogą także zachodzić w przypadku, gdy budynki posadowione są na obszarze starych gruntów użytecznych, gdzie może dochodzić do zapadania się dawniej istniejących piwnic, tuneli itp. Przemiany powodujące obniżenie poziomu wód gruntowych lub wywołujące zmianę kierunku ich przepływu są stosunkowo najniebezpieczniejsze, ponieważ są związane w głównej mierze z regulacją rzek oraz niszczeniem dawnych systemów nawadniania [31÷32, 60]. Wyżej wymienione zmiany niekorzystnie oddziałują na wytrzymałość podłoża fundamentów, m.in. przez wypłukiwanie drobnych części gruntu. Jeśli jest on silnie zawilgocony albo poziom wody gruntowej jest wysoki, to mogą w nim wystąpić odkształcenia związane z cyklicznym zamarzaniem i odmarzaniem, których następstwem jest uszkodzenie fundamentów i innych podziemnych konstrukcji budynku zabytkowego. Ponieważ grunty mają budowę geologiczną sprzyjającą naruszaniu stosunków ziemnych przy zwiększonym nawodnieniu, może wówczas nastąpić naruszenie systemu wód gruntowych, pękanie terenu,

a w efekcie osuwanie się gruntu. Procesami niezależnymi od człowieka i trudnymi do przewidzenia są naturalne zjawiska sejsmiczne. Są one szczególnie niebezpieczne i destruktywnie wpływają na ukształtowanie terenu oraz stosunki wodne panujące w podłożu, a w następstwie niszczą konstrukcje murów ceglanych zabytków architektury [3, 54, 60, 72].

2. Uszkodzenia spowodowane wadami wykonawstwa oraz warunkami użytkowania

Istotnymi przyczynami zbyt szybkiego niszczenia ścian murowych konstrukcji budynków zabytkowych mogą być: użycie nietrwałych i nieodpowiednich materiałów budowlanych, wadliwe wykonanie, niedokładne lub błędne założenia statyczne, a także błędna ocena cech gruntu.

Wytrzymałość i trwałość ścian murowych, zwłaszcza tych znajdujących się pod aktywnym obciążeniem, jest uzależniona w głównej mierze od jakości zastosowanych materiałów, a więc wytrzymałości cegły albo kamieni, solidności i przyczepności zaprawy, sposobu wiązania, który powinien zapewnić trwałą równowagę statyczną układu niezależnie od współpracy zaprawy. Ważne są również grubość i wielkość spoin, jakość ich wykonania i poprawność rozwiązania konstrukcyjnego. Ściany, filary i inne elementy murowane powinny być zaprojektowane tak, aby nie dopuszczać do skraplania pary wodnej we wnętrzu konstrukcji murowej lub na jej powierzchni, w stopniu wpływającym szkodliwie na trwałość i wytrzymałość samej konstrukcji [3, 54, 68, 72].

Wzniesione w przeszłości konstrukcje ceramiczne, a przede wszystkim kamienne, często nie spełniają wyżej wymienionych wymagań. W tych drugich często przeplatają się warstwy wykonane z materiałów o różnych cechach mechanicznych i fizycznych z naturalnymi wadami. W związku z powyższym mury w przekroju mają niejednorodną strukturę. Poszczególne kamienie w konstrukcji murowej ścian pracują nierównomiernie i mają różną odporność na działanie odkształceń statycznych oraz czynników niszczących. W wielu przypadkach w początkowym okresie budownictwa przy kształtowaniu konstrukcji murowych stosowano niewłaściwie obrobione kamienie, a także nie przestrzegano regularności wiązania, wypełniania spoin zaprawą, wprowadzenia lica do pionu. Miejsca, w których występowały wady, pokrywano zaprawą, stąd znaczna grubość spoin i tynków w konstrukcjach ścian murowych budynków zabytkowych. Budowle z cegły wznoszono poprawnie pod względem zachowania wiązania, jednakże i tu zarówno w przekroju murów, jak i częściach licowych spotkać można cegły o różnej jakości. Obok tych dobrze wypalonych wykorzystywano też te z wadami produkcyjnymi w postaci dużych i włoskowatych pęknięć powstałych przy suszeniu oraz wypalaniu na skutek niewłaściwego wymieszania surowca [3, 31÷32, 60].

Opisane wyżej wady strukturalne materiałów ceramicznych przyspieszają proces niszczenia zabytku. W dawnych konstrukcjach, zarówno kamiennych, jak i ceglanych, nie wykonywano ani izolacji przeciwwilgociowej poziomej pomiędzy murami fundamentowymi a murem części nadziemnej budynku, ani izolacji pionowej na styku z gruntem murów pomieszczeń podpiwniczonych. W wielu przypadkach w grubych murach występują nieregularnie przebiegające kanały czy wnęki, a także niewypełnione przestrzenie po zbutwiałych drewnianych kotwiach i innych konstrukcjach [31].

Do częstych wad konstrukcyjnych należą również łączenie ścian podłużnych z poprzecznymi na suchy styk, jak też błędne rozwiązania otworów na stolarkę okienną i drzwiową, a w szczególności nadproży. Poza omówionymi wyżej czynnikami do wyjątkowo niebezpiecznych należą wady w sposobie fundamentowania i wady samych fundamentów. Błędy w ich konstrukcji wynikają z niedostatecznie dobranych powierzchni nacisku na grunt lub też ze zbyt płytkiego ich posadowienia. Najczęściej jest to spowodowane złą znajomością rodzaju i jakości gruntów. Zdarzają się przypadki, że płytsze posadowienie nastąpiło wskutek późniejszego ścięcia warstw terenu otaczającego budynek w związku z jego regulacją albo nawet erozją.

Wady konstrukcyjne w murowanych ścianach budynków zabytkowych można także stwierdzić w nieumiejętnym zastosowaniu przekrojów sklepień, arkad, nadproży, podpór, jak też ścian nośnych [3, 54, 68, 72]. W przypadku nadmiernych deformacji lub spękania sklepień i łuków można zauważyć, że w podporach, w następstwie zwiększonych wielkości rozporu, powstają przemieszczenia, rozwarstwienia spoin, zarysowania i ogólne osłabienie więzi przestrzennych. Pośrednio na mury wpływają również procesy niszczące zachodzące w stropach – wskutek osłabienia przekroju stropu mogą także występować przemieszczenia i poważne uszkodzenia ścian. Podobne zjawisko zachodzi przy pokryciach płaskich, jeżeli ich przekrój nie jest dostosowany do rozpiętości i obciążenia. Znaczne szkody w utrzymaniu ścian murowych budynków zabytkowych mogą też wyrządzić błędy konstrukcyjne powstałe w wyniku nieprzemyślanych poczynań konserwatorskich. Szczególnie niekorzystnie na trwałość zabytków architektury wpływają nieracjonalne konstrukcje lub zastosowanie układów, które nie tylko nie przyczyniają się do wzmocnienia budynku, lecz wręcz przeciwnie – stają się powodem naruszenia równowagi istniejącego systemu konstrukcyjnego [34÷35, 72].

2.1. Procesy destrukcyjne spowodowane warunkami użytkowania

Budynki zabytkowe lub inne obiekty budowlane w miarę upływu czasu i eksploatacji ulegają destrukcji i dotyczy to zarówno konstrukcji, jak i elementów wystroju wnętrza. Ten proces jest bardzo zróżnicowany i zależy od wielu czynników, takich jak: wiek

budowli, warunki pracy, właściwości użytych materiałów, zdarzenia losowe. Trwałość ścian murowych budynków zabytkowych w dużym stopniu jest uzależniona od warunków użytkowania. Wskutek świadomych, choć także często nieświadomych zmian będących dziełem człowieka zostają naruszone pierwotne proporcje, logika układu konstrukcyjnego oraz wystrój wnętrz. Wiele budynków zabytkowych zostało przebudowanych, zaadaptowanych do innych funkcji, niż wynikało to z ich pierwotnego założenia. Nierzadko zmiany te były związane z upodobaniami właścicieli oraz chęcią przystosowania obiektu do stylu panującego w danej epoce, dlatego niejednokrotnie dokonywano ich niezgodnie z zasadami sztuki budowlanej, nie zdając sobie sprawy ze zgubnych następstw tych prac.

Istotne, a jednocześnie bardzo niekorzystne dla nośności i trwałości konstrukcji budowli są zmiany sklepień, wyburzanie ścian nośnych oraz poszerzanie otworów drzwiowych i okiennych. Działania te zmieniają układ statyczny, deformują przekroje pracujące oraz osłabiają więzi przestrzenne, co w efekcie powoduje nieodwracalne uszkodzenia. Również adaptacja budynków do innych celów pociąga za sobą niszczenie ścian, stropów oraz ich wystroju wskutek nieprawidłowego użytkowania pomieszczeń.

Brak systematycznej konserwacji, a także jej nieumiejętne przeprowadzanie to kolejne powody szybko rozwijających się uszkodzeń prowadzących do zdewastowania przestrzeni budynku. Najczęściej przyczyniają się do tego czynniki mechaniczne spowodowane zachodzącymi przeobrażeniami i deformacją podłoża, na którym jest posadowiona budowla, naruszeniem równowagi mas ziemnych oraz zmianą stosunków wodnych w sąsiedztwie budowli. Mechaniczne uszkodzenie budynku może również nastąpić w wyniku drgań lub wstrząsów pochodzących od bodźców zewnętrznych. W przypadku zabytków usytuowanych przy ulicach i drogach przyczyną poważnych uszkodzeń mogą być wstrząsy i drgania wywołane ruchem ludzi bądź maszyn znajdujących się wewnątrz obiektu, a także płynące ze źródeł zewnętrznych. Drgania z nawierzchni przenoszone są przez grunt na fundamenty budynków, a następnie na ściany i stropy. Mogą także naruszać strukturę gruntu pod budynkiem, podobnie jak przy drganiach sejsmicznych. Zjawiska te, nawet gdy mają niedużą siłę, powodują spękania murów, szczególnie ciężkich i mających sztywniejszą konstrukcję. Wstrząsy i drgania, naruszając spoistość warstw budowli, dodatkowo sprzyjają pogłębianiu procesów destrukcyjnych pochodzących z innych kierunków, takich jak: warunki atmosferyczne i zanieczyszczenie środowiska, procesy biochemiczne, wysokie temperatury, naprężenie materiałów i ich wady, wykonawstwo oraz warunki użytkowania [3, 54, 60, 69÷75].

Należy również podkreślić, że użytkowanie budynków zabytkowych w charakterze gmachów użyteczności publicznej, lokali lub obiektów usługowych oraz każda zmiana sposobu ich eksploatacji są ściśle powiązane z dostosowaniem ich do aktualnie obowiązujących przepisów, co w efekcie zmienia i ogranicza ich charakter. Wiąże się to głównie ze „świadomym" uszkadzaniem takich obiektów poprzez wprowadzanie nowych instalacji czy dźwigów osobowo-towarowych. Ponadto praktykowane jest też dostawianie nowych budynków o często dysharmonizującym wyglądzie

w stosunku do istniejącej już starszej zabudowy, wykonanej w odmiennym stylu. Takie działania pociągają za sobą inne sposoby użytkowania budynków zabytkowych poprzez ich adaptację do nowych warunków eksploatacji i wymagań właścicieli, których w momencie ich powstania nie zakładano. Każda planowana zmiana w zabytku nieruchomym powinna zostać dogłębnie przeanalizowana i zweryfikowana odpowiednim algorytmem obliczeniowym, obejmującym parametry: wytrzymałościowe, cieplno-wilgotnościowe oraz procesy starzenia się tych obiektów w nowych warunkach eksploatacji budynku [3, 54, 72].

Z punktu widzenia konserwatorsko-technicznego badania rys powinny wykazać przyczyny uszkodzeń oraz ich mechanizm działania i zakres. Istotna jest identyfikacja źródła wywołującego zniszczenia, co w konsekwencji pozwala rozpoznać tendencje rozwojowe, zlikwidować przyczyny zagrożeń i zastosować środki techniczne. Należy zwrócić szczególną uwagę na zróżnicowanie charakteru badań, który praktycznie dla każdego budynku jest inny i zależy od jego cech, przyczyn i zakresu zniszczeń oraz posiadanych informacji.

3. Prace konserwatorsko-restauratorskie murowanych ścian budynków zabytkowych

Następstwem procesów destrukcyjnych zachodzących w materiałach konstrukcyjnych murowych ścian budynków zabytkowych są wszelkiego rodzaju spękania, rysy, ubytki w postaci wykruszeń, braków pojedynczych cegieł bądź ich większej ilości. Defekty te rzutują na stan techniczny całego budynku, jego walory użytkowe oraz estetykę. W związku z powyższym zachodzi konieczność przeprowadzenia zabiegów mających na celu trwałą ochronę, kompleksową naprawę, a także zahamowanie procesów niszczenia. W przypadku kiedy ogólny stan techniczny zabytku jest dobry, a występujące ubytki są niewielkie, np. uszkodzone cegły, to zalecane jest przemurowanie tego fragmentu muru (cegieł) oraz wypełnienie ubytków **odpowiednio opracowaną zaprawą uzupełniającą**.

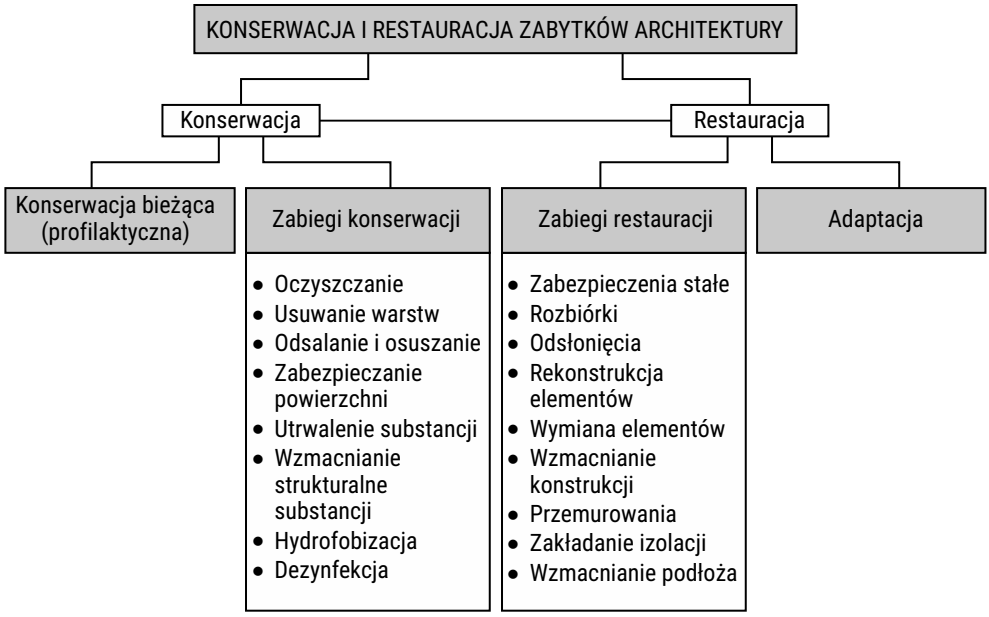
Metody iniekcyjne mają na celu wtórne zespolenie struktury uszkodzonego elementu poprzez wypełnienie spękań i zarysowań specjalnym materiałem naprawczym. Jeśli natomiast liczba zniszczonych cegieł jest znaczna lub zachodzi konieczność odbudowy ścian budynku, a do dyspozycji jest część oryginalnej konstrukcji, to przemurowuje się istniejące pozostałości muru lub domurowuje konstrukcję. Niejednokrotnie też w ścianach czy słupach, które uległy uszkodzeniu i utraciły wymaganą nośność, stosowane są wzmocnienia [34÷35].

W zależności od stopnia zniszczenia można przeprowadzić:

- konserwację, mającą na celu utrwalenie i wzmocnienie fizyczne materiału konstrukcyjnego przy użyciu odpowiednich metod, bez ingerowania w formy architektoniczne, z zachowaniem kształtów nadanych budynkowi podczas przemian historycznych,
- restaurację, która poza procesami konserwacji obejmuje dodatkowo zmiany i uzupełnienia dążące do przywrócenia pierwotnego kształtu i wyglądu,
- rekonstrukcję, której celem jest odtworzenie zniszczonego budynku,
- restytucję, polegającą na oddaniu pierwotnej formy i funkcji z jednoczesnym usunięciem naleciałości [34÷35, 62, 71].

Rodzaj zabytku architektury, a także zakres zniszczeń wymagają zastosowania adekwatnej metody i materiałów uzupełniających. W przypadku budynków zabytkowych, ze względu na indywidualny charakter oraz konieczność przetrwania budowli w historycznym kształcie i wyglądzie, konieczne jest uwzględnienie autentyzmu

materiału, wykonanie napraw zaś musi być poprzedzone odpowiednimi badaniami. Niezbędne jest również opracowanie dokumentacji konserwatorskiej zawierającej: inwentaryzację i opis przeprowadzonych analiz wraz z dokumentacją fotograficzną, opis materiałów i technik, które mają zostać zastosowane, metodykę, rozwiązania materiałowe i proponowaną kolejność realizacji prac. Tak przygotowana dokumentacja ułatwi stworzenie programu naprawczo-wykonawczego budynku zabytkowego. Niedopuszczalne jest wykonanie błędnych lub niekompletnych analiz, które mogą być powodem awarii, degradacji czy nawet katastrofy budowlanej. Przy wykonywaniu remontów (renowacji) do minimum należy ograniczać wykorzystanie innowacyjnych materiałów, nawet kiedy charakteryzują się wyższą wytrzymałością, a także mniejszą odkształcalnością od materiałów tradycyjnych. Wynika to z faktu, że nieznane jest ich zachowanie w zakresie odkształcalności, współoddziaływanie z aktualnie użytymi materiałami uzupełniającymi oraz z uwagi na zachowanie autentyzmu naprawianej konstrukcji zabytku architektury. Istotne jest także, by właściwe prace konserwatorskie zawsze poprzedzać usunięciem źródeł zniszczeń, jak również zabiegami mającymi na celu ograniczenie do minimum oddziaływania szkodliwych dla murów konstrukcyjnych czynników destrukcyjnych. Sprowadza się to do naprawy uszkodzeń więźby i pokrycia dachowego, systemu zabezpieczenia przed oddziaływaniem wód gruntowych poprzez wykonanie izolacji czy drenażu [62, 71]. Zakres prac konserwatorsko-restauratorskich przedstawiono na rysunku 3.1.



RYS. 3.1. Rodzaje prac i zabiegów w procesie konserwacji i restauracji zabytków architektury

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [71].

Prace konserwatorsko-restauratorskie są zagadnieniem szczególnie aktualnym ze względu na istnienie wielu niszczejących budynków zabytkowych, w których naruszono strukturę ścian, murów i detali architektonicznych, lecz konstrukcja nie uległa jeszcze znacznej degradacji i nie wymaga prac polegających na całkowitej odbudowie czy przebudowie. Według prostej zasady, że „lepiej zapobiegać, niż leczyć", temat restauracji ma pierwszeństwo przed pracami rekonstrukcyjnymi.

3.1. Analiza przydatności stosowanych technik i materiałów

Charakterystyczną cechą budynków zabytkowych jest ich specyficzny charakter użytkowy decydujący zarówno o wyborze adekwatnej metody, jak i zastosowaniu odpowiednich materiałów naprawczych. Każdy zabytek wymaga indywidualnego podejścia opartego na określonych badaniach, a uogólnienie problemu jest w tym przypadku niedopuszczalne. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na wybór materiałów, a także technologii naprawy, są: wartość historyczna i architektoniczna budynku, rodzaj materiałów użytych do jego wzniesienia, fizykochemiczne warunki panujące wewnątrz muru (m.in. ilość i rodzaj rozpuszczalnych soli), a przede wszystkim funkcja i znaczenie naprawianych elementów. W ten sposób określamy przyczyny zniszczeń, mechanizmy działania procesów destrukcyjnych oraz stopień zagrożenia. Niewłaściwa technika naprawcza w skrajnych przypadkach może doprowadzić do dewastacji, a nie – jak zakładano – poprawy stanu budynku [85]. Wszelkie wymagania odnośnie do metod oraz materiałów naprawczych są precyzowane przez odpowiednie inżynierskie i konserwatorskie kryteria stosowalności, które przedstawiono w tabeli 3.1.

Wymienione kryteria pozwalają na dobór odpowiednich technik naprawy do konkretnie rozpatrywanych budynków zabytkowych oraz danego typu uszkodzenia. W przypadku spękań czy rys techniki tradycyjne należy stosować z dużą ostrożnością. Wykucie cegieł z muru w celu przemurowania może w konsekwencji naruszyć stateczność konstrukcji czy doprowadzić do znacząco większych uszkodzeń. Z kolei zastosowanie nieodpowiednich zapraw albo cegieł może powodować rozpad i kruszenie się substancji budowlanej lub odbiegać kolorystyką bądź fakturą od materiału macierzystego. Zaleca się więc metody iniekcyjne, gdzie regeneracja jest nieznaczna, z zachowaniem autentyczności zabytku architektury. Jednakże w przypadku konieczności uzupełnienia ubytków praktycznie jedyną możliwością przeprowadzenia naprawy są techniki tradycyjne. Zgodnie z powyższymi kryteriami należy wówczas zadbać o zastosowanie **odpowiednich materiałów uzupełniających**, współpracujących z materiałem macierzystym, oraz przeprowadzać wszelkie prace, nie narażając budynku na nadmierne obciążenia [62, 71].

Diagnostyka budynku zabytkowego, który jest rewitalizowany, powinna uwzględniać zagadnienia interdyscyplinarne, wykraczające poza przyjęte powszechnie w praktyce budowlanej działania diagnostyki technicznej. Istotnym jej elementem jest analiza

przydatności stosowanych technik i materiałów naprawczych, dająca gruntowną wiedzę dotyczącą nie tylko wartości technicznej, materialnej budynku, lecz także wartości niematerialnej, która często jest istotną wartością dodaną, pomijaną w pracy diagnostycznej. Określenie lub przynajmniej oszacowanie w fazie wstępnej inwestycji celowości technik i materiałów naprawczych może pomóc inwestorowi w podjęciu kluczowych decyzji inwestycyjnych, zwrócić uwagę na trudności w planowanym przedsięwzięciu i ukazać obszary potencjalnych zysków i oddziaływań. Wnikliwie przeprowadzona ocena przydatności stosowanych technik i materiałów może dać wartość szacunkową zdolności rewitalizacyjnej, wskazać słabe i mocne strony rewitalizowanego budynku, a przy zaawansowanej diagnostyce interdyscyplinarnej, w zależności od stopnia jej szczegółowości i fachowości, może być wiarygodniejsza i dawać obiektywniejsze wyniki.

TABELA 3.1. Wymagania dotyczące metod oraz materiałów naprawczych

Kryteria inżynierskie	• **Bezpieczeństwo konstrukcji budynku:** stosowane techniki naprawy nie powinny pogarszać istniejącego stanu konstrukcji oraz naruszać jego równowagi statycznej • **Trwałość naprawy:** stosowane materiały i metody naprawy powinny zapewniać odporność na zniszczenia oraz trwałą naprawę murów • **Zakres naprawy:** przeprowadzane prace mają prowadzić do maksymalnego zespolenia uszkodzonych elementów oraz zapewnić przywrócenie wytrzymałości konstrukcji • **Ekonomiczność środków technicznych i materiałów:** należy dążyć do zminimalizowania kosztów napraw przy jednoczesnym zapewnieniu ich jak najwyższego poziomu
Kryteria konserwatorskie	• **Utrzymanie pierwotnej formy i idei konstrukcyjnej budynku:** używane materiały powinny uwzględniać autentyzm zabytku, a ingerencja techniczna w substancję materialną powinna być ograniczona. Wskazane jest, aby zastosowane metody prowadziły do naprawy uszkodzonej struktury konstrukcji, nie modyfikując przy tym układu i wystroju zewnętrznego • **Wystrój budynku i materiały użyte do wzniesienia:** materiały i substancje wykorzystane do naprawy nie mogą zawierać środków powodujących niszczenie wystroju i konstrukcji. Zastosowane materiały uzupełniające mają ściśle współpracować z materiałem macierzystym i zapewniać należyte funkcjonowanie struktury muru (tzn. zgodność oraz podobieństwo cech materiałów naprawczych z pierwotnymi)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [62].

Bez względu na rodzaj uszkodzenia przegrody budowlanej, prace mające na celu jej naprawę należy poprzedzić szczegółową analizą dotyczącą określenia przyczyn jego powstania. Zdarzają się sytuacje, że zdiagnozowane defekty tego samego rodzaju mają całkowicie odmienne podłoże, wynikające ze specyfiki warunków użytkowania. Każdorazowo przed podjęciem czynności naprawczych bądź renowacyjnych

należy usunąć przyczynę powodującą występowanie określonych nieprawidłowości. Istotne jest, aby naprawa była kompleksowa. Częściowe wykonanie prac remontowych w wielu przypadkach nie rozwiązuje problemu. Przyjęcie konkretnych rozwiązań naprawczych powinno być poprzedzone szczegółową analizą istniejącej dokumentacji projektowej. Bardzo ważnym etapem prac naprawczych są odkrywki kontrolne umożliwiające weryfikację zgodności wykonawstwa z zapisami dokumentacji projektowej. Przyjęcie wybranej metody naprawczej powinno poprzedzić wykonanie ekspertyzy technicznej wraz z analizą ekonomiczną opłacalności prac renowacyjnych [34÷35, 62, 71].

3.2. Zabezpieczenia

Istotne znaczenie w zakresie ochrony i zachowania budynków o zabudowie historycznej mają prace zabezpieczające. Podejmowane w odpowiednim czasie i przeprowadzane we właściwy sposób znacząco wpływają na zahamowanie procesów destrukcyjnych i są podstawą do podjęcia właściwych prac konserwatorsko-restauratorskich. Dzięki takim krokom możliwe jest zminimalizowanie zakresu robót oraz kosztów związanych z renowacją.

Ze względu na problematykę techniczną można wyróżnić trzy rodzaje stosowanych zabezpieczeń:

- zabezpieczenia otaczającego terenu, którego naruszenie może wywołać niebezpieczne następstwa dla budynku,
- zabezpieczenia zapobiegające oddziaływaniu wszelkich czynników niszczących,
- zabezpieczenia mające za zadanie zapewnienie odpowiednich właściwości statycznych, a także wytrzymałościowych.

Aby wprowadzane zabezpieczenia spełniały swoją funkcję prawidłowo, konieczne są systematyczne, okresowe kontrole stanu cieplno-wilgotnościowego oraz mykologicznego naprawianej konstrukcji oraz wykrywanie źródeł zniszczenia w odpowiednim czasie. Charakter wykonywanych zabezpieczeń, ze względu na aspekty technologiczne, może być prewencyjny lub stabilny. W obu przypadkach są one uzależnione od zamierzeń programowych ochrony danego budynku zabytkowego.

Praktyka konserwatorska wyróżnia wiele metod i sposobów zabezpieczeń, a stopień ich skomplikowania jest tym większy, im bardziej zdegradowany jest rozpatrywany budynek. Czynnością wyjściową, mającą podstawowe znaczenie przy pracach konserwatorsko-restauratorskich budynków zabytkowych, jest zabezpieczenie prewencyjne (tymczasowe). Stosuje się je w sytuacjach awaryjnych albo w przypadkach, gdy pojawiają się problemy gospodarcze, a w szczególności niedobór środków finansowych niezbędnych do wykonania prac naprawczych.

Głównymi celami zastosowania zabezpieczeń prewencyjnych są zahamowanie procesów destrukcyjnych, zlikwidowanie na pewien okres ognisk destrukcji,

a także odizolowanie konstrukcji od niszczących czynników. Często tego rodzaju zabezpieczenia mają także utrzymać konstrukcję budynku w danym stanie technicznym oraz nie dopuścić do zmian w strukturze lub deformacji konstrukcji przed przeprowadzeniem właściwych działań naprawczych. Do tych ostatnich zalicza się zabiegi polegające m.in. na odciążeniu i podparciu nadmiernie obciążonych elementów czy przytrzymaniu tych niebezpiecznie ugiętych, spękanych i zdeformowanych.

Znane są różnorodne metody powyższych zabezpieczeń, które są uzależnione od wielu czynników, m.in. rodzaju i przyczyny uszkodzeń, a także dostępności środków technicznych. Charakterystycznymi cechami zabezpieczeń tymczasowych są brak ingerencji w ukształtowanie struktury układu i jednoczesne stworzenie warunków zapobiegających źródłom powstawania zniszczeń i ograniczających skutki ich działania. Zdeformowane i osłabione elementy ścian murowych często podpierane są przy użyciu stempli, zastrzałów oraz drewnianych konstrukcji z odpowiednimi przekrojami i rozmieszczeniem. W przypadku obawy co do stabilności konstrukcyjnych ścian murowych budynku zabytkowego, niezbędne jest zastosowanie konstrukcji stabilizujących. Ich rodzaj może się różnić: od zastrzałów i kozłów utrzymujących wychylone ściany przez rozpory międzyścienne po kotwie przechwytujące rozpór łuków czy sklepień i zabezpieczające przed przesuwem ścian. Konstrukcje te powinny się odznaczać wysoką sztywnością i wystarczającą statecznością do pracy przez określony czas niezbędny dla przeprowadzenia zaplanowanych badań i zorganizowania właściwych prac wzmacniających. Sposób wykorzystania tych elementów zależy w głównej mierze od stopnia zagrożenia i odpowiadającej konkretnej sytuacji potrzeby działania. Wychylone bądź wybrzuszone murowane ściany zabytków należy podtrzymywać od strony, w kierunku której występują deformacje. Jeśli zaś ściany są wysokie i grozi im wyboczenie, podparcie trzeba zastosować z obu stron muru. Gdy w murowanych elementach konstrukcyjnych występują deformacje albo uszkodzenia, np. w postaci spękań czy ugięć, to przyczyn defektów należy szukać w ich nadmiernym obciążeniu. Pierwszą czynnością powinno być odciążenie elementów, po czym ich stabilizacja konstrukcjami wspomagającymi. Słupy, filary bądź części ścian mogą być odciążane za pomocą adekwatnej liczby drewnianych stempli, z reguły ustawianych na podwalinach lub odpowiednio dobranych tzw. poduszkach, góra stempla zaś opiera się o strop przy użyciu krążyn. Wysokie podpory wzmacnia się kleszczami lub zastrzałami. W szczególnych przypadkach, jeśli przyczyną nadmiernych obciążeń jest zalegający gruz, a następnie dobudowane przegrody, zalecane jest usunięcie materiału i elementów powodujących deformacje.

Należy pamiętać o zachowaniu ostrożności oraz prowadzić prace pod nadzorem konserwatora. Sposoby zabezpieczeń i wzmocnienia sklepień wynikają z ich właściwości statycznych. Istotne w tym doborze jest kierowanie się charakterem deformacji, a także przebiegiem rys i spękań. Gdy odkształcenia i spękania wywołane są rozporem podpór, to główną czynnością, od której należy zacząć, jest wzmocnienie podpór przez zastosowanie konstrukcji przejmujących siły parcia. Konstrukcje te mogą

mieć postać drewnianych bali ukośnie podpierających element, przypór kratowych wykonanych z kształtowników, a w razie potrzeby również prowizorycznych konstrukcji murowanych. Do wzmacniania podpór najczęściej wykorzystywane są zastrzały. Podczas ich stosowania istotne jest ich stabilne obustronne zamocowanie, aby uniknąć przesunięcia.

Zabezpieczeń rozwarstwionych lub spękanych filarów czy kolumn dokonuje się poprzez ich wzmocnienie i odciążenie. Zabezpieczenia prewencyjne obejmują też wszelkie zabiegi chroniące przed czynnikami atmosferycznymi, działaniem wód opadowych i gruntowych oraz zdarzeniami losowymi, jak np. pożary. Dotyczą one zarówno zabezpieczeń zewnętrznych powierzchni zabytku, warstw wewnętrznych ścian murowych, jak i wykończenia wewnętrznego i elementów wyposażenia. Pomimo że zabiegi tymczasowe nie zapewniają trwałego zabezpieczenia konstrukcji oraz nie powstrzymują procesów destrukcyjnych, to odsuwają w czasie niebezpieczeństwo awarii. Ponadto umożliwiają ściślejszy nadzór oraz opracowanie badań i dobór odpowiednich metod trwałego zabezpieczenia, a także wzmocnienia konstrukcji [3, 10÷13, 72÷78].

Trwałe zabezpieczenie budynku zabytkowego poprzedzają prace konserwatorsko-restauratorskie lub są one prowadzone łącznie z etapem wykończeniowym. Często prace dotyczące trwałego zabezpieczenia są związane ze specyfiką robót budowlanych, a ich właściwe ustalenie odgrywa bardzo istotną rolę w procesie naprawy zagrożonych zawaleniem budynków zabudowy historycznej. Prace zabezpieczające można sprowadzić do dwóch podstawowych zadań:

- usunięcia bądź osłabienia szkodliwych czynników stanowiących zagrożenie i mających źródło poza budynkiem,
- zabezpieczenia budowli lub jej uodpornienia na czynniki destrukcyjne.

Przed wykonaniem trwałych zabezpieczeń niezbędne jest rozpoznanie i opracowanie koncepcji ochrony dla konkretnego przypadku, niepowodującej uszczerbku w jego historycznych walorach. W odniesieniu do budynku zabiegi o charakterze trwałym można sklasyfikować jako ingerencję ekstragenną i introgenną. Zabiegi ekstragenne polegają w głównej mierze na zastosowaniu trwałych środków ochrony poza częścią zabudowy, co jest podyktowane potrzebą zachowania autentyzmu. Umożliwiają one zabezpieczenie budynku przed dalszym niszczeniem wskutek oddziaływania otaczającego środowiska. Najczęściej w tym przypadku stosuje się różnego rodzaju osłony zewnętrzne, a także wprowadza się pomocnicze konstrukcje niezwiązane bezpośrednio z zabytkiem architektury. Tego typu zabezpieczenia używane są głównie do ochrony cennych pozostałości ścian murowych budynków zabytkowych, jeśli mają one unikalną wartość historyczną bądź kulturalną, a dodatkowo wymagają odpowiedniego mikroklimatu lub dostępu do badań czy stałej ekspozycji.

Zabiegi o charakterze introgennym mają na celu zmniejszenie zniszczeń i zagrożeń zachodzących wewnątrz ścian konstrukcyjnych, a w konsekwencji przywrócenie pierwotnych funkcji użytkowych. Do zabiegów tych zalicza się m.in. wszelkiego

rodzaju wzmocnienia konstrukcyjne w postaci izolacji przeciwwilgociowych i hydrofobizacji muru, wzmocnienia strukturalne opierające się na elementach umacniających w postaci ściągów, kotew czy podpór oraz impregnację muru specjalnymi preparatami [72÷78].

3.3. Uzupełnianie ubytków przy użyciu cegieł i zapraw

Uszkodzenia murowanych ścian budynków zabytkowych bardzo często wiążą się z koniecznością uzupełnienia brakujących elementów oraz zastosowaniem odpowiednio dobranych cegieł i kompozytów cementowych (**warstw uzupełniających**). Naprawa polega na wypełnieniu zaprawą mniejszych ubytków w murze lub spoinie. Uszkodzoną płaszczyznę cegły skuwa się, a następnie przystępuje się do przemurowania przegrody w miejscu zarysowania. Zastosowana technika zależy od charakteru uszkodzenia. Wyznacznikami (w tym przypadku) są właściwości wytrzymałościowe materiału uzupełniającego, które powinny zapewnić odpowiednią współpracę z pierwotnym budulcem oraz gwarantować zachowanie autentyzmu restaurowanego zabytku.

Stosowanie tradycyjnych metod naprawczych wymaga dużej znajomości dawniejszych technik murarskich, a także użycia właściwych materiałów oraz odpowiedniego połączenia starych partii muru z nowymi [62]. Własności fizykochemiczne zapraw są uzależnione od wielu czynników, które z kolei zależą od zastosowanych składników, takich jak m.in. ciasto wapienne, piasek, kruszone skały, pyły, pucolany, a także innych, uwarunkowanych od rejonów czy tradycji panujących w danej epoce. Na stopień plastyczności i wytrzymałości użytej mieszanki wpływała ilość wody dodanej w procesie produkcji. Badania przeprowadzone przez Zbigniewa Janowskiego [34÷35] wykazały, że przy naprawie obiektów historycznych należy wykorzystywać kompozyty charakteryzujące się cechami fizycznymi i wytrzymałościowymi zbliżonymi do materiału macierzystego. Naprawiana konstrukcja poza wzmocnieniem poszczególnych części powinna mieć także jednorodne wytrzymałość i odkształcalność, dzięki czemu będzie odporniejsza na ewentualne ponowne uszkodzenia. Właściwy dobór faktury i barwy stosowanej warstwy uzupełniającej zapewni zachowanie autentycznego wyglądu budynku.

Do najważniejszych cech gwarantujących podobieństwo warstwy uzupełniającej z materiałem macierzystym należy zaliczyć:

- zbliżoną wytrzymałość na ściskanie,
- zbliżone/lepsze właściwości kapilarne oraz nasiąkliwość,
- dobrą przyczepność do materiału macierzystego,
- podobną strukturę i barwę, a także odporność na działanie czynników niszczących.

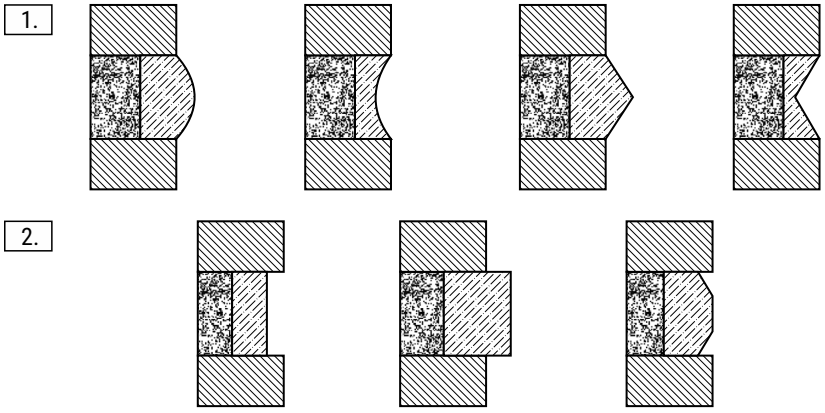
Powszechnym zabiegiem podczas prowadzenia prac naprawczych jest usunięcie zniszczonych cegieł. Dobór cegieł o odpowiednich parametrach stanowi znaczny problem, gdyż produkowane obecnie materiały budowlane różnią się od stosowanych

kilkadziesiąt czy kilkaset lat temu produktów wieloma cechami. Mają zazwyczaj znacznie mniejszą zdolność podciągania kapilarnego wody oraz schnięcia, a także mniejszą nasiąkliwość, charakteryzują się wyższą wytrzymałością na ściskanie. Zastosowanie cegieł o nieodpowiednich parametrach może spowodować dodatkowe szkody, jak również doprowadzić do szybkiego zniszczenia nowej warstwy.

Przykład zastosowania niewłaściwego materiału uzupełniającego przedstawił w swojej pracy Krzysztof Kamiński [42]. Naprawa polegała na przemurowaniu skorodowanej powierzchni cegłą ceramiczną obecnie produkowaną i pokryciu warstwą tynku cementowo-wapiennego. W wyniku silnego zawilgocenia po około 1,5 roku pojawiły się pierwsze wykwity solne, a po kolejnych dwóch latach tynk uległ silnej korozji i odspojeniu. Po wykonaniu badań *in situ* okazało się, że uzupełnione cegły różnią się od starych zarówno nasiąkliwością wagową, jak i zawartością rozpuszczalnych soli.

Istotnym zabiegiem podczas prowadzenia prac restauratorskich jest przemurowanie, stosowane w przypadku mocno spękanych fragmentów ścian, w momencie, gdy szerokość rozwarcia rys przekracza 5 mm. Ma ono na celu odtworzenie pierwotnego wiązania cegieł zapewniającego scalenie rozdzielonych spękaniami części murowanych ścian budynków zabytkowych. W odniesieniu do zabytków architektury szczególnie ważny jest dobór materiałów (cegieł i zapraw) mających takie same lub zbliżone cechy jak materiał pierwotny, co w konsekwencji zapewni odpowiednią współpracę i zachowanie możliwie autentycznego wyglądu budowli. W przypadku konieczności przemurowania dużego fragmentu ściany należy pamiętać o ewentualności wystąpienia zarysowań skurczowych pomiędzy starym i nowym murem [63].

Wskutek oddziaływania procesów destrukcyjnych następuje zwietrzenie zaprawy w spoinach, co stwarza konieczność jej usunięcia i starannego uzupełnienia nowym wątkiem. Spoinowanie nową zaprawą, mającą odpowiednie parametry, zapewnia murowanym ścianom budynków zabytkowych stabilność i bezpieczeństwo. Mieszaniny te powinny charakteryzować się właściwościami fizycznymi i mechanicznymi zbliżonymi do cegieł. Zalecane jest wykorzystywanie zapraw z lepszymi właściwościami kapilarnymi, większą nasiąkliwością i zdolnością schnięcia, zbliżonym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej oraz niższą wytrzymałością mechaniczną. Dzięki powyższym cechom cegły przejmują wodę, a także zapewniają jednostkom murowym elastyczność i dobrą odkształcalność, zapobiegając tym samym powstawaniu rys. W przypadku zastosowania zaprawy mało porowatej i źle transportującej wodę zniszczeniu będzie ulegać bezpośrednio cegła. Jednocześnie nowe zaprawy są bardziej narażone na procesy destrukcyjne niż cegły i szybciej się niszczą. Zabieg spoinowania przeprowadza się w sytuacji pozostawienia muru bez tynku, w celu zabezpieczenia go przed wpływami atmosferycznymi [71]. Ma to zwykle miejsce w przypadku obiektów zabytkowych wykonanych z cegły, które wcześniej nie były tynkowane. Przykłady spoinowania wtórnego przedstawiono na rysunku 3.2.



RYS. 3.2. Przykłady spoinowania wtórnego (1 – zalecane, 2 – dopuszczalne)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [71].

Przed przystąpieniem do spoinowania należy zwilżyć uprzednio oczyszczone spoiny, aby materiał murowy nie odbierał wody z zaprawy; mogłoby to niekorzystnie wpłynąć na właściwości zaprawy. Spoiny powinny być puste na głębokość 8÷10 mm, należy też wykluczyć zaleganie wody, śniegu czy lodu na odsłoniętych płaszczyznach poziomych cegły lub zaprawy. Zawsze trzeba jednak pamiętać, jak zauważa w swojej pracy Jan Tajchman [71], że autentyczna pod każdym względem spoina jest korzystniejsza od najlepszej nowej. W związku z tym starą spoinę należy usuwać tylko, gdy istnieją ku temu uzasadnione przesłanki, czyli gdy jest ona zbyt zniszczona, aby nadal prawidłowo spełniać powierzone jej funkcje. Większe zaś ubytki trzeba uzupełniać punktowo, nie naruszając spoiny niezniszczonej (ewentualnie wzmocnionej). Powierzchnie spoin muszą mieć kształt tych oryginalnych. W przypadku braku wzorca zaleca się nadanie im kształtu charakterystycznego dla epoki, z której pochodzi restaurowany budynek. Należy również zauważyć, że ze względów kolorystycznych opracowana zaprawa z dodatkiem biowęgla nie będzie stosowana jako warstwa licowa, a jedynie podtynkowa.

3.4. Strukturalne wzmacnianie murów

Najpowszechniej występującą i najmniej inwazyjną metodą naprawy uszkodzonych murowanych ścian budynków zabytkowych jest metoda iniekcji. Dzięki niej wypełnione zostają szczeliny i wolne przestrzenie, co zapewnia murowi jednolitość, a w konsekwencji wzmacnia zaprawę, która wskutek eksploatacji uległa uszkodzeniu. Istota metody iniekcyjnej leży we wprowadzeniu do rozwarstwionych elementów konstrukcyjnych specjalnych materiałów w postaci płynnych mieszanek iniekcyjnych.

Ze względu na sposób wprowadzania wypełniacza wyróżnia się trzy rodzaje iniekcji: grawitacyjną, próżniową, ciśnieniową. W przypadku tej pierwszej materiał iniekcyjny znajduje się w zbiorniku umieszczonym 4–6 m nad uszkodzonym elementem. Pod wpływem wytworzonej różnicy ciśnienia hydrostatycznego o wartości 0,06÷0,08 MPa spływa przez gumowy wąż i wypełnia rozwarstwienia. Ta metoda iniekcji ze względu na niewielką wartość ciśnienia hydrostatycznego jest mało skuteczna w sytuacji występowania trudno dostępnych rozwarstwień, spękań i szczelin. W iniekcji próżniowej wykorzystywane jest zjawisko podciśnienia. Szczeliny – pozbawione przez agregat próżniowy powietrza i wody – wsysają do wnętrza środek wiążący, który w konsekwencji szczelnie je wypełnia. Problemem jest wytworzenie podciśnienia we wszystkich szczelinach.

Iniekcja ciśnieniowa natomiast opiera się na wtłoczeniu wypełniacza pod ciśnieniem o wartości 0,2÷0,4 MPa. Sposób wprowadzania iniektu jest bardzo podobny do tego w metodzie grawitacyjnej, lecz przy użyciu znacznie wyższego ciśnienia, a dokładność wypełnienia jest porównywalna z metodą próżniową. Wyżej wymienione aspekty sprawiają, że metoda iniekcji ciśnieniowej jest najpraktyczniejszą metodą strukturalnego wzmacniania murowanych ścian budynków zabytkowych, a w związku z tym również najczęściej wykorzystywaną.

Każda metoda powinna być poprzedzona pracami wstępnymi. Sprowadzają się one do nawiercenia gniazd pakerów, przez które wprowadzany będzie środek, przemycia i oczyszczenia szczelin wodą pod ciśnieniem 0,05÷0,1 MPa oraz powierzchniowego uszczelnienia spękań zapobiegających powstawaniu przecieków. Niezbędna jest przede wszystkim ciągła kontrola tych zabiegów, co jest podyktowane możliwością wystąpienia komplikacji w trakcie wykonywania poszczególnych prac.

Głównym problemem przy stosowaniu iniekcji w murowanych ścianach budynków zabytkowych jest **dobór materiału wypełniającego**. Podstawowe cechy, jakimi powinien się charakteryzować materiał naprawczy do iniekcji, to właściwości odpowiadające materiałowi naprawianej konstrukcji z dokładnością ±25%, po stwardnieniu aktywna współpraca z konstrukcją, która jest obciążona co najmniej ciężarem własnym, a także przyczepność do materiału naprawianego, niezbędna do przenoszenia naprężeń rozciągających [48÷49]. Najczęściej używanymi spoiwami mineralnymi są cement portlandzki, mikrocementy lub cement biały wysokiej marki. Z kolei materiałami naprawczymi są zaczyn cementowy albo emulsja modyfikowana odpowiednim dodatkiem chemicznym. Według wielu specjalistów [37, 45, 59÷60, 62÷63, 76, 84] podstawowym składnikiem wypełniaczy przy iniekcji ścian murowych powinno być wapno, najczęściej z dodatkiem spoiwa cementowego. Zaczyny oparte na zwykłym cemencie portlandzkim lub modyfikowanym wapnem w wyniku skurczu tracą przyczepność do naprawianej konstrukcji, a na skutek korozji siarczanowej bezpośrednio na elewacjach pojawiają się wykwity. Iniekcja oparta jedynie na cemencie powoduje powstawanie obszarów o wysokiej wytrzymałości w odniesieniu do pierwotnej konstrukcji ścian murowych, co w konsekwencji może prowadzić do zarysowań i uszkodzeń wywołanych zjawiskiem karbu w konstrukcji. Stosowanie

iniekcji cementowych w budynkach zabytkowych wykonanych na zaprawach wapiennych może wywoływać reakcje chemiczne skutkujące zmianami objętości zapraw oraz wykwity na elewacjach.

3.5. Oczyszczanie, odsalanie i osuszanie nawierzchni ścian

Mechanizm zniszczenia murów ceramicznych jest procesem bardzo złożonym, spowodowanym głównie obecnością różnych soli. Przyczyną zawilgoceń ścian murowych budynków zabytkowych są m.in. źródła zewnętrzne, które mogą być wynikiem braku izolacji poziomej lub pionowej. Do wewnętrznych źródeł zawilgocenia należy zaliczyć: przecieki instalacji wodno-kanalizacyjnej, nieodpowiedni sposób użytkowania pomieszczeń zabytków czy brak wentylacji. Oprócz oczywistych, negatywnych skutków występowania nadmiernej ilości wilgoci w materiałach budowlanych trzeba pamiętać, że szkodliwe substancje przemieszczają się wraz z nią. Roztwory zawierające sole wraz z wodą dostają się w głąb ścian murowych, a w czasie procesu odparowywania wilgoci do otoczenia sól krystalizuje się w porach oraz na powierzchni przegrody. Przy określeniu rodzaju i ilości soli pomocna jest identyfikacja jej źródła. W przypadku materiałów budowlanych użytych pierwotnie, zarówno cegieł, jak i warstw uzupełniających, znaczna ilość związków tworzących sole wprowadzana jest do materiałów na etapie produkcji i wbudowania [44÷45].

Jednym ze sposobów przeciwdziałania strukturalnym, a także powierzchniowym zniszczeniom murowych ścian budynków zabytkowych wskutek krystalizacji soli jest zastosowanie warstw uzupełniających na bazie działania tynku renowacyjnego. Systemowe tynki renowacyjne umożliwiają solom wykrystalizowanie w warstwach wewnętrznych tynku i nie przedostają się one na jego powierzchnię. Wysoka przepuszczalność pary wodnej przez ww. tynki wpływa bardzo korzystnie na wysychanie ścian muru. Tynki te charakteryzują się wysoką porowatością i znacznie ograniczoną możliwością kapilarnego podciągania wody. Dzięki wymienionym właściwościom procesy krystalizacji soli zachodzą głównie we wnętrzu zaprawy uzupełniającej, nie powodując jej uszkodzenia. Objętość porów w świeżej zaprawie tynkarskiej powinna wynosić co najmniej 25%, a w stwardniałej minimum 40%. Zdolność podciągania kapilarnego obniżana jest przez zastosowanie dodatków hydrofobizujących [23, 53, 58]. Przy bardzo wysokim zasoleniu muru po pewnym czasie eksploatacji może dojść do całkowitego wypełnienia porów. W takim przypadku może wystąpić konieczność ponownego wykonania świeżego tynku renowacyjnego. Warstwy uzupełniające na bazie tych tynków powinny zachować wysoką zdolność dyfuzji przez dość długi okres.

Szkodliwe i szpecące oddziaływanie wszelkiego rodzaju nawarstwień powstających w wyniku osiadania na ścianach pyłów, dymów czy gazów oraz wskutek wandalizmu człowieka pociąga za sobą konieczność oczyszczania powierzchni budynków

zabytkowych. W zależności od odporności i ilości nawarstwień oraz stanu powierzchni przegród i rodzaju wykorzystanej zaprawy stosowane są różnorodne metody czyszczenia. W przypadku gdy zabrudzenia są nieznaczne, wystarczającym zabiegiem może się okazać spryskiwanie na zmianę zimną i gorącą wodą, względnie parą wodną. Jeśli zabrudzenia są trudniejsze do usunięcia, a stan muru i spoin jest dobry, to odpowiednim rozwiązaniem może być zmywanie z użyciem strumienia wody pod ciśnieniem, które musi być indywidualnie dobrane do konkretnego obiektu. Jeżeli taka metoda okaże się niewystarczająca, dodatkowo stosuje się ścierniwo działające wspólnie ze strumieniem wody pod ciśnieniem.

Obecnie wykorzystuje się wiele środków chemicznych wspomagających czyszczenie, które każdorazowo należy sprawdzać w celu określenia ich skuteczności i braku negatywnego wpływu na konstrukcję murową. W przeciwnym wypadku może się okazać, że zamiast pomagać, środki te przynoszą szkody w postaci wykwitów, zmian barwy, obniżenia spoistości zaprawy, a nawet uszkodzenia materiału murowego. Należy także pamiętać o dokładnym zmyciu środków chemicznych i niedopuszczeniu do przedostania się ich do wnętrza muru.

Głównym czynnikiem niszczącym porowate materiały w zabytkach są rozpuszczalne w wodzie sole. W związku z tym podstawowym i nieodzownym zabiegiem konserwatorskim w ochronie zabytków jest odsalanie cegieł i kamieni. Wszelkie tego typu zabiegi powinny być poprzedzone odpowiednimi badaniami określającymi stopień zasolenia oraz sposób rozmieszczenia soli w murze. W trakcie zaś odsalania należy prowadzić badania kontrolne. Dzięki ich wynikom możliwe jest określenie stopnia zagrożenia struktury obiektu, dobór właściwej metody i ustalenie wymaganej liczby zabiegów [10÷13].

Mechanizm działania soli zależy w dużym stopniu od przemieszczania się w murze wody, która je transportuje. Najwięcej zanieczyszczeń, w tym również soli, zawiera woda gruntowa, co sprawia, że bardzo ważnym zabiegiem znacznie ograniczającym dostawanie się soli do obiektu jest jej odizolowanie od wody gruntowej. Mimo wielu skomplikowanych i efektywnych metod odsalania całkowite usunięcie soli nie jest możliwe. Sposoby odsalania stosowane przy dużych obiektach polegają na używaniu kompresów, wykonaniu tynków renowacyjnych, wykorzystaniu pola elektrycznego. Aby uniknąć ponownego zasolenia, zabezpiecza się ścianę przed wodą podciąganą kapilarnie, wilgocią pochodzącą z atmosfery oraz dyfuzją pary wodnej. W tym celu wykonuje się wszelkiego rodzaju powłoki ochronno-dekoracyjne.

Procesy wysychania ścian zewnętrznych przebiegające w warunkach naturalnych, szczególnie w obiektach zabytkowych, w których przegrody mają znaczną grubość, mogą być długotrwałe, przy założeniu istnienia izolacji przeciwwilgociowych odgraniczających budynek od działania wody. Intensywność osuszania jest więc wspomagana przez wiele metod, m.in.:

- dostarczenie ciepła do przegrody przez nagrzewnice, promienniki podczerwieni czy źródła mikrofalowe,
- obniżenie ciśnienia pary wodnej w powietrzu na zewnątrz lub wewnątrz przegrody.

Nawet prawidłowo przeprowadzone procesy osuszania będą krótkotrwałe, jeśli nie zabezpieczy się obiektu przed ponownym nawilgacaniem. Ważne jest stworzenie warunków zabezpieczających ściany przed wilgocią pochodzącą zarówno z gruntu przylegającego z boku, jak i od spodu. W celu jednoznacznego określenia przyczyn zawilgocenia należy przeprowadzić dokładne badania hydrogeologiczne i analizy wilgotności, a następnie zastosować odpowiednie zabezpieczenia. Wśród metod zabezpieczających można wyróżnić: mechaniczne – polegające na stosowaniu przepon odcinających dopływ wody podciąganej z gruntu oraz wykorzystujące zjawisko elektroosmozy, chemiczne – polegające na użyciu preparatów iniekcyjnych, a także mieszane – łączące różne metody, m.in. magneto-kinetyczne [30, 81÷83]. Skutecznym sposobem ochrony przed wilgocią i działaniem czynników atmosferycznych może być hydrofobizacja. W obiektach zabytkowych najczęściej stosuje się ją przez impregnację, czyli wprowadzenie do powierzchniowej warstwy muru substancji hydrofobowych [60].

W przypadku obiektów zabytkowych należy się liczyć z wieloma ograniczeniami i trudnościami podczas korzystania z metod zapobiegających zawilgacaniu. Wynika to z dużej grubości przegród, ich znacznej powierzchni oraz często niejednorodności.

3.6. Metody zwalczania grzybów w budownictwie

Zakres prac przy zwalczaniu mikroorganizmów zależy od stanu porażenia obiektu. Likwidacja wczesnych stadiów zagrzybienia często nie pociąga za sobą istotnych kosztów, a powierzchniowo porażone elementy po prostych zabiegach odgrzybiających mogą pozostać w budynku i nadal pełnić swoje funkcje.

Przystępując do odgrzybiania budynków, w pierwszej kolejności należy określić rodzaj i gatunek grzyba, ponieważ każdy z nich ma inną siłę niszczenia, różne warunki rozwoju, odmienne właściwości oraz będzie inaczej reagować na środki impregnacyjne. Zależnie od tego trzeba stosować rozmaite sposoby zwalczania i używać odpowiednich preparatów. Określenie gatunku grzyba jest trudne. W tym celu należy przeprowadzić badania zarówno mikro-, jak i makroskopowe, a niejednokrotnie liczne prace laboratoryjne.

Dla grzybów domowych i pleśniowych przeprowadza się ekspertyzę mykologiczną, która składa się z kilku części. Pierwsza z nich zawiera dokładne opisanie problemu, rozpoznanie gatunków grzybów, opisanie miejsc ich występowania, zdefiniowanie przyczyn pojawienia się, a także wskazanie rozwiązań na ich pozbycie się i wyeliminowanie przyczyn pojawienia się ich w przyszłości. W zależności od stopnia zagrzybienia budynku stosuje się następujące rodzaje prac remontowo-odgrzybieniowych [87, 90÷91]:

- remont odgrzybieniowy częściowy,
- remont odgrzybieniowy kapitalny,
- zabiegi doraźne,
- rozbiórka budynku (całkowita lub częściowa).

Remonty odgrzybieniowe (częściowe bądź kapitalne) dotyczą całych obiektów albo ich części stanowiących zwartą całość, m.in. oficyny, całe piętra. Prace odgrzybieniowe należy wykonywać w ciepłym i możliwie bezdeszczowym okresie roku, celem osiągnięcia efektu zawilgocenia przesuszonych ścian murowych.

W punkcie 1.1.3 omówiono czynniki oraz jednostki chorobowe będące bezpośrednio skutkiem zespołu chorego budynku, poniżej zaś skupiono się na przedstawieniu sposobów zapobiegania i kontroli SBS. Systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji muszą być zaprojektowane tak, aby spełniały standardy wentylacji zawarte w przepisach budowlanych. System klimatyzacji powinien być właściwie obsługiwany i konserwowany, by zapewnić osiągnięcie pożądanych prędkości wentylacji. Jeśli występują silne zanieczyszczenia, powietrze może wymagać bezpośredniego odpowietrzenia na zewnątrz. Ta metoda jest szczególnie zalecana do usuwania zanieczyszczeń, które gromadzą się w określonych obszarach, tj. toaletach, pomieszczeniach do kopiowania i z urządzeniami drukującymi. Oświetlenie i kolor muszą dobrze współgrać z otoczeniem i nie pobudzać zmysłów, wytwarzane przez człowieka promieniowanie elektromagnetyczne musi być maksymalnie ograniczone, wnętrza powinny być zaprojektowane ekonomicznie i wykonane przy użyciu naturalnych nietoksycznych materiałów.

Wilgotność powietrza powinna być naturalnie regulowana. Usunięcia lub modyfikacje źródeł zanieczyszczenia można przeprowadzić podczas rutynowej konserwacji, odprowadzania zanieczyszczeń na zewnątrz. Filtry powietrza są również skuteczne w usuwaniu niektórych, jeśli nie wszystkich zanieczyszczeń. Zaleca się stosowanie naturalnego, nieskażonego i nietoksycznego materiału budowlanego, a ściany, podłogi i sufity nie powinny być podatne na grzyby pleśniowe. Piwnica winna być wodoodporna i dobrze wentylowana. Naturalne pole magnetyczne ziemi nie powinno być zmieniane ani zniekształcane. Unieszkodliwianie materiałów budowlanych nie może prowadzić do zanieczyszczenia środowiska, a same działania budowlane do eksploatacji nieodnawialnych zasobów [51, 78, 90÷91].

Dzięki zastosowaniu **materiałów na bazie biowęgla, jako dodatku do warstw uzupełniających w ścianach murowych budynków zabytkowych**, takie przegrody mogą się stać długotrwałymi pochłaniaczami dwutlenku węgla. Jednocześnie mogą pochłaniać zapachy i toksyny, zapewniając zdrowszy mikroklimat.

Zaprawy na bazie biowęgla (poza budynkami zabytkowymi) są szczególnie zalecane do magazynów, fabryk i budynków rolniczych, a także do szkół, uniwersytetów, szpitali i innych pomieszczeń użytkowanych przez wiele osób. Substancje te zapobiegają lub przynajmniej znacznie ograniczają rozwój grzybów pleśniowych i innych szkodliwych drobnoustrojów [1, 22, 26, 74]. Zastosowanie biowęgla jako dodatku do warstw uzupełniających zostało szczegółowo przedstawione w kolejnych rozdziałach.

4. Warstwy uzupełniające – materiały i metodyka badań

4.1. Materiały zastosowane w składzie zaprawy uzupełniającej

Jako spoiwa użyto cementu portlandzkiego o wysokiej wczesnej wytrzymałości klasy CEM I 42,5 R, spełniającego wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [101]. Początek wiązania tego cementu to około 160 minut, koniec wiązania ~220 minut. Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach osiąga wartości rzędu 28 MPa, po 28 dniach natomiast 52 MPa. Charakterystyczne właściwości to wysokie ciepło uwodnienia, wysokie i stabilne parametry jakościowe, przyspieszony czas twardnienia i wiązania, możliwość stosowania w obniżonych temperaturach otoczenia oraz wysoka wytrzymałość wczesna i normowa. Parametry chemiczne cementu CEM I 42,5 R: zawartość siarczanów – 2,87%, zawartość chlorków – 0,08%, straty prażenia – 1,64%, pozostałość nierozpuszczalna, zmiana objętości – 0,9 mm. Właściwości cementu użytego do badań przedstawiono w tabeli 4.1.

Kruszywem dodanym do zaprawy był piasek naturalny płukany o uziarnieniu do 2 mm, który spełniał wymagania piasku normowego [100]. W badaniach zastosowano domieszkę uplastyczniającą do zapraw i murów Zimo-Mur, zwiększającą plastyczność i jednorodność gotowej zaprawy. Domieszka pozwala na wydłużenie urabialności zaprawy oraz na prowadzenie prac murarskich w obniżonych temperaturach, opóźnienie zwiększa się wraz ze wzrostem dawki produktu i zmniejsza się w wysokiej temperaturze. Do zarobienia mieszanek kompozytów cementowych użyto wody wodociągowej dopuszczonej do stosowania jako woda zarobowa według normy PN-EN 1008:2004 [93]. Materiałem dodanym do zaprawy był **biowęgiel**.

Produkcja biowęgla odbywa się w procesie pirolizy biomasy, która jest podgrzewana do temperatury w granicach 300–800°C w środowisku pozbawionym tlenu. Biomasa jest gotowana (prażona) w celu rozpadu zbędnych produktów, tj. ligniny czy celulozy, aby stworzyć strumień paliwa bogatego w wodór, który może być spalony bądź skondensowany do tworzenia energii. Produktem bogatym w węgiel jest biowęgiel, który został związany z węglowodorów. Początkowa faza procesu pirolizy jest zwykle endotermiczna, co oznacza, że wymaga więcej energii, niż produkuje. W ostatecznym jednak rozrachunku piroliza jest egzotermiczna, czyli oddaje więcej ciepła niż jest wymagane do uruchomienia (około 10% wyprodukowanej energii

końcowej). Oprócz fazy gazowej otrzymuje się także fazę ciekłą w postaci oleju i smółki, a pozostałością jest koksik (do 30% wyprodukowanej energii). Z tej energii około 5% jest pobierane przez system do utrzymania autotermiczności. Podczas produkcji biowęgla nie występuje faza ciekła (smółki i oleje). To czyni proces pirolizy skutecznym, biorąc pod uwagę wychwytywanie węgla w tym samym czasie. Pod wpływem oddziaływania ciepła (rozkład termiczny) biomasa zamieniana jest w biowęgiel, kiedy to stały energetyczny strumień gazów tlenku węgla, metanu i wodoru jest wypierany z biomasy. W efekcie powstaje biowęgiel, siatka egzoszkieletu węgla ze zwęglonego materiału, zawierający około 50% pierwotnego węgla, lecz tylko 30% pozostałej energii. Proces produkcji jest kontrolowany, pozwala dowolnie kształtować jakość biowęgla (od 65% do 93% zawartości pierwiastka węgla).

TABELA 4.1. Właściwości cementu CEM I 42,5 R

Cecha		Jednostka	Wynik średni	Wymagania
Początek wiązania		min	180	≥120
Koniec wiązania			238	–
Wodożądność		%	27,1	≤28
Stałość objętości		mm	1	≤10
Powierzchnia właściwa		cm^2/g	3849	–
Wytrzymałość na ściskanie	po 2 dniach	MPa	28,5	≥ 20 ≤ 29
	po 28 dniach		58,2	≥ 42,5 ≤ 62,5
Wytrzymałość na zginanie	po 2 dniach		4,9	–
	po 28 dniach		8,3	–
Analiza chemiczna	SO_3	%	2,9	≤4,0
	Cl		0,091	≤0,10
	Na_2O		0,64	≤0,8
Części nieprzepuszczalne			0,6	≤5,0
Straty prażenia			3,58	≤5,0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [105].

Opisana wyżej technologia została opracowana na podstawie patentu nr 227338 należącego do firmy FLUID SA z Sędziszowa. Polega ona na niskotemperaturowej (od 280°C do 500°C) pirolizie, w której efekcie otrzymuje się biowęgiel (około 55% wyprodukowanej energii) oraz gazy niskotemperaturowych węglowodorów (około 45% wyprodukowanej energii) [107].

Celem nadrzędnym dodania biowęgla do składu zaprawy **jest zbadanie jego wpływu na właściwości cieplne i zagrożenia mykologiczne** przegród w budynkach zabytkowych. Biowęgiel jest wysoce porowatym materiałem produkowanym z odpadów roślinnych, głównie wykorzystywanym w rolnictwie (środek poprawiający glebę), hodowli zwierząt (dodatek paszowy) oraz obróbce metali (środek

redukujący). Najnowsze osiągnięcia Instytutu Ithaka [112] koncentrują się obecnie na wykorzystaniu tej substancji jako materiału budowlanego, ponieważ ma ona nie tylko dobre właściwości izolacyjności cieplnej, lecz także jest w stanie wchłaniać wilgoć i chronić przed promieniowaniem, jak również poprawia jakość powietrza. Każda tona biowęgla użytego w budynku oznacza, że odpowiednik około jednej tony dwutlenku węgla nie może ponownie „wejść" do atmosfery. Dzięki tym cechom biowęgiel wydaje się idealnie nadawać do izolacji cieplnej i regulacji wilgotności powietrza w budynku [107]. W tabeli 4.2 przedstawiono najistotniejsze właściwości biowęgla.

TABELA 4.2. Identyfikacja materiału zastosowanego w badaniach laboratoryjnych

Nazwa właściwości	Opis
Nazwa handlowa	Biowęgiel
Klasyfikacja produktu	Zgodnie z rozp. WE Nr 1272/2008 [CLP/GHS] substancja nie jest zaklasyfikowana jako stwarzająca zagrożenia fizyczne dla zdrowia lub środowiska
Wygląd	• stan skupienia (20°C): ciało stałe • barwa: czarny
Zapach	Brak
Gęstość względna	Gęstość nasypowa: w zakresie 160–370 kg/m^3
Rozpuszczalność w wodzie	Praktycznie nierozpuszczalny
Temperatura samozapłonu	Nie wykazuje zdolności do samonagrzewania w teście UN N.4
Reaktywność	Substancja nie jest reaktywna w normalnych warunkach użytkowania i magazynowania
Stabilność chemiczna	W zalecanych warunkach stosowania i przechowywania substancja jest stabilna
Możliwość występowania niebezpiecznych reakcji	W normalnych warunkach przechowywania i stosowania nie występują niebezpieczne reakcje. Pyły mogą tworzyć z powietrzem mieszaniny wybuchowe
Warunki, których należy unikać	Unikać źródeł ognia
Materiały niezgodne	Silne utleniacze
Niebezpieczne produkty rozkładu	W normalnych warunkach magazynowania i użytkowania nie następuje niebezpieczny rozkład produktu. W środowisku pożaru może tworzyć się niebezpieczny tlenek węgla (CO)
Toksyczność	Produkt nie został zaklasyfikowany jako niebezpieczny dla środowiska
Trwałość i zdolność do rozkładu	Produkt łatwo ulega biodegradacji

Nazwa właściwości	Opis
Zwartość pierwiastka węgla	Powyżej 70%
Zawartość chloru, siarki, rtęci	Śladowe ilości, poniżej 0,01%
Zawartość części lotnych	17%
Zawartość popiołu	Poniżej 6%

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [104].

Do badań użyto materiału różniącego się od siebie recepturą, którego zawartość węgla w biomasie wynosiła 70, 80 i 90%. Wstępne badania nad strukturą tynku wewnętrznego wykazały, że charakteryzuje się on dobrą izolacyjnością cieplną oraz pozytywnym oddziaływaniem na mikroklimat pomieszczeń, w których go zastosowano.

4.2. Badania cech materiałowych warstw uzupełniających

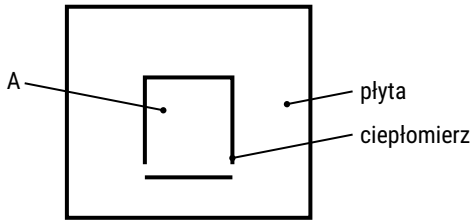
4.2.1. Właściwości cieplne

Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m · K)] jest podstawowym parametrem, który charakteryzuje właściwości cieplne materiałów (w tym budowlanych) i zależy głównie od struktury gęstości i wilgotności, a w materiałach anizotropowych od kierunku przepływu strumienia cieplnego (drewno), w ekstremalnych natomiast warunkach termicznych również od temperatury. Metody pomiarów przewodności cieplnej można podzielić na dwie grupy:

- stacjonarne, ustalonego strumienia cieplnego (tylko do badań wyrobów suchych),
- niestacjonarne, nieustalonego strumienia cieplnego (także do wyrobów zawilgoconych).

Badania współczynnika przewodzenia ciepła λ projektowanych warstw uzupełniających wykonano za pomocą aparatu płytowego HFM. Badaną próbkę umieszcza się w komorze pomiędzy dwiema ogrzewanymi płytami o różnych temperaturach. Gdy osiągną one równowagę termiczną, różnica temperatur pomiędzy płytami oraz strumień przepływającego ciepła są wielkościami stałymi. Bezpośrednio do próbki przylegają dwa przetworniki ciepła pozwalające mierzyć przepływający przez nią strumień ciepła. Powierzchnia tych ciepłomierzy jest mniejsza od powierzchni próbki, wskutek czego wytwarza się wokół nich strefa ochronna zapobiegająca niekontrolowanemu przepływowi ciepła poza powierzchnię pomiarową.

Dokładne badanie przewodności cieplnej materiału przeprowadzono przy użyciu aparatu płytowego z czujnikami gęstości strumienia cieplnego, spełniającego wymagania stawiane tego typu urządzeniom w normach PN-EN oraz ISO [98, 99, 102]. Przebadano próbki o wymiarach 35 × 35 cm i grubości 15 cm, zgodnie z normą PN-EN 1934:1999 [98]. Wymagana dokładność zastosowanej metody wynosi 2%, w odniesieniu do pojedynczego pomiaru, w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej – stanowisko badawcze zapewniło spełnienie ww. warunku. Schemat powierzchni płyty i ciepłomierza przedstawiono na rysunku 4.1.



RYS. 4.1. Schemat powierzchni płyty i powierzchni ciepłomierza

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [32].

Ilość ciepła przepływającego przez próbkę jest zależna od jej współczynnika przewodzenia ciepła, grubości próbki, różnicy temperatur po obu stronach próbki oraz powierzchni przepływu ciepła. Dla sytuacji ustabilizowanego przepływu ciepła w komorze pomiarowej powyższą zależność można zapisać równaniem Fouriera:

$$q = \lambda A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{4.1}$$

w którym:
q – gęstość strumienia ciepła przepływającego przez próbkę [W/m^2]
λ – współczynnik przewodzenia ciepła próbki [W/(m · K)]
ΔT – różnica temperatur pomiędzy powierzchniami próbki [K]
Δx – grubość próbki [m]
A – powierzchnia pomiarowa ciepłomierza [m^2]

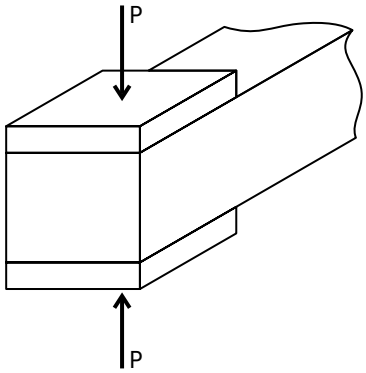
W aparacie płytowym pomiar odbywa się czujnikami o określonej powierzchni jednakowej dla wszystkich prób. Wartość napięcia Q uzyskiwanego z ciepłomierza (przetwornika) jest proporcjonalna do strumienia ciepła przepływającego przez próbę [32]. Zakłada się więc, iż pomiędzy płaską próbą a dwiema równoległymi izotermicznie płytkami (o różnych temperaturach) osiągnięta zostaje równowaga cieplna. Przyjęty rozmiar płyt jest znacząco większy od grubości próby. W przypadku całej objętości próby występuje jednowymiarowe i jednorodne pole temperatury. Gradient temperatury odpowiada wówczas ilorazowi różnicy temperatury między zimną a ciepłą płytą ΔT a grubością próby Δx.

W badaniach dąży się do uzyskania średniej wartości temperatury i średniego strumienia ciepła, które przypisuje się do środka badanej próby. Zakłada się także, iż wartości średnie są stałe na całej powierzchni analizowanego materiału (charakteryzują one badaną próbę). Obliczana wartość współczynnika przewodzenia ciepła, a także opór cieplny próby odpowiadają średniej wartości gęstości strumienia ciepła. W badaniach wykorzystywane są współczynniki kalibracyjne ciepłomierzy egzekwowane na certyfikowanych próbach wzorcowych o znaczących współczynnikach przewodzenia ciepła w danej temperaturze [69]. Ze względu na fakt, że każda płyta ma własną temperaturę, a właściwości fizyczne czujników podczas badania zmieniają się wraz z nią, współczynniki kalibracji wyznaczane są dla płyt w danej temperaturze. W praktyce wartość współczynnika przewodzenia ciepła podawana jest jako średnia z dwóch wielkości obliczonych osobno na podstawie obu powierzchni próby. Wyniki oraz opis przeprowadzonych badań (w tym przygotowanie próbek) zamieszczono w punkcie 5.5.1.

4.2.2. Właściwości mechaniczne

Określenie wytrzymałości na ściskanie (*PN-EN 1015-11:2001*) [94]

Wytrzymałość na ściskanie stanowi maksymalne naprężenie, które przyjmuje próbka badanego materiału podczas ściskania. Powyższą cechę określono, obciążając próbkę aż do zniszczenia w maszynie wytrzymałościowej do ściskania, zgodnej z normą PN-EN 196-1:2006 [129]. W trakcie badania rejestrowano największe przeniesione przez próbkę obciążenie, następnie obliczono wytrzymałość na ściskanie. Badanie przeprowadzono na połówkach beleczek. Siłę niszczącą przekazano przy użyciu podkładek metalowych. Próbki umieszczono w prasie hydraulicznej prostopadle do kierunku formowania. Schemat pomiaru wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 4.2.



RYS. 4.2. Schemat pomiaru wytrzymałości na ściskanie

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [129].

Wytrzymałość na ściskanie obliczono według wzoru:

$$R_c = \frac{P}{A'} \tag{4.2}$$

gdzie:
R_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa]
P – siła niszcząca [kN]
A' – powierzchnia ściskana [cm^2]

Badania właściwości mechanicznych materiału przeprowadzono w laboratoriach wytrzymałości materiałów budowlanych Politechniki Warszawskiej oraz Politechniki Białostockiej. Wyniki tych badań zamieszczono w punkcie 5.5.2.

4.2.3. Właściwości fizyczne

Oznaczanie konsystencji świeżej zaprawy przy użyciu penetrometru (*PN-EN 1015-9:2001*) [96]
Oznaczanie konsystencji świeżej zaprawy do murów za pomocą penetrometru jest określane jako wartość penetracji wgłębnika podczas jego swobodnego opuszczania na daną głębokość w próbkę świeżej zaprawy. Głębokość zanurzenia wgłębnika w zaprawie jest miarą wielkości konsystencji. W przeprowadzonym badaniu napełniono naczynie zaprawą w dwóch warstwach i każdą zagęszczono 10 uderzeniami ubijaka.

Oznaczanie gęstości objętościowej świeżej zaprawy (*PN-EN 1015-6:2000*) [95]
Badanie gęstości objętościowej świeżej zaprawy polega na pomiarze jej objętości i masy, ułożonej w cylindrze o średnicy 11,3 cm i wysokości 10 cm. Zaprawę należy nakładać do cylindra w dwóch warstwach i każdą z nich ubić okrągłym ubijakiem 10 uderzeniami, a nadmiar zgarnąć nożem i wygładzić powierzchnię do górnej krawędzi naczynia. Gęstość objętościową świeżej zaprawy ustala się na podstawie trzech pomiarów.

Oznaczanie nasiąkliwości zaprawy (*PN-85/B-04500*) [92]
Zasada oznaczania nasiąkliwości polega na określeniu masy wody, jaką może wchłonąć zanurzona w niej próbka pod działaniem normalnego ciśnienia atmosferycznego. Cechę tę zdefiniowano przy użyciu trzech beleczek o wymiarach 4 × 4 × 16 cm. Próbki wstępnie zostały wysuszone do stałej masy i zważone, po czym umieszczone w zlewce i zalane do ¼ wysokości wodą o temperaturze pokojowej. Po 2 godzinach poziom wody zwiększono tak, aby próbki były zanurzone do ½ wysokości, po kolejnych 3 godzinach zaś poziom ten podniesiono do ¾ wysokości próbek. Utrzymywano go przez następne 24 godziny, po czym całkowicie zalano próbki wodą (sięgała około 2 cm ponad ich górne powierzchnie). W takim stanie pozostawiono je na kolejne 24 godziny. Po upływie doby wyjęto je i zważono z dokładnością do 0,1 g, a następnie zanurzono ponownie w wodzie. Analogiczne ważenie przeprowadzano co 24 godziny

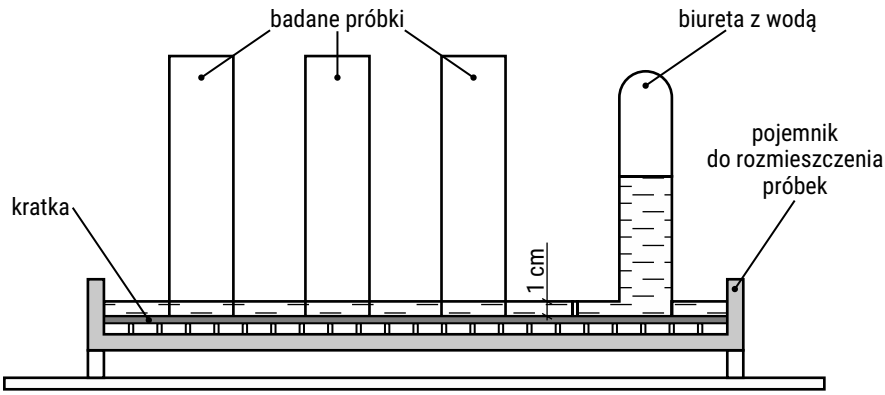
aż do chwili, gdy wyniki dwóch kolejnych pomiarów masy nie różniły się więcej niż 0,2 g. Nasiąkliwość wagową (zawartość wody w materiale) określono według wzoru:

$$m_{\mathrm{w}} = \frac{m_{\mathrm{w}} - m}{m} \cdot 100\left[\%\right] \tag{4.3}$$

gdzie:
m_{w} – masa próbki nasyconej wodą [g]
m – masa próbki wysuszonej do stałej masy [g]

Oznaczanie gęstości objętościowej stwardniałej zaprawy (*PN-EN 1015-11:2001*) [95]
Na wyznaczenie gęstości objętościowej stwardniałej masy zaprawy składają się: wysuszenie beleczek o wymiarach 4 × 4 × 16 cm w temperaturze ±70°C do stałej masy, zważenie ich w odstępach dwugodzinnych, określenie poziomu zawilgocenia suchych próbek ustawionych w naczyniu z wodą oraz ustalenie przyrostu ich masy. Na dnie płaskiego naczynia ustawiono trzy próbki w pozycji pionowej (podstawą próbki o wymiarach 4 × 4 cm). Gęstość danej próbki wysuszonej stwardniałej zaprawy jest określana jako iloraz jej masy w stanie wysuszonym w suszarce i objętości, którą próbka zajmuje w stanie nasyconym podczas zanurzenia w wodzie.

Oznaczanie kapilarnego podciągania wody (*PN-85/B-04500*) [92]
Oznaczanie kapilarnego podciągania wody polega na zmierzeniu szybkości podciągania wody przez dany materiał w określonych warunkach. Po trzy próbki o wymiarach 10 × 10 × 10 cm dla każdej serii wysuszono w temperaturze 80 ±5°Celsjusza do stałej masy i zważono z dokładnością do 1 g. Próbki umieszczono w naczyniu wypełnionym wodą o temperaturze 22 ±2°C. W trakcie badania zanurzenie dolnej części próbek utrzymywano na stałym poziomie, do wysokości 1 cm.



RYS. 4.3. Schemat urządzenia do badania prędkości podciągania kapilarnego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [92].

Pomiary kapilarnego podciągania wody wykonywano po 1, 3, 6 i 24 godzinach od momentu umieszczenia w niej próbek. Po upływie danego czasu próbki wyjmowano z wody, osuszano powierzchniowo i mierzono wysokość zawilgocenia na ich czterech ścianach z dokładnością do 1 mm, później zaś ponownie ustawiano w wodzie. Schemat działania urządzenia do badania prędkości podciągania kapilarnego przedstawiono na rysunku 4.3.

Badanie przeprowadzono jednocześnie na trzech próbkach, a za wysokość podciągania przyjmowano wartość średnią z tych próbek dla każdego pomiaru. Za adekwatną do podjęcia decyzji o jakości zaprawy cementowej przyjęto wysokość podciągania wody w czasie do 60 minut. Ponadto próbki ważono z dokładnością do 1 g w ustalonych odstępach czasu w celu określenia procentowego przyrostu masy według wzoru:

$$m' = \frac{m_c - m_s}{m_s \cdot 100}[\%] \tag{4.4}$$

gdzie:

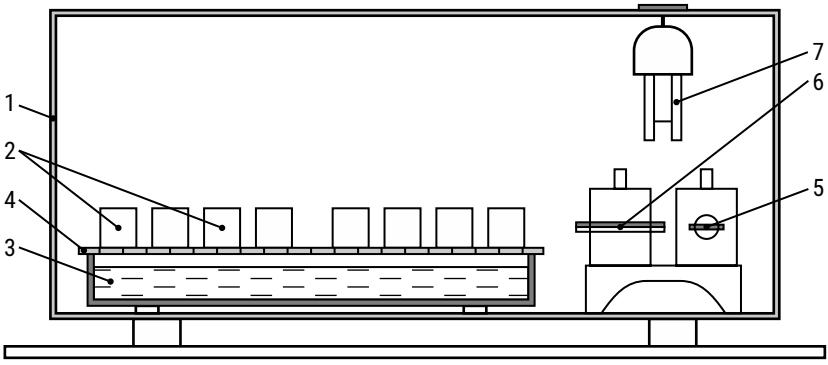
m' – przyrost masy próbek [%]

m_c – masa próbki zawilgoconej przez kapilarne podciąganie wody [kg]

m_s – masa próbki w stanie wysuszonym [kg]

Określanie prędkości wysychania (*PN-85/B-04500*) [92]

Podczas określania prędkości wysychania w pierwszej kolejności zważono próbki, a następnie zanurzono je na 48 godzin w wodzie o temperaturze 20°C. Po wyjęciu z wody i oczyszczeniu powierzchni z jej resztek próbki ponownie zważono. Potem umieszczono je w komorze ze stałą temperaturą 22°C oraz wilgotnością względną 60%. Codziennie ważono je i obliczano spadek ich wilgotności w procentach. Suszenie przeprowadzano do chwili uzyskania pierwotnej masy próbek. W celu utrzymania w komorze stałej wilgotności względnej zastosowano roztwór $CaCl_2$. Na rysunku 4.4 przedstawiono schemat urządzenia do pomiarów prędkości wysychania.



RYS. 4.4. Schemat urządzenia do badania prędkości wysychania próbek: 1 – szczelna komora; 2 – próbki; 3 – pojemnik z $CaCl_2$; 4 – kratka; 5 – termograf; 6 – higrograf; 7 – psychrometr

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [92].

Ocena zgodności faktury powierzchni

Na podstawie sześciostopniowej skali opracowanej przez autorów dokonano oceny zgodności faktury powierzchni z materiałem restaurowanym (tabela 4.3).

TABELA 4.3. Skala oceny zgodności faktury powierzchni

Wartość	Znaczenie
5	Faktura powierzchni próbki jest identyczna z cegłą wzorcową
4	Nieznaczna różnica między fakturą powierzchni próbki a cegłą wzorcową, odmienność poszczególnych ziaren kruszywa
3	Nieistotna różnica faktury powierzchni próbki od cegły wzorcowej, występowanie niecharakterystycznych dla cegły wzorcowej porów o średnicy do 0,5 mm
2	Istotna różnica w fakturze próbki, duża ilość porów o średnicy powyżej 0,5 mm
1	Istotna różnica w fakturze powierzchni między próbkami a cegłą wzorcową, występowanie w próbkach niecharakterystycznych dla cegły ceramicznej defektów powierzchni (istnieje jednak możliwość zastosowania jako materiału uzupełniającego)
0	Próbki mają odmienną fakturę (ich skład wyklucza zastosowanie jako materiału uzupełniającego)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Badanie technologiczności zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych

Ostatni etap dotyczył oceny technologiczności zaprawy uzupełniającej pod kątem wykonywania robót restauracyjnych. Została ona przeprowadzona przez profesjonalistę z danego zakresu, zajmującego się uzupełnianiem ubytków straconych elementów spoin i cegieł. Podobnie jak przy ocenie zgodności faktury powierzchni, technologiczność oceniano na podstawie odpowiedniej sześciostopniowej skali opracowanej przez autorów (tabela 4.4).

TABELA 4.4. Skala oceny technologiczności zaprawy

Wartość	Znaczenie
5	Zaprawę lekko nanosi się kielnią na dowolną powierzchnię; nie spływa i nie odwarstwia się; przy zakrywaniu porów i szczelin równomiernie je zapełnia; ma dobrą początkową przyczepność do powierzchni restaurowanej
4	Po naniesieniu na powierzchnię pionową zaprawa nie spływa i nie odwarstwia się przy grubości warstwy nie większej niż 1 cm
3	Przy naniesieniu na powierzchnię pionową spływa 20% zaprawy; mieszanka wymaga zagęszczenia na całej powierzchni uzupełnianej (grubość warstwy nie przekracza 0,5 cm)
2	Przy naniesieniu na powierzchnię pionową spływa 50% zaprawy; po skończeniu robót zaprawa odwarstwia się od restaurowanego muru; wymaga skrupulatnego zagęszczenia na całej powierzchni restaurowanej; istotnie zwiększa to liczbę nanoszonych warstw

Wartość	Znaczenie
1	Zaprawa bardzo sucha lub bardzo rzadka; na powierzchnię pionową nanosi się ją bardzo ciężko; przeważnie większa część spływa w trakcie nanoszenia
0	Zaprawa nieprzydatna do naniesienia na powierzchnię pionową; cała warstwa spływa w trakcie nanoszenia

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w punkcie 5.5.3.

4.3. Badania termowizyjne

Termowizja jest pasywnym, bezkontaktowym pomiarem temperatury na powierzchni badanego obiektu. Badanie to polega na rejestrowaniu promieniowania podczerwonego za pomocą kamery termowizyjnej, która następnie przetwarza go na kolorową mapę temperatur i w ten sposób powstaje obraz nazywany termogramem. Dzięki niemu widać, jak rozkłada się temperatura na powierzchni badanego obiektu. W związku z tym, że moc promieniowania zależy od temperatury ciała, miejsca, które są cieplejsze, mogą się wydawać jaśniejsze na obrazie cieplnym [78], stąd też za pomocą termografii można opisać rozkład temperatury na powierzchni badanej przegrody. Metoda ta znalazła zastosowanie we wstępnym identyfikowaniu zmian właściwości cieplnych części, które tworzą strukturę obiektu. Aby pomiary były wiarygodne, należy dokładnie przeanalizować badany obiekt, czyli wykonać odpowiednią liczbę zdjęć wraz z ich interpretacją. Dzięki analizie obrazów cieplnych można zlokalizować miejsca, w których występują straty ciepła. Żeby uniknąć błędów, badanie termowizyjne powinno być przeprowadzone przy stałej różnicy temperatur i ciśnień po obu stronach przegrody [73]. Temperatury powinny więc być pod stałą kontrolą jeszcze przed wykonaniem pomiarów. Nie zaleca się wykonywania badania dla budynków, które narażone są na ciągłe nasłonecznienie czy działanie silnie zmiennego wiatru [39].

Zgodnie z zapisami normy [103] oraz dostępnymi materiałami [6, 67] przy pomiarach termowizyjnych wyróżniamy następujące czynniki:

- temperaturę; w urządzeniu należy ustawić temperaturę odbitą, która zazwyczaj będzie temperaturą otoczenia,
- wilgotność; trzeba unikać badań podczas intensywnych opadów oraz wysokiej wilgotności,
- odległość; należy dążyć do pomiarów z jak najbliższej odległości, a także starać się mierzyć w płaszczyźnie równoległej do obiektu,
- pole magnetyczne; nie powinno się wykonywać pomiarów w mocnym polu magnetycznym.

Czynniki te odnoszą się zarówno do pomiarów wewnętrznych, jak i zewnętrznych, jednak w przypadku tych pierwszych warunki są zdecydowanie stabilniejsze. Z badań metodami termograficznymi wykluczają niedostępność optyczna, jak również brak uprawnień do wstępu do danego obiektu. Badania wyjaśniają prawidłowość rozkładu temperaturowego, pokazują, czy występują jakiekolwiek anomalie termiczne. Dzięki temu pomiarowi można określić typ i zakres defektów, a także wyjaśnić przyczyny powstałych nieprawidłowości i znaleźć na nie środki zaradcze. Nieprawidłowość można stwierdzić poprzez porównanie wyników ze wstępnymi założeniami, np. termogramami odniesienia wykonanymi w laboratorium oraz w obiektach rzeczywistych. Termogramy te powinny być dobrane odpowiednio do budynku i warunków przeprowadzania pomiarów. Niestety metoda ta jest dość droga i pracochłonna, dlatego w większości przypadków odstępuje się od stosowania termogramów odniesienia, a bazuje się na wynikach numerycznych dla dwu- i trójwymiarowego przepływu ciepła przez przegrody budowlane i ich połączenia [19, 39, 131].

Podczas analizy termogramów należy brać pod uwagę fakt, że ze względu na dwu- lub trójwymiarowy przepływ ciepła np. temperatura, która zostanie odczytana w narożu ściany zewnętrznej, będzie niższa od tej temperatury znajdującej się w dalszej odległości od skrajnych elementów budynku. Każdy poprawnie wykonany termogram przedstawia dwie główne informacje. Pierwsza to wartość temperatury w danym punkcie, która jest zależna od izolacyjności termicznej danej przegrody, różnic temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku, średniej temperatury promieniowania otoczenia budynku, prędkości i kierunku wiatru, a także warunków temperaturowych, jakie panowały dwa–trzy dni przed pomiarem i w jego trakcie. Drugą natomiast jest zasięg obszarów izotermicznych. Do odczytania i przedstawienia wyników wykorzystano oprogramowanie Flir Tools (wyniki z pomiarów zamieszczono w podrozdziale 6.1).

4.4. Pomiary temperatury i wilgotności

Kontrola zawartości wilgoci w materiałach przegród budynków zabytkowych została przeprowadzona za pomocą elektrycznego miernika do pomiaru wilgotności. Dodatkowo wykonano pomiary temperatury powietrza w pobliżu miejsc pomiarów ścian przy użyciu pirometru optycznego z celownikiem laserowym typu GM90, o zakresie pomiaru od –50 do +950°C. Do odczytu kontrolnego wartości temperatury i wilgotności wykorzystano rejestratory temperatury i wilgotności Efento, stosowane w pomiarach stacjonarnych. Rejestrator Efento mierzy warunki klimatyczne w pomieszczeniu i zapisuje je w swojej pamięci, tak więc użytkownik może je odczytać w dowolnym momencie. Pomiary temperatury wykonywane były z dokładnością do 0,4 w zakresie od –10 do +70°C. Z kolei zakres pomiaru wilgotności wynosił 0–99%, a jego dokładność 4% (w zakresie 0–80%) oraz 7% (w zakresie 81–99%) [wyniki z pomiarów poddano interpretacji w rozdziale 6].

4.5. Badania mikrobiologiczne

W badaniach wykorzystano cztery rodzaje gotowych stałych podłoży mikrobiologicznych, których skład i zastosowanie przedstawiono w tabeli 4.5. Oznaczano ogólną liczbę drobnoustrojów na podłożu PCA (*Plate Count Agar*), ogólną liczbę kolonii grzybów pleśniowych na podłożach MEA (*Malt Extract Agar*), PDA (*Potato-Dextrose Agar*), a także CYA (*Czapek Yeast Autolysate Agar*). Do badań użyto gotowych podłoży firmy Graso, posiadających certyfikaty jakości.

TABELA 4.5. Typy podłoży mikrobiologicznych, ich skład i zastosowanie w badaniach

Rodzaj podłoża	Skład, pH	Zastosowanie w badaniach
MEA (*Malt Extract Agar*) – brzeczka słodowa z chloramfenikolem	• Ekstrakt maltozowy (30,0 g) • Pepton mykologiczny (5,0 g) • Agar (15,0 g) • Chloramfenikol (0,05 g) • Streptomycyna (0,13 g) • pH: 5,6 ±0,2	• izolacja grzybów pleśniowych z powietrza oraz przegród budowlanych • przechowywanie szczepów • identyfikacja grzybów pleśniowych wyizolowanych z powietrza oraz przegród budowlanych • hodowla na podłożu laboratoryjnym (kontrola)
Czapek CYA (*Czapek Yeast Autolysate Agar*) – agar drożdżowy Czapka	• Sacharoza (30,0 g) • Azotan sodu (0,5 g) • Siarczan magnezu (3,0 g) • Chlorek potasu (0,5 g) • Siarczan żelaza II (0,01 g) • Agar (13,0 g) • Wodorofosforan dipotasu (1,0 g) • pH: 6,0 ±0,2	• hodowla, izolacja drobnoustrojów • identyfikacja grzybów pleśniowych wyizolowanych z przegród budowlanych • hodowla na podłożu laboratoryjnym (kontrola)
PDA (*Potato-Dextrose Agar*) – agar glukozowo-ziemniaczany	• Ekstrakt ziemniaczany (4,0 g) • Dekstroza (20,0 g) • Agar (15,0 g) • pH: 5,6 ±0,2	
PCA (*Plate Count Agar*) – agar z ekstraktem drożdżowym, glukozą i peptonem	• Enzymatyczny hydrolizat tkanek zwierzęcych (5,0 g) • Ekstrakt drożdżowy (2,5 g) • Glukoza (1,0 g) • Agar (15,0 g) • pH: 7,0 ±0,2	• hodowla, izolacja i określanie ogólnej liczby drobnoustrojów • hodowla na podłożu laboratoryjnym (kontrola)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [69÷71].

Zagadnienia dotyczące hodowli laboratoryjnej grzybów pleśniowych oraz identyfikacji wyizolowanych szczepów grzybów pleśniowych z prób powietrza i przegród budowlanych badanych budynków zabytkowych **będą przedmiotem odrębnego opracowania**.

5. Projektowanie warstw uzupełniających stosowanych w ścianach budynków zabytkowych

5.1. Wymagania stawiane warstwom uzupełniającym

Zaprojektowanie składu warstwy uzupełniającej mającej wszystkie właściwości składu warstwy restaurowanej jest praktycznie niemożliwe. Dlatego też główną zasadą przy wyborze składów mieszanek jest maksymalna zgodność podstawowych właściwości technicznych materiałów uzupełniającego i restaurowanego.

Skład warstwy uzupełniającej powinien być dobrany w taki sposób, aby nie zakłócała ona stanu cieplno-wilgotnościowego remontowanej przegrody. Przy tym należy uwzględnić fakt, że duży wpływ na procesy fizykochemiczne zachodzące w modernizowanych elementach budynków zabytkowych ma naniesienie materiału uzupełniającego na nieoczyszczoną, zasoloną powierzchnię muru ceglanego. W wyniku tego w strefie kontaktowej odbywa się migracja wilgoci i wodoru z rozpuszczalnych soli. Mieczysław Król [48] stwierdził, że trwałość współpracy łączących się materiałów w murowanych ścianach zabytków w znacznym stopniu zależy od ich zdolności do kapilarnego przemieszczania wilgoci. W literaturze podkreśla się również duże znaczenie prędkości ruchu wilgoci w kapilarach materiałów kapilarno-porowatych, którymi są cegły ceramiczne, dla procesów pochłaniania, przemieszczania i odparowania wilgoci [10÷13, 81÷82].

Zdolność ciał kapilarno-porowatych do przemieszczania kapilarnego wilgoci ocenia się eksperymentalnie za pomocą średniej dobowej prędkości kapilarnego podciągania próbek standardowych, co w swej pracy [32] dla różnych materiałów budowlanych przedstawili Irena Ickiewicz, Wiesław Sarosiek i Jerzy Ickiewicz. Autorzy ustalili, że przy współpracy dwóch materiałów w przegrodzie ten z wyższą prędkością podciągania kapilarnego będzie wchłaniał wodę z drugiego materiału, mającego niższą prędkość podciągania. Ten proces przebiega w ich strefie kontaktowej w obecności płynnej wilgoci, np. kondensacyjnej, która powstaje na styku materiałów. Dla zapewnienia trwałości współpracy różnorodnych materiałów w przegrodzie należy stworzyć warunki do swobodnej migracji płynnej wilgoci z ciała przegrody do powierzchni zewnętrznej.

Ponadto warstwy uzupełniające powinny spełniać funkcję wyrobu podciągającego wodę z dotychczasowej warstwy. Jest to istotne w przypadku migracji soli. Aby ochronić część konstrukcyjną przegrody od procesu niszczenia, wskazane

jest nałożenie odpowiedniej warstwy uzupełniającej, w której powinna się odbywać krystalizacja soli, nie zaś w murze. Stąd też warstwy uzupełniające muszą mieć większe zdolności podciągania i przemieszczania wilgoci niż podstawowy materiał konstrukcyjny [10÷13].

Zdolności te zależą od:

- struktury materiału,
- rodzaju i średnicy porów,
- ich rozmieszczenia, hydrofobowości czy hydrofilności,
- wilgotności początkowej materiału.

Prędkość podciągania kapilarnego jest funkcją struktury kapilarno-porowatej materiału i może służyć do pośredniej charakterystyki trwałości jego oddziaływania. Dla zapewnienia długotrwałej współpracy materiałów restaurowanego i uzupełniającego, prócz większej prędkości przemieszczania kapilarnego wilgoci, **warstwa uzupełniająca powinna mieć większą lub jednakową prędkość wysychania w porównaniu z materiałem restaurowanym**. Po spełnieniu tych dwóch wymagań zapewnione będą optymalne warunki odsysania wody z materiału konstrukcyjnego do warstwy uzupełniającej, a w konsekwencji usunięcie tej wody. Warunkiem granicznym jest jednoczesne wysychanie połączonych materiałów. W dwuwarstwowej restaurowanej przegrodzie, gdy cienko-porowaty materiał znajduje się pod warstwą grubo-porowatego, jako pierwszy będzie wysychał ten z większymi porami, a płaszczyzna odparowania będzie się przemieszczać do warstwy z drobniejszymi kapilarami. W takiej sytuacji możliwa jest krystalizacja rozpuszczalnych soli na granicy płaszczyzny odparowania, tj. na styku materiałów restaurowanego i uzupełniającego. Aby uniknąć tego zjawiska, **potencjał kapilarny materiału uzupełniającego powinien być wyższy niż restaurowanego**, tj. materiał uzupełniający winien charakteryzować się znacznie mniejszymi wymiarami porów kapilarnych.

Prędkości podciągania kapilarnego i wysychania są najważniejszymi cechami charakteryzującymi materiały uzupełniające, od których zależy okres trwałości restaurowanych przegród. Na trwałość konstrukcji w mniejszym stopniu wpływają także:

- odporność chemiczna materiałów uzupełniających, ich wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie,
- porowatość całkowita i jej charakter (otwarte lub zamknięte pory).

Z tych czynników do badań zostały wybrane tylko dwa – wytrzymałość na ściskanie oraz porowatość całkowita materiału uzupełniającego. Związane jest to z tym, że wytrzymałość na rozciąganie i zginanie niedostatecznie charakteryzuje przydatność składu warstwy uzupełniającej do zastosowania w celach restauracyjnych, z kolei prawdopodobieństwo powstania naprężeń od rozciągania i zginania w masywnych przegrodach budynków zabytkowych jest bardzo małe. Jeśli natomiast chodzi o charakter kapilarno-porowatej struktury materiałów uzupełniających, to z jednej

strony może być on ustalony na podstawie integralnej i dyferencjalnej krzywej porowatości, z drugiej zaś można go uzyskać w sposób pośredni, określając nasiąkliwość, prędkość podciągania kapilarnego, prędkość wysychania czy mrozoodporność. Znając otwartą, zamkniętą i całkowitą porowatość materiału oraz powyższe charakterystyki, można wstępnie wskazać, jak będzie się zachowywał materiał w przegrodzie.

Z powyższej analizy wynika, że większość cech materiałów uzupełniających zależy od ich struktury kapilarno-porowatej. Stosowane obecnie materiały naprawcze na bazie cementu nie spełniają stawianych im wymagań, stąd też rozwiązania problemu należy szukać w kierunku przekształcenia ich struktury kapilarno-porowatej.

Z punktu widzenia mrozoodporności materiału najbardziej sprzyjające są mikrokapilary o średnicy od $2 \cdot 10^{-7}$ do $4 \cdot 10^{-7}$ cm oraz kontraktacyjne pory o średnicy od $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ do $2 \cdot 10^{-6}$ cm. W tych porach lód powstaje przy bardzo niskich temperaturach. W makrokapilarach natomiast woda zamarza przy temperaturze bliskiej zeru, co obniża mrozoodporność materiałów z przewagą makroporów [54, 68]. W przypadku zgodności warstwy uzupełniającej z materiałem konstrukcyjnym w tej pierwszej wskazana jest przewaga makroporów kapilarnych wspomagających w odsysaniu wody i roztworów soli z materiału restaurowanego. Makropory w strefie kontaktu mają duże znaczenie dla złagodzenia warunków na granicy styku. Pory materiału (stworzone poprzez napowietrzanie mieszanki) o średnicy 0,025÷0,25 mm uważa się za zamknięte i sprzyjające podwyższeniu mrozoodporności warstwy uzupełniającej. Część z nich w strefie kontaktu łączy się z powierzchnią materiału restaurowanego i nie mogą być one uważane za zamknięte. Oprócz tego zmniejszenie ilości porów zamkniętych związane jest z tym, że przy naniesieniu zaprawy uzupełniającej na powierzchnię restaurowaną woda przemieszcza się z zaprawy do odnawianego muru i otwiera pory powietrzne w zaprawie. Według współczesnych badań mrozoodporność materiałów kapilarno-porowatych zależy od rozkładu porów otwartych z uwzględnieniem ich efektywnych promieni, a także od występowania w materiale rezerwowej porowatości, która może powstać poprzez wprowadzenie do mieszanki różnych dodatków [80, 85]. Duży wpływ na strukturę materiału uzupełniającego mają:

- skład granulacyjny kruszywa,
- stosunek w/c i c/k,
- zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu.

Zmiana składu granulacyjnego kruszywa prowadzi do zagęszczenia ziaren w zaprawie. Przez zastosowanie różnych rodzajów odpowiednich dodatków oraz zmianę składników mieszanki można istotnie zmienić strukturę kapilarno-porowatą materiału. Reasumując wymagania dotyczące warstwy uzupełniającej, stwierdzono, że jej prawidłowa współpraca z materiałem restaurowanym będzie zapewniona w przypadku, gdy materiał uzupełniający będzie się charakteryzował następującymi właściwościami:

- podciąganie wody na drodze kapilarnej do 5% wysokości w czasie 24 godzin,
- wytrzymałość na ściskanie około 8 MPa,

- nasiąkliwość około 15%,
- prędkość wysychania jednakowa lub wyższa od materiału restaurowanego.

Oprócz powyższych cech warstwa uzupełniająca powinna być zgodna pod względem faktury muru oraz mieć właściwości umożliwiające naniesienie jej na restaurowaną powierzchnię – odpowiednią konsystencję i technologiczność zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych [10÷13, 34÷37, 45, 68, 70].

5.2. Dobór optymalnego składu mieszanki zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla

W warstwie uzupełniającej, podobnie jak w pierwotnym materiale konstrukcyjnym, nieuniknione jest występowanie procesów niszczących. Zachodzą one przy zmiennych warunkach cieplnych i wilgotnościowych, i są uzależnione od wielu czynników. Dobór materiału tej warstwy wymaga znajomości ocen ilościowych wkładu poszczególnych czynników. **Stąd też celem niniejszych badań jest wybór optymalnego pod względem fizyczno-mechanicznym oraz technologicznym składu mieszanki zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla.**

Do osiągnięcia postawionego celu przeprowadzono eksperyment. Wykorzystane zostały metody statystyki stosowanej oraz teoria planowania eksperymentu, dzięki czemu zintensyfikowano badania, zmniejszono liczbę przeprowadzonych prób, obniżono pracochłonność, a także koszty związane z przeprowadzaniem badań eksperymentalnych (nie obniżając przy tym wymaganej dokładności opisania matematycznego procesu). Do scharakteryzowania cech materiałów uzupełniających określono siedem funkcji celu:

- Y_1 – prędkość podciągania kapilarnego,
- Y_2 – prędkość wysychania,
- Y_3 – nasiąkliwość,
- Y_4 – wytrzymałość na ściskanie,
- Y_5 – konsystencja świeżej zaprawy,
- Y_6 – faktura powierzchni,
- Y_7 – technologiczność zaprawy pod kątem wykonania robót restauracyjnych.

Wyróżnione cechy uzależnione są od wielu czynników, spośród których wyodrębniono cztery mające istotny wpływ na wymienione wyżej właściwości projektowanej mieszanki. Do czynników tych zaliczono:

- X_1 – zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu,
- X_2 – współczynnik stosunku masy wody do masy cementu (w/c),
- X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c),
- X_4 – zawartość dodatku do zaprawy.

Nie wyczerpują one wszystkich źródeł zmienności. Jednakże z uwzględnieniem spodziewanych wyników **została postawiona teza o możliwości istotnego wpływu wyżej wymienionych czynników na analizowane właściwości Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7.**

W tabeli 5.1 zestawiono kodowane i naturalne wartości poziomów rozpatrywanych czynników, jest ona zarazem macierzą planu eksperymentu.

TABELA 5.1. Macierz planu eksperymentu oraz kodowane i naturalne wartości poziomów czynników X_1, X_2, X_3, X_4

Nr mieszanki	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
1	−1	−1	−1	−1	0,7	0,50	0,3	0
2	−1	−1	0	0	0,7	0,50	0,6	5,0
3	−1	−1	+1	0	0,7	0,50	0,9	13,5
4	−1	−1	+1	+1	0,7	0,50	1,2	13,5
5	−1	−1	+1	+1	0,7	0,50	1,5	13,5
6	−1	−1	−1	−1	0,7	0,55	0,11	0
7	−1	−1	−1	−1	0,7	0,63	0,25	2,0
8	−1	−1	0	0	0,7	0,71	0,43	3,0
9	−1	−1	+1	0	0,7	0,83	0,67	8,5
10	−1	0	+1	0	0,7	1,00	1,00	13,5
11	−1	0	−1	−1	0,7	1,22	0,11	2,1
12	−1	0	−1	−1	0,7	1,74	0,25	1,9
13	−1	0	−1	0	0,7	2,39	0,43	1,8
14	0	0	0	−1	0,8	1,02	0,11	2,2
15	0	0	−1	−1	0,8	1,65	0,25	2,1
16	0	+1	−1	0	0,8	2,47	0,43	1,8
17	**0**	**0**	**−1**	**−1**	**0,9**	**1,42**	**0,11**	**2,1**
18	+1	0	−1	−1	0,9	1,65	0,25	2,1
19	+1	+1	−1	0	0,9	2,92	0,43	1,7
20	**+1**	**+1**	**0**	**+1**	**0,9**	**2,54**	**1,63**	**4,0**
21	+1	+1	0	+1	0,9	3,38	2,28	6,0
22	+1	+1	+1	+1	0,9	3,65	2,62	9,0
23	+1	+1	0	+1	0,9	3,42	2,10	6,0
24	+1	+1	0	+1	0,9	5,60	5,15	4,0
25	+1	+1	+1	+1	0,9	10,15	7,86	10,0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznego rozpatrywanych funkcji celu i możliwość mniejszej liczby prób. Aby opisać przestrzeń czynnikową $Y_i = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$, przeprowadzono

eksperyment według planu drugiego stopnia. Materiał uzupełniający zbadano w 25 próbach, przy czym każda z nich obejmowała trzy powtórzenia. Razem przygotowano i zbadano 75 próbek materiału warstwy uzupełniającej. Eksperyment pozwolił określić zależności badanych cech Y_i od niezależnych czynników sterujących X_i. Dla każdej z funkcji celu zależność miała postać liniowego modelu regresji wielorakiej określonego równaniem:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_kx_k \pm \varepsilon \tag{5.1}$$

gdzie:
b_i – parametry modelu (współczynnik regresji) opisujące wpływ i-tej zmiennej
b_0 – wyraz wolny
ε – składnik losowy (S_e)

W celu zniwelowania wpływu niekontrolowanych zmiennych na wyniki eksperymentu warianty całokształtów wartości czynników poddano randomizacji. W związku z tym do kolejności dokonywanych pomiarów wykorzystano tabelę równomiernie rozłożonych wartości losowych.

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w ramach współpracy Politechniki Białostockiej i Państwowej Szkoły Wyższej im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej. Badania wykonano w laboratoriach Politechniki Białostockiej pod kontrolą i przy pomocy zatrudnionych tam pracowników technicznych.

5.3. Projektowanie składu zaprawy

Próbki przeznaczone do badań właściwości warstwy uzupełniającej przygotowano z następujących materiałów:
- cement portlandzki CEM I 42,5 R,
- piasek naturalny frakcji 1,5÷2 mm,
- dodatek, biowęgiel frakcji 0,5÷2 mm o zawartości C = 70%, C = 80%, C = 90%,
- domieszka Zimo-Mur, zwiększająca plastyczność i jednorodność gotowej zaprawy,
- woda.

Zaprojektowano 25 składów zapraw do warstw uzupełniających, dzieląc etapy projektowania na badania wstępne, podstawowe oraz uzupełniające. Próbki przygotowane zostały w postaci prostopadłościennych bloczków o wymiarach 4 × 4 × 16 cm. Po 3 dniach dojrzewania zostały rozformowane i umieszczone na 7 dni w komorze o stałej temperaturze 20°C (±2°C) oraz wilgotności względnej 95÷100%. Następnie próbki przez kolejne 18 dni były przechowywane w pomieszczeniu o tej samej temperaturze co wcześniej, wilgotność względna natomiast wynosiła 55% (±5%). Po okresie dojrzewania, który łącznie wynosił 28 dni, próbki poddano badaniom

eksperymentalnym, zarówno na świeżej, jak i stwardniałej zaprawie. W tabeli 5.2 przedstawiono przyjęte zakresy charakterystycznych wartości dla poszczególnych etapów badań mieszanki.

TABELA 5.2. Zakresy charakterystycznych wartości dla poszczególnych etapów

Etapy	Zawartość C w biowęglu [%]	Współczynnik w/c	Masa biowęgla do masy cementu	Dodatek do zaprawy [ml]	Liczba składów
I	70	od 0,5 do 1,0	od 0,11 do 1,5	13,5	10
II	od 70 do 90	od 1,01 do 2,92	od 0,11 do 0,43	od 1,7 do 2,2	9
III	90	od 2,54 do 10,15	od 1,63 do 7,87	od 4do 10	5

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

W etapie I, w ramach badań wstępnych, zaprojektowano **10 składów mieszanki.** Pomimo użycia maksymalnej dopuszczalnej ilości domieszki napowietrzająco-uplastyczniającej w przypadku dwóch zapraw cementowych (składy 4, 5) nie udało się uzyskać pożądanej konsystencji, gdyż mieszanka nie dała się zaformować. Podczas rozformowywania beleczek powstałych według składów nr 2 i 9 zaprawy cementowej uległy one zniszczeniu (rozsypały się). Ze względu na właściwości biowęgla, m.in. ponadprzeciętną absorbcję wody, podjęto decyzję o zmianie stosunku wody do cementu (w/c) na większy, co miało bezpośredni wpływ na konsystencję mieszanki.

W etapie II zrezygnowano z kontynuacji badań mieszanki, w której piasek zastąpiono biowęglem. Skupiono się zaś na stworzeniu innej mieszanki – cement zastąpiono biowęglem, a proporcja dodatku piasku była stała. Zaprojektowano **dziewięć składów mieszanki**. Zawartość dodatku do zaprawy była minimalna względem masy kompozytu. Na tym etapie badań ustalono, że z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie najkorzystniejszą zawartością czystego pierwiastka C w biowęglu jest C = 90%. Kompozyt, który uzyskał najwyższy wynik wytrzymałości na ściskanie (4,66 MPa), charakteryzował się następującymi proporcjami na 1 dm^3 powierzchni ścian murowej:

- cement – 165 g,
- woda – 235 g,
- kruszywo – 1470 g,
- biowęgiel – 20 g,
- dodatek do zaprawy 2,1 ml,
- współczynnik w/c = 1,42,
- współczynnik b/c = 0,12.

W etapie III przeprowadzono badania uzupełniające, zaprojektowano **pięć składów** mieszanki. W trakcie badań wytrzymałościowych okazało się, że można stworzyć

trwalszy kompozyt w porównaniu z zaprojektowanym wcześniej składem nr 17. Skład zaprawy uzyskanego kompozytu nr 20:

- cement – 450 g,
- woda – 1143 g,
- kruszywo – 735 g,
- biowęgiel – 735 g,
- dodatek do zaprawy 4 ml,
- współczynnik w/c = 2,54,
- współczynnik b/c = 1,63.

W porównaniu z mieszanką nr 17 powstały kompozyt charakteryzował się większą o 13% wytrzymałością na ściskanie. Wyniki badań cieplnych, mechanicznych i fizycznych cech materiałowych zaprojektowanych zapraw uzupełniających przedstawiono w podrozdziale 5.5, ich zaś składy podano w tabeli 5.3.

TABELA 5.3. Skład zaprojektowanych zapraw

Nr mieszanki	Składniki							
	cement [g]	woda [g]	kruszywo [g]	biowęgiel [g]	zawartość C [%]	dodatek do zaprawy [ml]	w/c	b/c
N.	450	225	1350	–	–	–	0,50	–
1	450	225	1215	135	70	0,0	0,50	0,30
2	450	225	1080	270	70	5,0	0,50	0,60
3	450	225	945	405	70	13,5	0,50	0,90
4	450	225	810	540	70	13,5	0,50	1,20
5	450	225	675	675	70	13,5	0,50	1,50
6	405	225	1350	45	70	0,0	0,56	0,11
7	360	225	1350	90	70	2,0	0,63	0,25
8	315	225	1350	135	70	3,0	0,71	0,43
9	270	225	1350	180	70	8,5	0,83	0,67
10	225	225	1350	225	70	13,5	1,00	1,00
11	190	234	1470	20	70	2,1	1,23	0,11
12	150	261	1470	40	70	1,9	1,74	0,27
13	115	276	1470	50	70	1,8	2,40	0,43
14	220	222	1470	25	80	2,2	1,01	0,11
15	145	237	1470	35	80	2,1	1,63	0,24
16	110	268	1470	45	80	1,8	2,44	0,41
17	**165**	**235**	**1470**	**20**	**90**	**2,1**	**1,42**	**0,12**
18	140	229	1470	35	90	2,1	1,64	0,25

Nr mieszanki	Składniki							
	cement [g]	woda [g]	kruszywo [g]	biowęgiel [g]	zawartość C [%]	dodatek do zaprawy [ml]	w/c	b/c
19	100	290	1470	40	90	1,7	2,90	0,40
20	**450**	**1143**	**735**	**735**	**90**	**4,0**	**2,54**	**1,63**
21	450	1520	440	1030	90	6,0	3,38	2,29
22	450	1642	290	1180	90	9,0	3,65	2,62
23	300	1026	735	735	90	6,0	3,42	2,45
24	200	1120	440	1030	90	4,0	5,60	5,15
25	150	1522	290	1180	90	10,0	10,15	7,87

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Wstępna analiza wyników badań wykazała, że występuje rozrzut wartości Y_i zarówno w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach. Wyniki uśrednionych pomiarów podstawowych właściwości modyfikowanych mieszanek uzupełniających $\bar{Y}_1 \div \bar{Y}_7$ w zależności od czynników $X_1 \div X_4$ przedstawiono w tabeli 5.4.

TABELA 5.4. Wyniki uśrednionych pomiarów podstawowych właściwości modyfikowanych mieszanek uzupełniających $\bar{Y}_1$, $\bar{Y}_2$, $\bar{Y}_3$, $\bar{Y}_4$, $\bar{Y}_5$, $\bar{Y}_6$, $\bar{Y}_7$ w zależności od czynników X_1, X_2, X_3, X_4

Nr mieszanki	Kodowane wartości czynników				Średnie wartości badanych właściwości w naturalnych jednostkach						
	X_1	X_2	X_3	X_4	$\bar{Y}_1$ %	$\bar{Y}_2$ doby	$\bar{Y}_3$ %	$\bar{Y}_4$ MPa	$\bar{Y}_5$ cm	$\bar{Y}_6$ pkt	$\bar{Y}_7$ pkt
1	−1	−1	−1	−1	6,00	5,60	12,20	3,51	2,0	3	2
2	−1	−1	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0
3	−1	−1	+1	0	10,90	8,77	16,67	0,56	2,3	1	1
4	−1	−1	+1	+1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0
5	−1	−1	+1	+1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0
6	−1	−1	−1	−1	8,93	6,90	13,50	2,62	2,1	3	2
7	−1	−1	−1	−1	9,69	7,46	15,59	1,95	2,1	3	1
8	−1	−1	0	0	10,32	8,09	16,22	1,32	2,1	2	1
9	−1	−1	+1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0
10	−1	0	+1	0	11,22	8,99	17,12	1,23	2,2	1	0
11	−1	0	−1	−1	8,40	6,80	14,30	2,93	2,2	4	3
12	−1	0	−1	−1	9,00	7,12	14,90	2,32	1,9	3	2
13	−1	0	−1	0	9,43	7,33	15,33	1,66	2,1	3	2
14	0	0	0	−1	7,70	6,40	13,60	3,46	1,9	4	3
15	0	0	−1	−1	8,33	6,60	14,23	2,66	2,2	3	2

Nr mieszanki	Kodowane wartości czynników				Średnie wartości badanych właściwości w naturalnych jednostkach						
	X_1	X_2	X_3	X_4	$\bar{Y}_1$ %	$\bar{Y}_2$ doby	$\bar{Y}_3$ %	$\bar{Y}_4$ MPa	$\bar{Y}_5$ cm	$\bar{Y}_6$ pkt	$\bar{Y}_7$ pkt
16	0	+1	−1	0	9,17	7,20	15,07	1,86	2,3	3	2
17	0	0	−1	−1	**5,17**	**5,20**	**11,07**	**4,66**	**1,8**	**4**	**4**
18	+1	0	−1	−1	6,07	5,60	11,97	3,58	2,3	4	4
19	+1	+1	−1	0	6,50	5,80	12,40	2,48	2,1	3	3
20	+1	+1	0	+1	**5,30**	**5,40**	**11,90**	**5,27**	**2,1**	**3**	**4**
21	+1	+1	0	+1	8,35	6,70	13,90	2,80	2,2	3	4
22	+1	+1	+1	+1	8,90	7,10	14,00	2,25	2,3	3	3
23	+1	+1	0	+1	8,20	6,60	13,80	2,95	2,4	2	2
24	+1	+1	0	+1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0
25	+1	+1	+1	+1	10,23	8,10	16,00	0,62	2,4	1	0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Na podstawie uśrednionych wyników eksperymentu przy wykorzystaniu analizy regresji zostały opracowane następujące modele matematyczne:

$$\bar{Y}_1 = 14{,}60 - 14{,}41 \cdot X_1 + 3{,}30 \cdot X_2 - 3{,}50 \cdot X_3 + 0{,}18 \cdot X_4 \pm 3{,}16 \quad (5.2)$$

$$\bar{Y}_2 = 9{,}27 - 7{,}87 \cdot X_1 + 2{,}48 \cdot X_2 - 2{,}75 \cdot X_3 + 0{,}13 \cdot X_4 \pm 2{,}49 \quad (5.3)$$

$$\bar{Y}_3 = 17{,}87 - 13{,}97 \cdot X_1 + 5{,}03 \cdot X_2 - 5{,}65 \cdot X_3 + 0{,}20 \cdot X_4 \pm 4{,}88 \quad (5.4)$$

$$\bar{Y}_4 = -4{,}90 + 10{,}25 \cdot X_1 - 0{,}01 \cdot X_2 - 0{,}41 \cdot X_3 - 0{,}10 \cdot X_4 \pm 0{,}91 \quad (5.5)$$

$$\bar{Y}_5 = 1{,}62 - 0{,}61 \cdot X_1 + 0{,}70 \cdot X_2 - 0{,}82 \cdot X_3 - 0{,}02 \cdot X_4 \pm 0{,}68 \quad (5.6)$$

$$\bar{Y}_6 = -0{,}50 + 4{,}16 \cdot X_1 + 0{,}56 \cdot X_2 - 0{,}95 \cdot X_3 - 0{,}09 \cdot X_4 \pm 0{,}77 \quad (5.7)$$

$$\bar{Y}_7 = -6{,}48 + 11{,}46 \cdot X_1 + 0{,}20 \cdot X_2 - 0{,}73 \cdot X_3 - 0{,}04 \cdot X_4 \pm 0{,}74 \quad (5.8)$$

W powyższych modelach część współczynników jako nieistotna została usunięta. Ocenę istotności współczynników regresji przeprowadzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium *t-Studenta*. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$. Adekwatność modeli sprawdzono testem z użyciem kryterium *Fishera F* oraz współczynnika determinacji R^2. Poniżej zinterpretowano wyniki badania wpływu przyjętych czynników X_1, X_2, X_3, X_4 na wartości $\bar{Y}_1$, $\bar{Y}_2$, $\bar{Y}_3$, $\bar{Y}_4$, $\bar{Y}_5$, $\bar{Y}_6$, $\bar{Y}_7$.

Na podstawie analizy równania regresji opisanego wzorem 5.2 omówiono oddziaływanie czynników na wartość prędkości podciągania kapilarnego Y_1. **Największy** wpływ wykazał czynnik X_2 – współczynnik w/c. Ustalono jego dodatni efekt liniowy na wartość zmiennej Y_1. To znaczy, że przy zwiększaniu wartości współczynnika w/c (X_2)

wartość prędkości podciągania kapilarnego (Y_1) również wzrasta. Stwierdzono niewielki dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynnika X_3 z czynnikiem X_2.

Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość Y_1 ulokował się czynnik X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c). Ustalono ujemny efekt liniowy czynnika X_3 na wartość zmiennej Y_1. To oznacza, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_1 zmalały, czyli przy zwiększaniu wartości X_3 (b/c) prędkość podciągania kapilarnego spadła.

Na trzecim miejscu pod względem stopnia wpływu znalazł się czynnik X_1 – zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu – który wykazał ujemny efekt liniowy. To znaczy, że wraz ze wzrostem X_1 wartości funkcji Y_1 zmalały. Pod względem praktycznym celowe jest przeanalizowanie zależności prędkości podciągania kapilarnego od kluczowego czynnika X_2 przy ustabilizowanych wartościach pozostałych czynników, $X_1 = 14{,}5137$, $X_3 = 2{,}7261$.

Powstały model nie był w pełni dopasowany, o czym świadczą wartość testu $F = 9{,}77$, $p < 0{,}0002$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}26$. Do przygotowania modelu opisującego zmienną Y_1 przyjęto cztery potencjalne zmienne objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy odrzucono zmienną X_4, dla której wartość testu $t = 1{,}58$, $p = 0{,}11 > 0{,}05$. W przypadku pozostałych zmiennych X_1, X_2, X_3 uzyskano istotną zależność ($p < 0{,}05$). Wówczas model regresji dla prędkości podciągania kapilarnego miał postać:

$$\tilde{Y}_1 = 15{,}81 - 14{,}51 \cdot X_1 + 2{,}74 \cdot X_2 - 2{,}72 \cdot X_3 \pm 3{,}20 \tag{5.9}$$

Interpretacja wyników badania wpływu przyjętych czynników na wartość prędkości wysychania Y_2 została przeprowadzona na podstawie analizy równania regresji opisanego wzorem 5.3. **Największe** oddziaływanie na tę wartość wykazał czynnik X_2 (współczynnik w/c). Ustalono jego dodatni liniowy efekt na wartość zmiennej Y_2. To znaczy, że przy zwiększaniu wartości współczynnika w/c (X_2) prędkość wysychania (Y_2) również wzrosła.

Kolejny pod względem stopnia wpływu na wartość Y_2 był czynnik X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c). Ustalono jego ujemny efekt liniowy na wartość zmiennej Y_2, czyli, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_2 zmalały. Przy zwiększaniu wartości X_3 (b/c) prędkość wysychania spadła.

Powstały model również nie był w pełni dopasowany, o czym świadczą wartość testu $F = 12{,}52$, $p < 0{,}0002$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}23$. Do przygotowania modelu opisującego zmienną Y_2 przyjęto **cztery potencjalne zmienne** objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy odrzucono zmienną X_1, dla której wartość testu $t = -1{,}81$, $p = 0{,}07 > 0{,}05$, oraz X_4, dla której wartość testu $t = 1{,}48$, $p = 0{,}14 > 0{,}05$. W przypadku zmiennych X_2 i X_3 uzyskano istotną zależność ($p < 0{,}05$). Wówczas model regresji dla prędkości wysychania miał postać:

$$\tilde{Y}_2 = 4{,}48 + 1{,}66 \cdot X_2 - 1{,}93 \cdot X_3 \pm 2{,}55 \tag{5.10}$$

Interpretacja wyników badania wpływu przyjętych czynników na wartość nasiąkliwości Y_3 została przeprowadzona na podstawie analizy równania regresji opisanego wzorem 5.4. **Największy** wpływ na wartość prędkości wysychania wykazał czynnik X_2 – współczynnik w/c. Ustalono jego dodatni efekt liniowy na wartość zmiennej Y_3, co oznacza, że przy zwiększaniu wartości współczynnika w/c (X_2) wartość nasiąkliwości (Y_3) również wzrosła. Stwierdzono niewielki ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynnika X_3 z czynnikiem X_2.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na wartość zmiennej był czynnik X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c). Ustalono jego ujemny efekt liniowy na wartość zmiennej Y_3. Wynika z tego, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_3 zmalały, z kolei przy zwiększaniu wartości X_3 (b/c) nasiąkliwość spadła. **Powstały model także nie był** w pełni dopasowany, o czym świadczą wartość testu $F = 16{,}51$, $p < 0{,}0001$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}29$.

Do przygotowania modelu opisującego zmienną Y_3 **przyjęto cztery potencjalne zmienne** objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy odrzucono zmienne X_1, dla której wartość testu $t = -1{,}64$, $p = 0{,}1 > 0{,}05$, oraz X_4, dla której wartość testu $t = 1{,}14$, $p = 0{,}25 > 0{,}05$. W przypadku zmiennych X_2 i X_3 uzyskano istotną zależność ($p < 0{,}05$). Wówczas model regresji dla nasiąkliwości miał postać:

$$\bar{Y}_3 = 9{,}16 + 3{,}67 \cdot X_2 - 4{,}34 \cdot X_3 \pm 4{,}95 \tag{5.11}$$

Interpretacja wyników wpływu przyjętych czynników na wartość wytrzymałości na ściskanie Y_4 została przeprowadzona na podstawie analizy równania regresji (wzór 5.5). **Największy** wpływ na tę wartość wykazał czynnik X_1 – zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu. Ustalono dodatni efekt liniowy tego czynnika na wartość zmiennej Y_4. Wynika z tego, że przy zwiększaniu zawartości czystego pierwiastka C w biowęglu (X_1) wartość wytrzymałości na ściskanie (Y_4) również równomiernie wzrastała. Stwierdzono dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynnika X_1 z czynnikami X_3 oraz X_4.

Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość Y_4 był czynnik X_4 – zawartość dodatku do zaprawy. Ustalono jego ujemny efekt liniowy na wartość zmiennej Y_4. To znaczy, że wraz ze wzrostem X_4 wartości funkcji Y_4 zmalały, a wytrzymałość na ściskanie spadła. Kolejny istotny wpływ miał czynnik X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c), który wykazał ujemny efekt liniowy, co oznacza, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_4 zmalały. Pod względem praktycznym celowe było przeanalizowanie zależności prędkości podciągania kapilarnego od kluczowego czynnika X_1 przy ustabilizowanych wartościach pozostałych czynników, $X_3 = 0{,}4330$, $X_4 = 0{,}1061$. **Powstały model *był bardzo dobrze dopasowany*, o czym świadczą wartość testu $F = 41{,}51$, $p < 0{,}0001$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}91$.** Do przygotowania tego modelu przyjęto cztery potencjalne zmienne objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy odrzucono zmienną X_2, dla której wartość testu $t = -0{,}09$, $p = 0{,}92 > 0{,}05$. W przypadku pozostałych zmiennych X_1, X_3, X_4

uzyskano istotną zależność ($p < 0,05$). Wówczas model regresji dla wytrzymałości na ściskanie miał postać:

$$\bar{Y}_4 = -4,87 + 10,18 \cdot X_1 - 0,43 \cdot X_3 - 0,10 \cdot X_4 \pm 0,91 \quad (5.12)$$

Interpretacja wyników badania wpływu przyjętych czynników na wartość konsystencji świeżej zaprawy Y_5 została przeprowadzona na podstawie analizy równania regresji opisanego wzorem 5.6. **Największe** oddziaływanie wykazał czynnik X_2 – współczynnik w/c. Ustalono jego dodatni efekt liniowy na wartość zmiennej Y_5. To znaczy, że przy zwiększaniu wartości współczynnika w/c (X_2) wartość konsystencji świeżej zaprawy (Y_5) również wzrosła.

Kolejnym istotnym czynnikiem był X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c). Ustalono jego ujemny efekt liniowy na wartość zmiennej Y_5. To znaczy, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_5 zmalały, a wartość konsystencji świeżej zaprawy spadła.

Powstały model nie był w pełni dopasowany, o czym świadczą wartość testu $F = 23,20$, $p < 0,0001$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0,37$. Do przygotowania modelu opisującego zmienną Y_5 przyjęto cztery potencjalne zmienne objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy odrzucono zmienne X_1, dla której wartość testu $t = -0,51$, $p = 0,11 > 0,05$, oraz X_4, dla której wartość testu $t = 0,92$, $p = 0,35 > 0,05$. W przypadku pozostałych zmiennych X_2 i X_3 uzyskano istotną zależność ($p < 0,05$). Wówczas model regresji dla konsystencji świeżej zaprawy miał postać:

$$\bar{Y}_5 = 1,32 + 0,60 \cdot X_2 - 0,70 \cdot X_3 \pm 0,68 \quad (5.13)$$

Interpretacja wyników badania wpływu przyjętych czynników na wartość oceny faktury powierzchni Y_6 została przeprowadzona na podstawie analizy równania regresji opisanego wzorem 5.7. **Największy** wpływ na wartość prędkości podciągania kapilarnego wykazał czynnik X_1 – zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu. Ustalono jego dodatni efekt liniowy na wartość zmiennej Y_6. To znaczy, że przy zwiększaniu zawartości czystego pierwiastka C w biowęglu (X_1) wartość faktury powierzchni wzrosła. Stwierdzono niewielki dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynnika X_2 z czynnikiem X_1.

Na drugim miejscu pod względem stopnia oddziaływania na wartość Y_6 znalazł się czynnik X_2 – współczynnik w/c. Ustalono jego dodatni efekt liniowy na wartość zmiennej Y_6. To oznacza, że przy zwiększaniu wartości współczynnika w/c (X_2) wartość oceny faktury powierzchni również wzrosła. Stwierdzono niewielki dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynnika X_4 z czynnikiem X_2.

Kolejny pod względem stopnia wpływu był czynnik X_4 – zawartość dodatku do zaprawy, który wykazał ujemny efekt liniowy. Wynika z tego, że wraz z jego wzrostem wartości funkcji Y_6 zmalały. **Czwartym czynnikiem** pod względem stopnia wpływu był czynnik X_3 – stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c). Ustalono jego ujemny efekt liniowy na wartość zmiennej Y_6, co oznacza, że wraz ze wzrostem X_3 wartości funkcji Y_6 zmalały, a wartość oceny faktury powierzchni spadła.

Powstały **model był bardzo dobrze dopasowany**, o czym świadczą wartość testu $F = 66{,}17$, $p < 0{,}0001$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}72$.

Jeśli zaś chodzi o zmienną Y_7, do przygotowania opisującego ją modelu przyjęto cztery potencjalne zmienne objaśniające ($X_1 \div X_4$). W wyniku przeprowadzonej analizy nie odrzucono żadnej z nich z uwagi na uzyskaną istotną zależność ($p < 0{,}05$). W tym przypadku model regresji dla faktury powierzchni nie zmienił się i **był dobrze dopasowany**, o czym świadczą wartość testu $F = 42{,}77$, $p < 0{,}0001$ oraz współczynnik determinacji na poziomie $R^2 = 0{,}69$.

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że wszystkie opracowane modele były adekwatne i mogą być wykorzystane w dalszych badaniach właściwości materiału warstw uzupełniających.

5.4. Optymalny skład mieszanki zaprawy cementowej do warstw uzupełniających

Zgodnie z analizą aktualnego stanu wiedzy i wcześniejszymi rozważaniami, aby zapewnić prawidłową współpracę zaprawy uzupełniającej z materiałem restaurowanym, ta pierwsza powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- prędkością kapilarnego podciągania wody (Y_1) – 5% wysokości w czasie 24 godzin,
- prędkością wysychania (Y_2) – maksymalną,
- nasiąkliwością (Y_3) – około 15%,
- wytrzymałością na ściskanie (Y_4) – około 8 MPa,
- konsystencją świeżej zaprawy (Y_5) – 2,0 cm,
- fakturą powierzchni (Y_6) – 5 punktów,
- technologicznością pod kątem wykonywania robót restauracyjnych (Y_7) – 5 punktów.

Na podstawie analizy wyników uśrednionych pomiarów podstawowych właściwości modyfikowanych mieszanek uzupełniających ustalono, że wspomnianym wymaganiom w najwyższym stopniu odpowiadają **mieszanka nr 17** i **mieszanka nr 20**.

W przypadku mieszanki **nr 17**:

- zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu $X_1 = 0{,}9$,
- stosunek masy wody do masy cementu (w/c) $X_2 = 1{,}42$,
- stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c) $X_3 = 0{,}11$,
- zawartość dodatku do zaprawy $X_4 = 2{,}1$.

Jeśli zaś chodzi o wartości podstawowe właściwości tej mieszanki uzupełniającej (nr 17), to:

- prędkość podciągania kapilarnego (Y_1) – 5,17% w ciągu doby,
- prędkość wysychania (Y_2) – 5,2 doby,

- nasiąkliwość (Y_3) – 11,07%,
- wytrzymałość na ściskanie (Y_4) – 4,66 MPa,
- konsystencja świeżej zaprawy (Y_5) – 1,8 cm,
- faktura powierzchni (Y_6) – 4 punkty,
- technologiczność zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych (Y_7) – 4 punkty.

W przypadku mieszanki **nr 20**:
- zawartość czystego pierwiastka C w biowęglu $X_1 = 0{,}9$,
- stosunek masy wody do masy cementu (w/c) $X_2 = 2{,}54$,
- stosunek masy biowęgla do masy cementu (b/c) $X_3 = 1{,}63$,
- zawartość dodatku do zaprawy $X_4 = 4{,}0$.

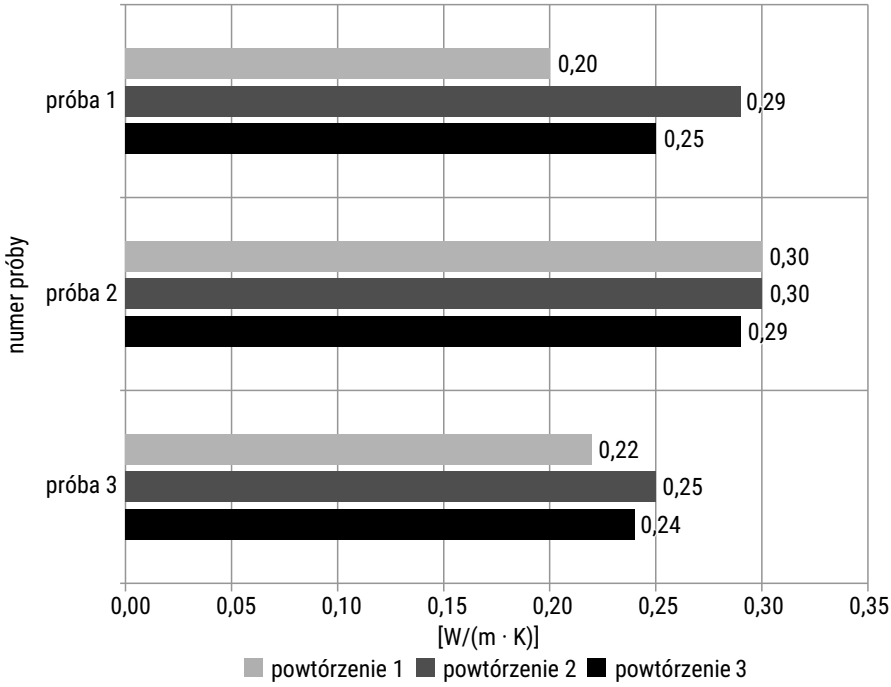
Dla tego składu wartości podstawowe właściwości mieszanki uzupełniającej (nr 20) są następujące:
- prędkość podciągania kapilarnego (Y_1) – 5,3% w ciągu doby,
- prędkość wysychania (Y_2) – 5,4 doby,
- nasiąkliwość (Y_3) – 11,90%,
- wytrzymałość na ściskanie (Y_4) – 5,27 MPa,
- konsystencja świeżej zaprawy (Y_5) – 2,1 cm,
- faktura powierzchni (Y_6) – 3 punkty,
- technologiczność zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych (Y_7) – 4 punkty.

Mieszanka cementowa o składzie i właściwościach przedstawionych powyżej charakteryzuje się optymalnymi cechami technicznymi, w tym cieplno-wilgotnościowymi, i w związku z tym mogła być stosowana do uzupełnienia ubytków w spoinach i warstwach ściennych wykonanych z cegieł.

5.5. Badania cech materiałowych powstałego kompozytu

5.5.1. Właściwości cieplne

Badanie przewodności cieplnej λ powstałego kompozytu (warstwy uzupełniającej) przeprowadzono metodą stacjonarną w aparacie płytowym HFM Holometrix 436/3 na trzech próbach w trzech powtórzeniach. W tym celu przygotowano próbki o wymiarach 35 × 35 cm i grubości 15 cm. Ich powierzchnie zostały dokładnie wygładzone, aby nierówności nie zakłóciły wyników z pomiarów. Próbki wykonano według składu nr 17. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 5.1.



RYS. 5.1. Wyniki wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ powstałego materiału

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Zestawienie osiągniętych wartości podano w tabeli 5.5.

TABELA 5.5. Wyniki wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ powstałego materiału [W/(m · K)]

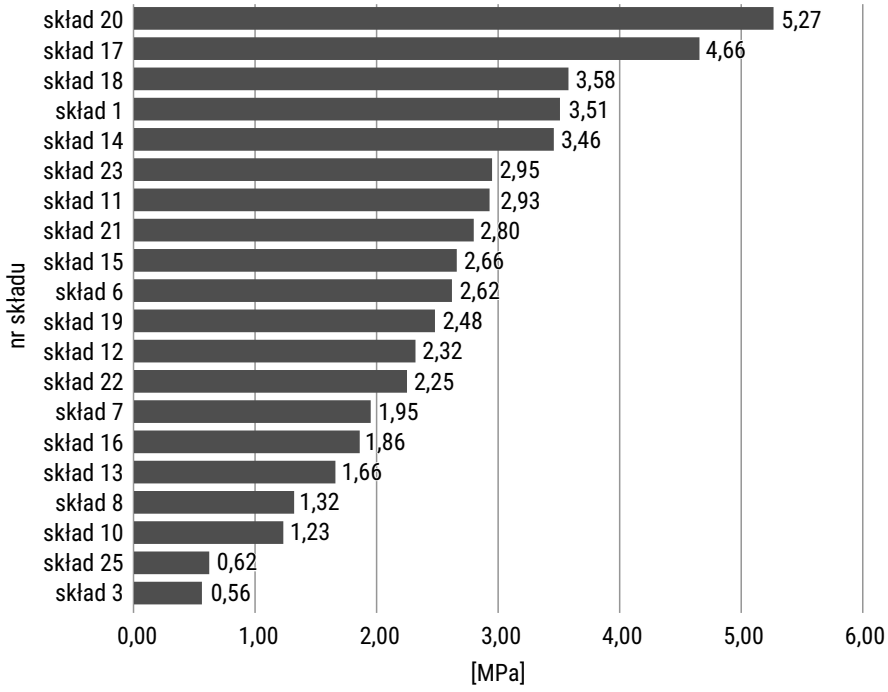
Nr powtórzenia	Nr próby		
	próba 1	próba 2	próba 3
Powtórzenie 1	0,20	0,30	0,22
Powtórzenie 2	0,29	0,30	0,25
Powtórzenie 3	0,25	0,29	0,24
Wartość średnia	0,24	0,29	0,23

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ wyniosła 0,25 W/(m · K), co klasyfikuje materiał do dalszych prac konserwatorsko-restauratorskich. Materiał uzyskał ponad trzykrotnie niższą λ w porównaniu ze znanym już tynkiem cementowo-wapiennym, którego wartość wynosi 0,82 W/(m · K) [34, 48, 60, 62].

5.5.2. Właściwości mechaniczne

W tym podrozdziale zaprezentowano wyniki badań cech materiałowych zaprojektowanych mieszanek cementowych z dodatkiem biowęgla dotyczących właściwości mechanicznych. Na rysunku 5.2 przedstawiono uśrednione wartości osiągniętych wytrzymałości na ściskanie.



RYS. 5.2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie zaprojektowanych zapraw z biowęglem

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że tylko jedna mieszanka osiągnęła wymaganą wytrzymałość na ściskanie, wynoszącą 5,27 MPa.

TABELA 5.6. Skład mieszanek zakwalifikowanych do dalszych badań

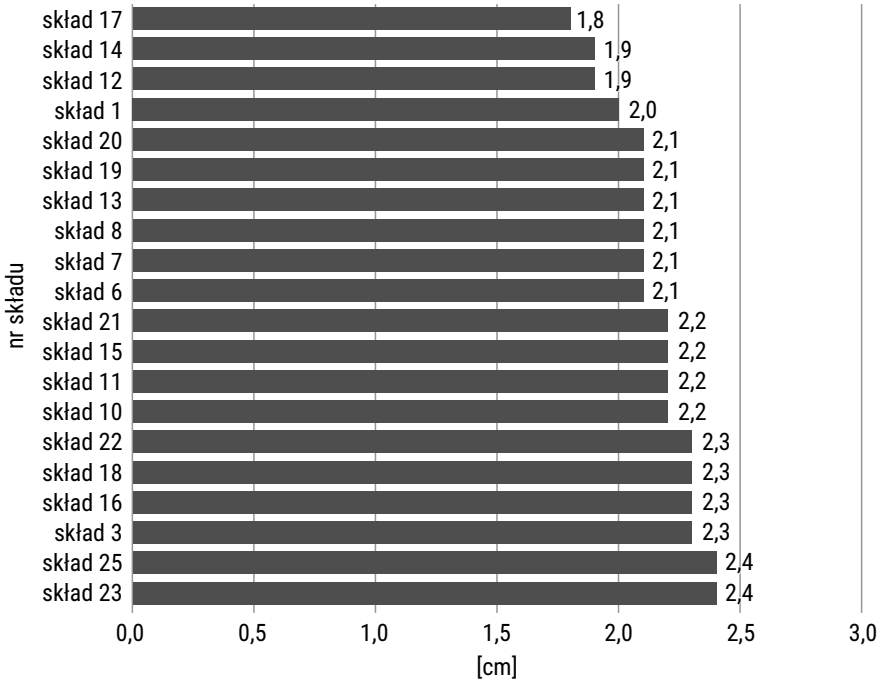
Receptura	Cement	Woda	Kruszywo	Biowęgiel	Dodatek	w/c	b/c	Wytrzymałość na ściskanie
20	450 g	1143 g	735 g	735 g	4 ml	2,54	1,63	5,27 MPa
17	165 g	235 g	1470 g	20 g	2,1 ml	1,42	0,12	4,66 MPa

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Pozostałe receptury nie osiągnęły wymaganej (założonej) wytrzymałości na ściskanie, co dyskwalifikuje je do zastosowania jako warstwy uzupełniające ścian murowanych (ceglanych) budynków zabytkowych. Jeśli zaś chodzi o badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, uzyskane wartości wynosiły > 1 MPa.

5.5.3. Właściwości fizyczne

Poniżej przedstawiono wyniki badań cech materiałowych zaprojektowanych mieszanek cementowych z dodatkiem biowęgla dotyczących właściwości fizycznych. Na rysunku 5.3 oznaczono uśrednione wartości konsystencji świeżej zaprawy uzyskane przy użyciu penetrometru.



RYS. 5.3. Oznaczenia konsystencji świeżej zaprawy uzyskane przy użyciu penetrometru

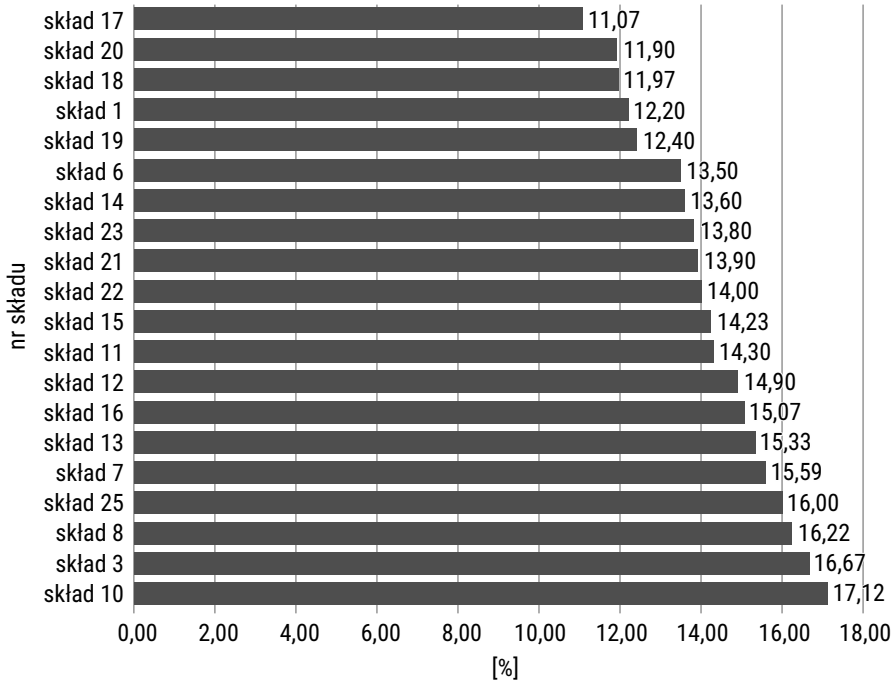
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Na podstawie analizy tych wyników stwierdzono, że większość z projektowanych mieszanek osiągnęła pożądaną konsystencję na poziomie 2,0 cm zanurzenia penetrometru w mieszance.

Konsystencją niższą niż zakładana charakteryzowały się mieszanki nr 17, 14 (cement – 220 g, woda – 222 g, kruszywo – 1470 g, biowęgiel – 25 g, dodatek do zaprawy – 2,2 ml, współczynnik w/c = 1,01, współczynnik b/c = 0,11) oraz 12 (cement – 150 g, woda – 261 g, kruszywo – 1470 g, biowęgiel – 40 g, dodatek do zaprawy – 1,9 ml,

współczynnik w/c = 1,74, współczynnik b/c = 0,27). Konsystencję na poziomie 2,0 cm zanurzenia penetrometru osiągnął skład nr 1. W pozostałych mieszankach penetrometr zanurzył się na głębokość 2,1 cm i wyższą, co wpłynęło niekorzystnie na ich wyniki oceny technologiczności pod kątem wykonywania robót restauracyjnych, o czym będzie mowa w dalszej części monografii.

Kolejną badaną cechą było oznaczenie **nasiąkliwości zaprawy**. Po analizie otrzymanych wartości można stwierdzić, że większość z badanych mieszanek **uzyskała pożądany wynik** na poziomie około 15%. **Najlepszy rezultat miała mieszanka nr 17**, tym samym osiągając najniższą wartość plasującą się na poziomie 11,07%. Próby w składach 20, 18, 1, 19, 6, 14, 23, 21, 22, 15, 11 i 12 miały wyższe wyniki w porównaniu ze składem mieszanki **nr 17**, w granicach od 11,90% do 14,90% nasiąkliwości materiału. W kolejnych składach mieszanek nr 16, 13, 7, 25, 8, 3 i 10 nasiąkliwość wzrastała od 15,07% do 17,12%. Wyniki uśrednionych wartości oznaczenia nasiąkliwości zaprawy przedstawiono na rysunku 5.4.



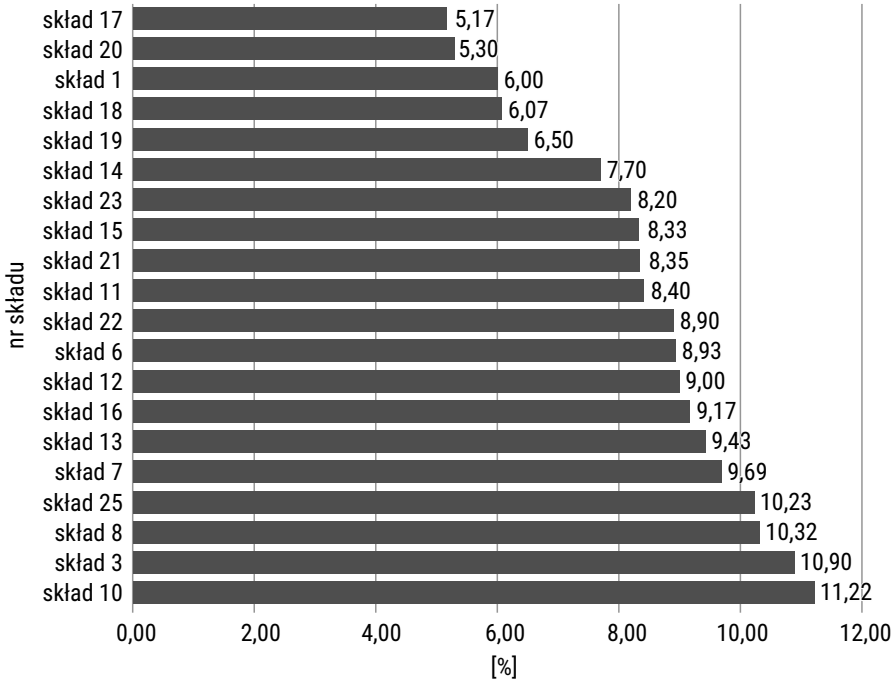
RYS. 5.4. Nasiąkliwość zaprawy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Charakterystyczna dla mieszanek, które osiągnęły wyższe wskaźniki niż zakładane (około 15%), była niska wartość współczynnika w/c, utrzymująca się na poziomie od 0,5 do 1,42. Istotną rolę odegrał również czynnik w postaci wartości stosunku

biowęgla do cementu, który w przypadku niskiej nasiąkliwości wyniósł 0,12÷0,30, a w odniesieniu do wyższej niż zakładana osiągnął wartość ≥0,5.

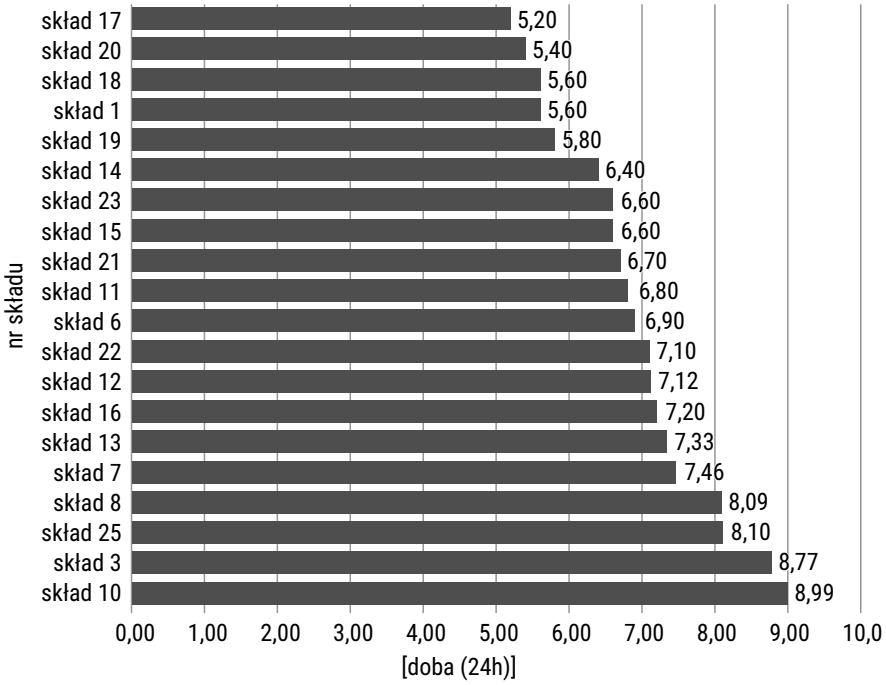
Podobnie jak w przypadku oznaczenia nasiąkliwości zaprawy, tak i przy ustalaniu **kapilarnego podciągania wody** w zaprawie należy wskazać, że większość z badanych mieszanek nie osiągnęła pożądanego wyniku na poziomie założonych 5% wysokości w czasie 24 godzin. **Dopuszczalne** wyniki odnotowano tylko w mieszankach nr 17 – równe 5,17% i nr 20 – równe 5,30%. Pozostałe **mieszanki nie osiągnęły założonej wymaganej wartości** kapilarnego podciągania wody w zaprawie, co dyskwalifikuje je do zastosowania jako warstwy uzupełniające ścian murowych budynków zabytkowych. Kapilarne podciąganie wody w zaprawie przedstawiono na rysunku 5.5.



RYS. 5.5. Kapilarne podciąganie wody w zaprawie

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

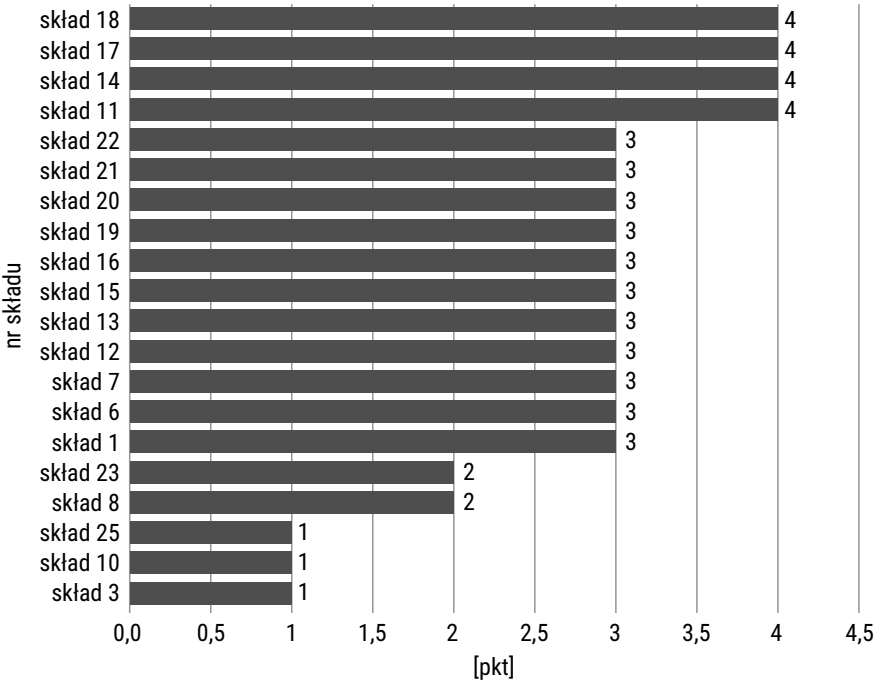
Kolejny badany parametr dotyczył określania **prędkości wysychania zaprawy**, która w przypadku mieszanki nr 17 była najniższa i osiągnęła wartość 5,20%. Mieszanki nr 20, 18, 1 i 19 charakteryzowały się prędkością wysychania zaprawy na poziomie 5,4÷5,8% w czasie 24 godzin. Pozostałe zaś nie osiągnęły założonej wymaganej wartości prędkości wysychania zaprawy na poziomie ~5% (były >6%), czego wyniki zobrazowano na rysunku 5.6.



RYS. 5.6. Prędkość wysychania zaprawy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

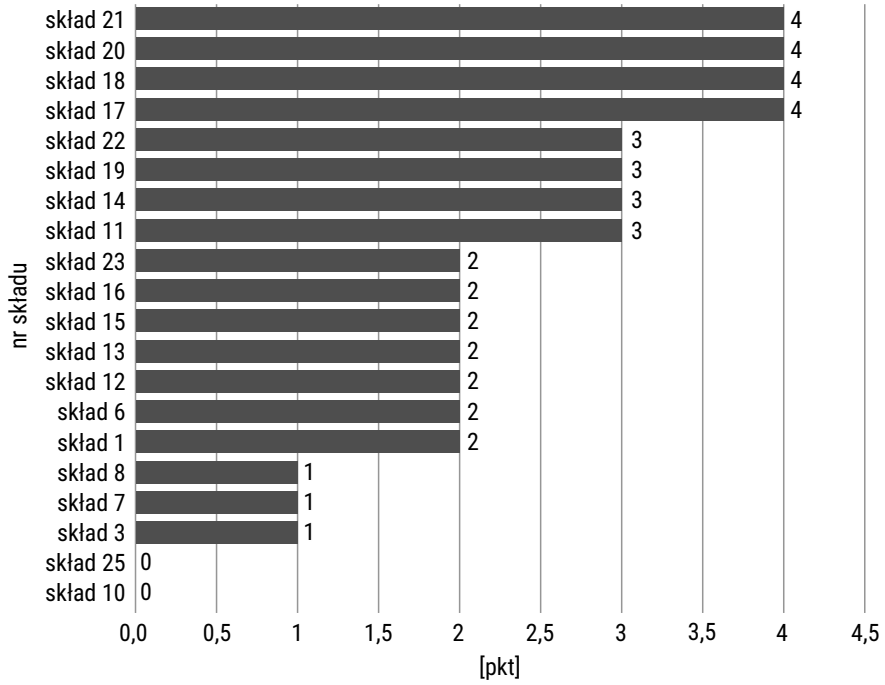
Dokonano również oceny zgodności faktury powierzchni z materiałem restaurowanym na podstawie sześciostopniowej skali, wyniki oceny przedstawiono na rysunku 5.7. Żaden z badanych składów mieszanek nie osiągnął faktury powierzchni próbki identycznej z cegłą wzorcową. **Faktura powierzchni** prób zaprojektowanych na podstawie **składów mieszanek nr 18, 17, 14 oraz 11 nieznacznie różniła się od cegły wzorcowej** odmiennością poszczególnych ziaren kruszywa. Nieistotną różnicę faktury powierzchni próbki względem cegły wzorcowej, objawiającą się występowaniem niecharakterystycznych dla cegły wzorcowej porów o średnicy do 0,5 mm, zanotowano w mieszankach nr 22, 21, 20, 19, 16, 15, 13, 12, 7, 6 oraz 1. Istotna natomiast różnica, objawiająca się dużą ilością porów o średnicy powyżej 0,5 mm, wystąpiła w mieszankach nr 23 i 8. Równie ważną różnicę w fakturze powierzchni między próbkami a cegłą wzorcową, objawiającą się występowaniem niecharakterystycznych dla cegły ceramicznej defektów powierzchni, odnotowano w mieszankach nr 25, 10 oraz 3. Pomimo to zaprawy nr 25, 10 oraz 3 mogą być zastosowane jako materiał uzupełniający pod badanym względem.



RYS. 5.7. Zgodność faktury powierzchni zaprawy

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Ostatni etap dotyczył oceny technologiczności zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych, której, podobnie jak przy zgodności faktury powierzchni, dokonano na podstawie odpowiedniej sześciostopniowej skali. **Żadna z badanych mieszanek nie osiągnęła konsystencji** gęstej śmietany, lekko nanoszącej się na powierzchnię, niespływającej i nieodwarstwiającej się. Zaprawa stworzona według receptur 21, 20, 18 i 17 po naniesieniu na pionową powierzchnię nie spływa i nie odwarstwia się przy grubości warstwy nie większej niż 1 cm. Niestety zaprawy powstałe według składów 22, 19, 14 i 11 po naniesieniu na taką powierzchnię spływały w około 20%, w przypadku zaś mieszanek nr 8, 7 i 3 – w około 50%. Zaprawą bardzo suchą, rzadką, która trudno nanosiła się na powierzchnię pionową, była próba powstała na podstawie składów 8, 7 oraz 3. Zaprawą nieprzydatną, z uwagi na brak możliwości jej naniesienia na powierzchnię pionową, była ta opracowana na podstawie składów 25 i 10. Wyniki oceny technologiczności zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych zobrazowano na rysunku 5.8.



RYS. 5.8. Technologiczność zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Zestawienie wyników badań cech fizycznych podano w tabeli 5.7.

TABELA 5.7. Badania cech fizycznych zapraw z dodatkiem biowęgla

Nr mieszanki	Wyniki badań cech fizycznych zaprawy					
	konsystencja (penetrometr) [cm]	nasiąkliwość [%]	podciąganie kapilarne [%]	prędkość wysychania [doby]	faktura powierzchni [pkt]	tech. zaprawy [pkt]
1	2,0	12,20	6,00	5,60	3	2
3	2,3	16,67	10,90	8,77	1	1
6	2,1	13,50	8,93	6,90	3	2
7	2,1	15,59	9,69	7,46	3	1
8	2,1	16,22	10,32	8,09	2	1
10	2,2	17,12	11,22	8,99	1	0
11	2,2	14,30	8,40	6,80	4	3
12	1,9	14,90	9,00	7,12	3	2
13	2,1	15,33	9,43	7,33	3	2
14	1,9	13,60	7,70	6,40	4	3

Nr mieszanki	Wyniki badań cech fizycznych zaprawy					
	konsystencja (penetrometr) [cm]	nasiąkliwość [%]	podciąganie kapilarne [%]	prędkość wysychania [doby]	faktura powierzchni [pkt]	tech. zaprawy [pkt]
15	2,2	14,23	8,33	6,60	3	2
16	2,3	15,07	9,17	7,20	3	2
17	**1,8**	**11,07**	**5,17**	**5,20**	**4**	**4**
18	2,3	11,97	6,07	5,60	4	4
19	2,1	12,40	6,50	5,80	3	3
20	**2,1**	**11,90**	**5,30**	**5,40**	**3**	**4**
21	2,2	13,90	8,35	6,70	3	4
22	2,3	14,00	8,90	7,10	3	3
23	2,4	13,80	8,20	6,60	2	2
25	2,4	16,00	10,23	8,10	1	0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Kolejnym znaczącym badaniem w projektowaniu zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla jest oznaczenie gęstości objętościowej świeżej i stwardniałej zaprawy. W tabeli 5.8 zestawiono osiągnięte wartości ww. gęstości. W II etapie przeprowadzono badania dla mieszanek nr 11÷19.

TABELA 5.8. Gęstości zaprawy wraz z podanymi współczynnikami w/c, b/c

Nr mieszanki	Oznaczenie gęstości objętościowej świeżej i stwardniałej zaprawy			
	gęstość objętościowa świeżej zaprawy [g/cm^3]	gęstość objętościowa stwardniałej zaprawy [g/cm^3]	w/c	b/c
12	1746,54	1604,55	1,74	0,27
13	1670,51	1523,63	2,40	0,43
14	1817,97	1690,11	1,01	0,11
15	1723,50	1578,40	1,63	0,24
16	1663,59	1523,04	2,44	0,41
17	**1850,23**	**1734,54**	**1,42**	**0,12**
18	1797,24	1656,41	1,64	0,25
19	1723,50	1583,62	2,90	0,40

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Gęstość objętościowa świeżej zaprawy wahała się od 1663,59 do 1850,23 g/cm^3. Największą osiągnęła mieszanka nr 17, jako jedyna miała wynik powyżej 1800,00 g/cm^3. Z kolei gęstość wysuszonej stwardniałej zaprawy była określana jako iloraz jej masy

w stanie wysuszonym w suszarce i objętości, którą próbka zajmuje w stanie nasyconym podczas zanurzenia w wodzie. W tym przypadku największą gęstość osiągnęła mieszanka nr 17, która jako jedyna uzyskała wynik powyżej 1700,00 g/cm^3.

5.6. Zalecenia praktyczne do projektowania warstw uzupełniających

Aby racjonalnie wykorzystać materiały budowlane, muszą istnieć odpowiednie zależności między wymaganiami w zakresie ich stosowania a właściwościami technologicznymi i użytkowymi. Wykorzystanie materiałów o zaniżonych właściwościach w stosunku do wymagań jest błędem technicznym, o zawyżonych natomiast błędem ekonomicznym. Realizacja powyższej zasady odpowiedniości wymagań i właściwości w odniesieniu do materiałów budowlanych sprowadza się do ich trafnego wyboru, a przede wszystkim formułowania zaleceń do warunków ich użytkowania. Przy wyborze składu mieszanki zaprawy uzupełniającej należy:

- stosować nieciągłą granulometrię w celu zapewnienia optymalnego zagęszczenia układu ziaren,
- stworzyć jak najwięcej porów kapilarnych i kontrakcyjnych na granicy styku z materiałem konstrukcyjnym w warstwie uzupełniającej,
- zachować cienko-porowatą strukturę materiału uzupełniającego, która będzie zawierać kuliste pustki stworzone poprzez napowietrzanie (w celu podwyższenia mrozoodporności).

Do najważniejszych czynników regulujących mikrostrukturę można zaliczyć w/c oraz c/k. Zmieniając jednak tylko te parametry, nie jest możliwe uzyskanie składu uzupełniającego, który zapewni wszystkie wymagania.

Do otrzymania składów naprawczych zapewniających wymagane właściwości w najwyższym stopniu zaleca się wprowadzenie do mieszanki specjalnych porokształtujących dodatków. We współczesnej technologii materiałów budowlanych jest to efektywna metoda kształtowania struktury. Niestety z powodu braku informacji o dozowaniu tych dodatków i trudności prognozowania właściwości takich materiałów w każdym konkretnym przypadku należy w sposób eksperymentalny określić optymalną ilość tych dodatków. W wyniku analizy literatury do podstawowych charakterystyk określających właściwości materiałów uzupełniających wytypowano [10÷13, 34, 45, 68, 70]:

- wytrzymałość na ściskanie,
- porowatość,
- nasiąkliwość,
- paroprzepuszczalność,
- wilgotność sorpcyjną,

- prędkość podciągania kapilarnego,
- prędkość wysychania,
- sole i mrozoodporność oraz odkształcalność.

Poza tym materiały uzupełniające powinny być technologiczne z punktu widzenia ich przygotowania i naniesienia na powierzchnię restaurowaną, a także mieć zgodność faktury powierzchni z materiałem macierzystym. Z powyższych charakterystyk materiałów naprawczych zostały wydzielone **dwie grupy cech**.

Do pierwszej przypisano zależności fizyko-mechaniczne i cieplne, takie jak: prędkość podciągania kapilarnego, prędkość wysychania, nasiąkliwość, wytrzymałość na ściskanie oraz współczynnik przewodzenia ciepła λ. Istniejące metody badań pozwalają w krótkim czasie określić wartości wyżej wymienionych charakterystyk na tych samych próbach. Do tej grupy włączono również kwestie dotyczące faktury, technologii przygotowania i naniesienia na restaurowaną powierzchnię. Pogłębienie wiedzy na temat właściwości materiałów uzupełniających jest celowe i dotyczy pierwszego etapu badań. Jeżeli którykolwiek materiał przeznaczony do prac remontowych jest niezgodny z restaurowanym, to dalsze jego badanie staje się niecelowe.

Do drugiej grupy charakterystyk przydzielono: wilgotność sorpcyjną, paroprzepuszczalność, porowatość, wskaźnik odkształcalności, a także **warunki zdrowotne**. Badanie tych zależności jest bardzo pracochłonne i długotrwałe oraz wymaga dużej ilości powtórzeń, jak też specjalistycznych stanowisk badawczych. Dlatego przeprowadza się je w drugim etapie i tylko dla materiałów wyselekcjonowanych z etapu pierwszego.

Wszystkie prace związane z usuwaniem korozji i wymianą uszkodzonych elementów na nowe należy wykonać po uzyskaniu zgody konserwatora zabytków. Zgodnie z przepisami prawa budowlanego budynek raz w roku powinien być poddawany okresowej kontroli stanu technicznego, a raz na pięć lat trzeba dokonać przeglądu stanu sprawności technicznej.

6. Wpływ zastosowanych warstw uzupełniających na stan cieplno-wilgotnościowy oraz mykologiczny przegród budynków zabytkowych

W wyniku przeprowadzonych analiz w latach 2018–2019 do dalszych prac badawczych mających na celu zabezpieczenie ścian murowych budynków zabytkowych warstwą uzupełniającą z dodatkiem biowęgla wytypowano dwa obiekty – Zamek Biskupi i kościół pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim. Przegrody wyżej wymienionych budynków zostały porażone przez grzyby pleśniowe. Pomieszczeniami, w których wykonywano badania, były hydrofornia w Zamku Biskupim oraz przedsionek w kościele. Mieszanka cementowa o składzie i właściwościach przedstawionych w podrozdziale 5.4 charakteryzowała się optymalnymi cechami technicznymi, w tym cieplno-wilgotnościowymi, i została zastosowana jako warstwa uzupełniająca ścian murowych wyżej wymienionych pomieszczeń. W pierwszym etapie prac historyczną spoinę skuto na głębokość 15 cm w głąb muru, w drugim zaś dokładnie oczyszczono bruzdy, a następnie je uzupełniono kompozytem z biowęglem. Badania termowizyjne przeprowadzono po dwóch miesiącach od zakończenia prac, mykologiczne natomiast po czterech.

W podrozdziałach 6.1 oraz 6.3 przedstawiono analizę wyników jednorodności cieplnej ścian murowych uzyskanych przy użyciu kamery termowizyjnej, a także przedstawiono wyniki z przeprowadzonych kontroli stanu mykologicznego. Stan cieplno-wilgotnościowy pomieszczeń poddanych renowacji był monitorowany czujnikami cieplno-wilgotnościowymi marki EFENTO. Na starzenie się materiałów konstrukcyjnych ścian murowych wpływ wywiera długotrwałe oddziaływanie otaczającego je środowiska, zwłaszcza w postaci czynników fizycznych odnoszących się do zjawisk klimatycznych. Czujniki odczytują średnią miesięczną wartość temperatury i wilgotności utrzymującej się w pomieszczeniu. Średnia temperatura powietrza w hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem zaprawy cementowej z biowęglem wynosiła 23,6°C, wilgotność względna powietrza natomiast ≈ 39%. Z kolei po użyciu zaprawy średnia temperatura wzrosła o 2,8°C i utrzymywała się na poziomie 26,4°C, a wilgotność względna powietrza wynosiła 48%. Przy interpretacji wyników raportów zwrócono szczególną uwagę na fakt, że osiągnięte wartości są zależne w dużym stopniu od zewnętrznych warunków pogodowych. Po ocenie stanu technicznego

murowanych ścian wytypowanych budynków zabytkowych stwierdzono ich **podwyższone zawilgocenie**.

Przeprowadzone pomiary wykazały średnie zawilgocenie ścian wewnętrznych – w Zamku Biskupim 11% dla cegły, 9% dla spoiny, w kościele pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim natomiast 13% dla cegły, 12% dla spoiny, co świadczy także o **silnym zawilgoceniu cegieł i spoin**.

6.1. Analiza wyników jednorodności cieplnej ścian murowych uzyskanych przy użyciu kamery termowizyjnej

W celu kontroli jednorodności cieplnej ścian murowych po zastosowaniu warstwy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla przeprowadzono badania termowizyjne ścian murowych Zamku Biskupiego oraz kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim, zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale 4.3. Obrazy termalne wykonane były w zbliżonym zakresie temperaturowym. Przyjęto wartość współczynnika emisyjności na poziomie $\varepsilon = 0{,}95$. Na rysunkach 6.1–6.4 przedstawiono wyniki pomiarów termowizyjnych przeprowadzonych w Zamku Biskupim, w dalszej części podrozdziału zaś zamieszczono analizę pól temperatur z powyższej świątyni (rys. 6.5, 6.6).

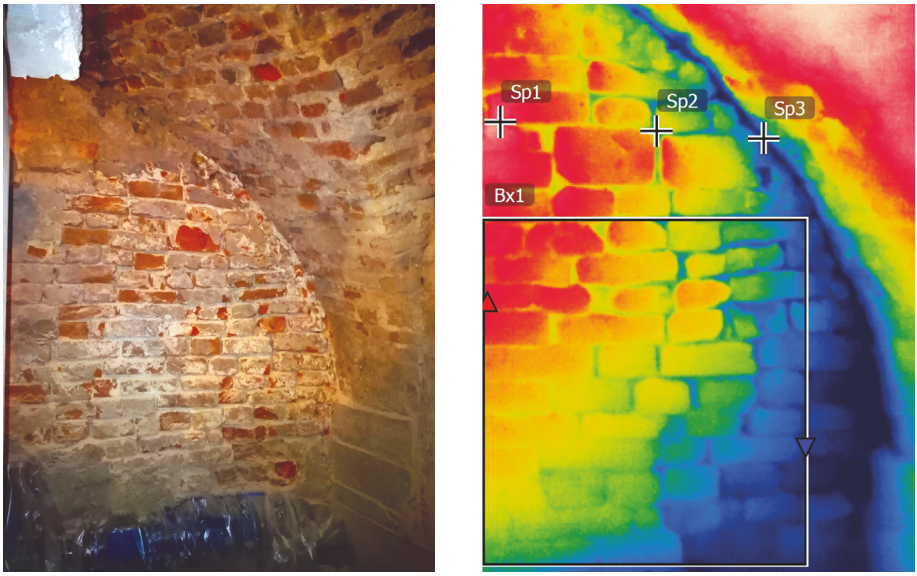
Jeśli chodzi o pomiary w Zamku Biskupim, to wykonano je przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, przy parametrach powietrza zewnętrznego –1°C i wewnętrznego 28°C, oraz po zakończeniu prac restauracyjnych, przy parametrach powietrza zewnętrznego 3°C i wewnętrznego 28°C. W przypadku kościoła pw. św. Jana Chrzciciela pomiary przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej przeprowadzono przy parametrach powietrza zewnętrznego 0°C i wewnętrznego 19°C oraz po zakończeniu prac restauracyjnych, przy parametrach powietrza zewnętrznego 1°C i wewnętrznego 22°C.

Na rysunkach 6.1 i 6.2 przedstawiono cyfrowe i termograficzne obrazy (wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi) fragmentu zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej i po jej użyciu. Porównując ściany murowe podczas pomiarów, zaobserwowano, że po dodaniu zaprawy z biowęglem wzrosła ich jednorodność cieplna. Rozkład temperatury w badanym obszarze muru przed zastosowaniem ww. zaprawy przedstawiał się następująco – Bx1.min. = 26,5°C, Bx1.max. = 31,3°C. Różnica granicznych temperatur wyniosła 4,8°C. Rozkład temperatury w pozostałych punktach kształtował się następująco: Sp.1 = 31,1°C, Sp.2 = 29,8°C, Sp.3 = 27,5°C.

Pomiary pól temperatur ścian murowych po zastosowaniu mieszanki cementowej z dodatkiem biowęgla wykazały podobny jak wyżej rozkład temperatur w badanym obszarze – Bx1.min. = 29,7°C, Bx1.max. = 32,3°C. W pozostałych punktach (po zastosowaniu warstwy uzupełniającej) zanotowano następujące temperatury: Sp.1 = 32,2°C,

Sp.2 = 31,8°C, Sp.3 = 30,7°C, utrzymujące tendencję spadkową od środka pomieszczenia do ściany nośnej.

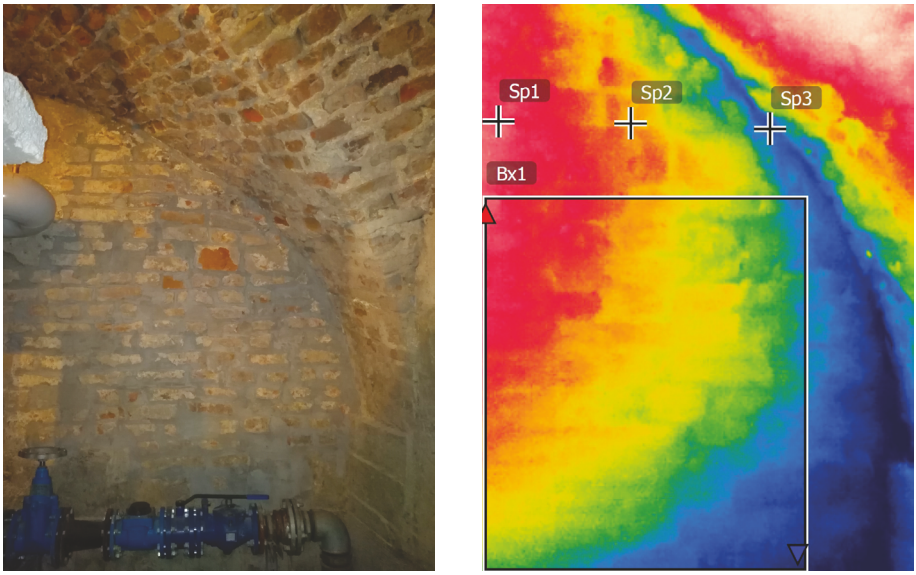
Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że wpływ mostków termicznych zauważalnie się zmniejszył. Podobnie jak w przypadku zachodniej strony muru, na rysunkach 6.3 i 6.4 przedstawiono cyfrowe i termograficzne obrazy (wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi) wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej i po jej użyciu. Podczas pomiarów w pomieszczeniu zaobserwowano, że zwiększyła się jednorodność ścian murowych w porównaniu z murami przed dodaniem zaprawy z biowęglem. Rozkład temperatury w badanym obszarze muru przed zastosowaniem mieszanki cementowej przedstawiał się następująco – Bx1.min. = 23,8°C, Bx1.max. = 29,3°C. Różnica granicznych temperatur w wyniosła 5,5°C. W pozostałych natomiast punktach zanotowano następujące temperatury: Sp.1 = 28,8°C, Sp.2 = 26,4°C, Sp.3 = 24,5°C.



RYS. 6.1. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom −2

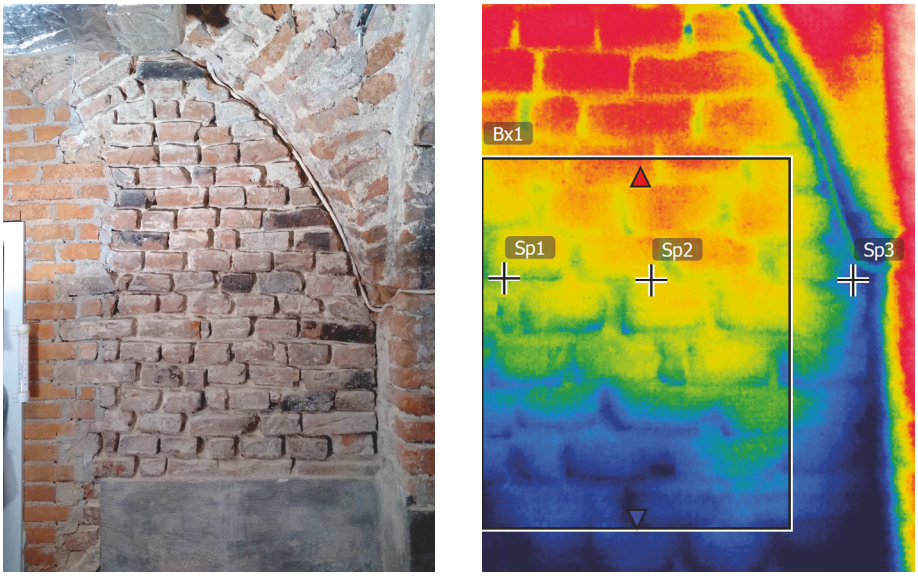
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Po zastosowaniu mieszanki cementowej z dodatkiem biowęgla **również przeprowadzono pomiary termowizyjne**, które wykazały podobny jak wyżej rozkład temperatury – Bx1.min. = 31,8°C, Bx1.max. = 33,6°C (różnica granicznych temperatur w badanym obszarze wyniosła 1,8°C). W pozostałych punktach rozkład ten przedstawiał się następująco: Sp.1 = 33,1°C, Sp.2 = 33,3°C, Sp.3 = 32,2°C. Wpływ mostków termicznych został więc zauważalnie zmniejszony.



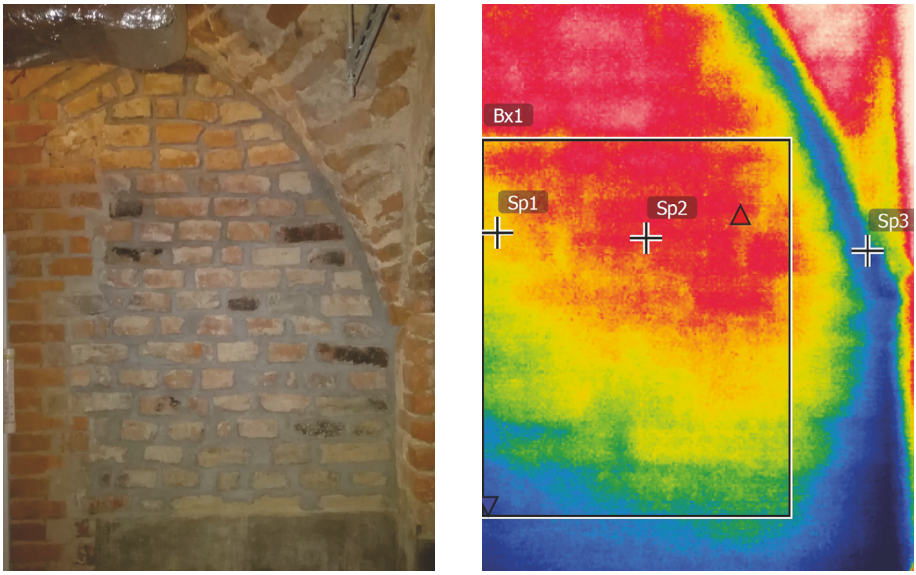
RYS. 6.2. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom –2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.



RYS. 6.3. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom –2

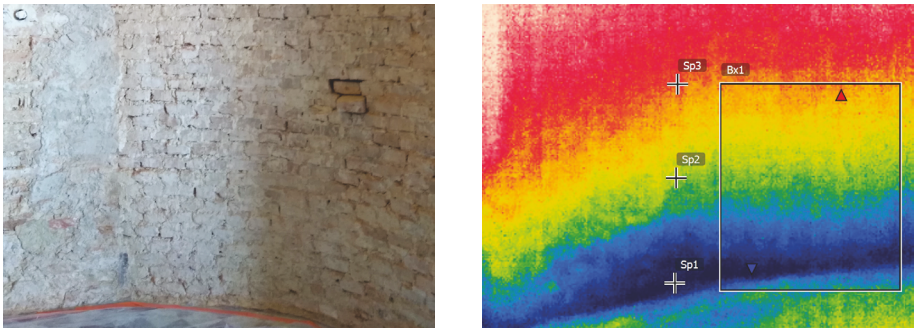
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.



RYS. 6.4. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom −2

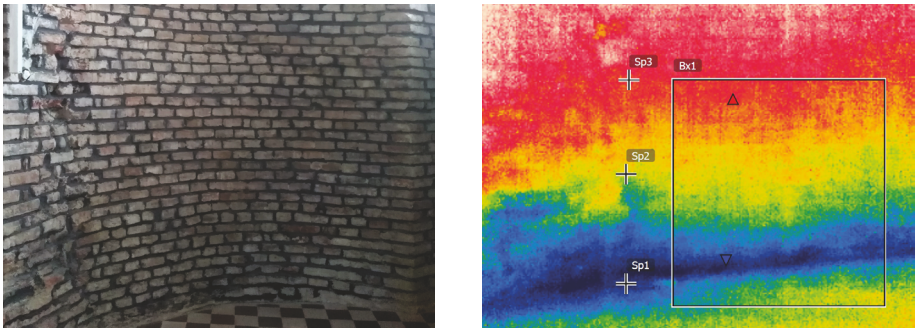
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów termowizyjnych przeprowadzonych w kościele pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim. Na rysunkach 6.5 i 6.6 zaprezentowano cyfrowe i termograficzne obrazy (wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi) fragmentu wschodniego muru przedsionka **świątyni** przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej i po jej użyciu.



RYS. 6.5. Cyfrowy i termograficzny obraz wschodniego muru przedsionka kościoła pw. św. Jana Chrzciciela przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom 0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.



RYS. 6.6. Cyfrowy i termograficzny obraz wschodniego muru przedsionka kościoła pw. św. Jana Chrzciciela po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom 0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Podczas pomiarów w pomieszczeniu zaobserwowano, że w murach z zaprawą z dodatkiem biowęgla wzrosła jednorodność cieplna. Rozkład temperatury w badanym obszarze muru przed zastosowaniem tej zaprawy przedstawiał się następująco – Bx1.min. = 18,1°C, Bx1.max. = 19,9°C. Różnica granicznych temperatur wyniosła 1,8°C. Z kolei w pozostałych punktach zanotowano następujące temperatury: Sp.1 = 18,3°C, Sp.2 = 19,3°C, Sp.3 = 20,0°C. Po użyciu warstwy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla w badanym obszarze wykonano termogramy ścian murowych, które wykazały podobne jak wyżej wartości temperatur – Bx1.min. = 18,6°C, Bx1.max. = 20,2°C. Rozkład temperatury w pozostałych punktach przedstawiał się następująco: Sp.1 = 18,9°C, Sp.2 = 19,7°C, Sp.3 = 20,0°C. Wyniki analizy pól temperatur ścian murowych Zamku Biskupiego oraz kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim przed zastosowaniem mieszanki z biowęglem i po jej użyciu zamieszczono w tabeli 6.1.

TABELA 6.1. Rozkłady temperatur w ścianach murowych badanych obiektów zabytkowych przed zastosowaniem zaprawy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla oraz po jej użyciu [°C]

Termogram/ pkt pomiarowy		Rys. 6.1	Rys. 6.2	Różnica	Rys. 6.3	Rys. 6.4	Różnica	Rys. 6.5	Rys. 6.6	Różnica
Sp1		31,1	32,2	1,1	28,8	33,1	4,3	18,3	18,9	0,6
Sp2		29,8	31,8	2,0	26,4	33,3	6,9	19,3	19,7	0,4
Sp3		27,5	30,7	3,2	24,5	32,2	7,7	19,7	20,0	0,3
Bx1	min.	26,5	29,7	3,2	23,8	31,8	8,0	18,1	18,6	0,5
	max.	31,3	32,3	1,0	29,3	33,6	4,3	19,9	20,2	0,3

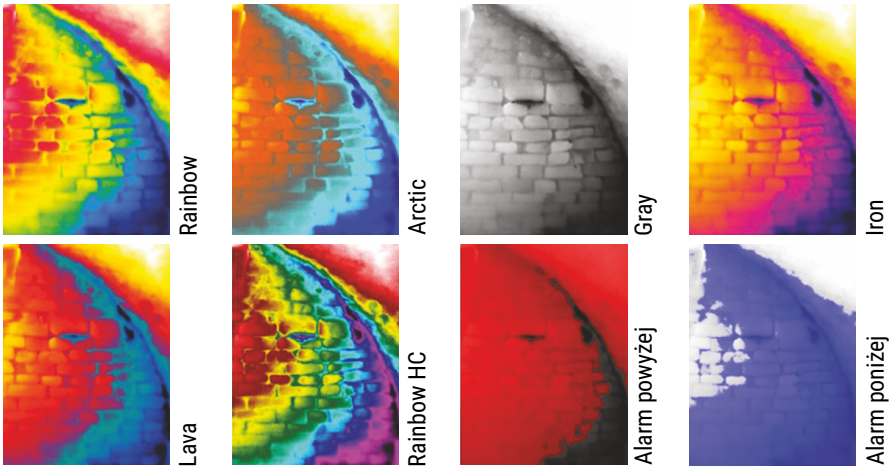
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Średnia różnica temperatury na powierzchni zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej z biowęglem oraz po jej użyciu w badanych punktach wyniosła dla Sp.1 = 1,1°C; Sp.2 = 2,0°C;

Sp.3 = 3,2°C; Bx1.min. = 3,2°C; Bx1.max. = 1,0°C. Jeśli zaś chodzi o powierzchnię wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego, średnia różnica temperatury kształtowała się następująco: Sp.1 = 4,3°C; Sp.2 = 6,9°C; Sp.3 = 7,7°C; Bx1.min. = 8,0°C; Bx1.max. = 4,3°C. Z kolei średnia różnica temperatury przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej z biowęglem i po jej użyciu w badanych punktach powierzchni wschodniego muru przedsionka kościoła pw. św. Jana Chrzciciela wynosiła: Sp.1 = 0,6°C; Sp.2 = 0,4°C; Sp.3 = 0,3°C; Bx1.min. = 0,5°C; Bx1.max. = 0,3°C. Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że jednorodność cieplna ścian murowych po zastosowaniu warstwy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla zwiększyła się, a temperatura w badanych punktach wzrosła.

6.2. Pomiary termowizyjne – zestawienie filtrów korekcyjnych

W badaniach diagnostycznych przegród wykorzystujących kamerę termowizyjną można dobrać optymalne filtry korekcyjne umożliwiające w skuteczniejszym stopniu wykrywanie miejsc z anomaliami termicznymi. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów termowizyjnych, analizy termogramów oraz obserwacji istnieje możliwość wyboru filtra korekcyjnego podczerwieni do efektywniejszej lokalizacji mikromostków cieplnych, zawilgoceń oraz zasoleń w niejednorodnych przegrodach. Analizę porównawczą filtrów korekcyjnych na przykładzie badanej przegrody Zamku Biskupiego w Janowie Podlaskim przedstawiono na rysunku 6.7.



RYS. 6.7. Analiza porównawcza filtrów korekcyjnych na przykładzie badanej przegrody Zamku Biskupiego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Porównano osiem z dwunastu dostępnych filtrów korekcyjnych programu Flir Tools, tj.: Rainbow, Arctic, Gray, Iron, Lava, Rainbow HC, Alarm powyżej i Alarm poniżej. Filtry różniły się od siebie kolorem i odcieniem obrazu odczytu temperatury.

Najskuteczniejszy okazał się filtr *Rainbow*, charakteryzujący się obrazowaniem odczytu temperatury w czterech ciepłych kolorach: białym, czerwonym, pomarańczowym i żółtym, a także jednym zimnym i jego odcieniach – niebieskim. W odróżnieniu od pozostałych filtrów korekcyjnych we współpracy z kamerą termowizyjną ten charakteryzował się najwyższym poziomem ostrości. W przedstawionych pomiarach termowizyjnych autorzy zastosowali zaproponowany przez nich filtr, uzyskując w ten sposób czytelniejsze wyniki.

6.3. Kontrola stanu mykologicznego pomieszczeń poddanych renowacji

Po zastosowaniu warstwy uzupełniającej w analizowanych budynkach zabytkowych, czyli Zamku Biskupim i świątyni pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim, skontrolowano stan mykologiczny wybranych pomieszczeń celem oceny zanieczyszczenia mykologicznego ścian murowych i powietrza. Badania te przeprowadzono po czterech miesiącach od zakończenia prac renowacyjnych, co według literatury z danego zakresu jest adekwatnym czasem do rozwoju grzybni, który wynosi około trzech–sześciu tygodni [3, 10÷13].

W badanych pomieszczeniach budynków zabytkowych stężenie mikroorganizmów w powietrzu było poniżej norm proponowanych przez Dutkiewicza i Górnego [14], wynosiło 200 jtk/100 cm^3 dla grzybów pleśniowych, co oznacza brak wpływu zidentyfikowanych mikroorganizmów na zdrowie ludzi. Jeśli chodzi o Zamek Biskupi, to przed zastosowaniem zaprawy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla średnia liczba drobnoustrojów wyizolowanych w badanej przegrodzie wyniosła 61 jtk/100 cm^3 na podłożu MEA, a po użyciu tej zaprawy zmniejszyła się o blisko 70% i wyniosła około 20 jtk/100 cm^3.

Przeprowadzone analizy mykologiczne wykazały, że zidentyfikowana mikroflora pleśniowa badanych budynków zabytkowych pod względem jakościowym jest zasadniczo zgodna, zarówno w zamku, jak i świątyni. Zidentyfikowano siedem rodzajów grzybów pleśniowych, nie stwierdzono widocznego zróżnicowania ich gatunków: *Acremonium sp.*, *Alternaria sp.*, *Aspergillus sp.*, *Cladosporium sp.*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Verticillium sp.* Do najczęściej oznaczanych rodzajów grzybów pleśniowych należały *Alternaria sp.*, *Aspergillus sp.*, *Cladosporium sp.* i *Penicillium sp.*

Dokładne informacje dotyczące wyników otrzymanych ocen rodzajów grzybów pleśniowych oraz dokładne wartości ogólnej liczby wyizolowanych mikroorganizmów z przegród badanych obiektów zabytkowych przed zastosowaniem zaprawy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla i po jej użyciu **są przedmiotem odrębnego opracowania**.

Kierunki dalszych badań

Poznane w procesie badań właściwości otrzymanej zaprawy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla zwracają uwagę na dwie główne prawidłowości. Ten innowacyjny surowiec powstający w procesie pirolizy biomasy charakteryzuje się niską przewodnością cieplną, a także zdolnością do absorpcji wody do pięciu razy większej niż ciężar własny, co w konsekwencji daje większą odporność na wilgoć.

Na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy, wyciągniętych wniosków z otrzymanych wyników badań zarówno teoretycznych, jak i empirycznych można sformułować główne kierunki rozwoju dalszych prac, które dotyczyłyby **usprawnienia technologii izolacji przeciwwilgociowych budynków zabytkowych oraz projakościowych badań mikrobiologicznych**.

Literatura

1. Barabasz W., Jaśkowska M., *Aspekty zdrowotno-toksykologiczne występowania grzybów pleśniowych w budynkach mieszkalnych i inwentarskich*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych", Łódź 2001.
2. Bennett J.W., Klich M., *Mycotoxins*, „Clinical Microbiology Review" 16, 2003.
3. Borusiewicz W., *Konserwacja zabytków budownictwa murowanego*, Arkady, Warszawa 1985.
4. Casteel S.W., Rottinghaus G.E., *Mycotoxicoses* [w:] J. Lederberg (red.), *Encyclopedia Microbiology*, Academic Press, San Diego, California 2000.
5. Chełkowski J., *Mikotoksyny, grzyby toksynotwórcze i mikotoksykozy*, Instytut Genetyki Roślin, PAN, Poznań 2010.
6. Chrzanowski K., *Testing thermal imagers. Practical guide*, Military University of Technology Warsaw, Poland 2010.
7. Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., *Chemia w budownictwie*, Arkady, Warszawa 2010.
8. De Hoog G.S., Guarro J., Gené J., Figueras M.J., *Atlas of clinical fungi*, 2nd ed., Centraalbureau voor Schimmelcultures, The Netherlands 2000.
9. Doleżal M., *Grzyby pleśniowe w budownictwie a zdrowotność pomieszczeń*, „Biuletyn Informacyjny: Użytkowanie, Konstrukcje, Remonty" 1–2, 1989.
10. Domasłowski W., *Spoinowanie murów ceglanych*, „Renowacje" 4, 1999.
11. Domasłowski W., *Zasady konserwacji murów ceglanych i kamiennych detali architektonicznych*, „Ochrona Zabytków" 1, 2005.
12. Domasłowski W., Kęsy-Lewandowska M., Łukaszewicz J., *Badania nad konserwacją murów ceglanych*, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń 1998.
13. Domasłowski W., Łukaszewicz J., *Problemy konserwacji murów ceglanych*, „Ochrona Zabytków" 49, 1996, 4.
14. Dutkiewicz J., Górny R.L., *Biologiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia – klasyfikacja i kryteria oceny narażenia*, „Medycyna Pracy" 53, 2020, 1.
15. Dudzińska B., *W Janowie u Jana Chrzciciela*, Fundacja „Ratujmy Zabytki Janowa Podlaskiego", Janów Podlaski 2018.
16. Fadel R., David B., Paris S., Guesdon J.L., *Alternaria spore and mycelium sensitivity in allergic patients: in vivo and in vitro studies*, „Annals of Allergy, Asthma and Immunology" 69, 1992, 4.
17. Fadel R., Paris S., Fitting C., Rassemont R., David B., *A comparison of extracts from Alternaria spores and mycelium*, „Journal of Allergy and Clinical Immunology" 77, 1986.

18. Fassatiová O., *Grzyby mikroskopowe w mikrobiologii technicznej*, tłum. H. Oberman, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
19. Fidali M., *Metodyka termograficznej diagnostyki obiektów technicznych*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Gliwice 2013.
20. Fink-Gremmels J., *Mycotoxins* [w:] J.P.F. D'Mello, C.M. Duffus, J.H. Duffus, *Toxic substances in crop plants*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge 1991.
21. Flannigan B., *Microbial aerosols in buildings: origin, health implications and controls*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych", Łódź 2001.
22. Flannigan B., Samson R.A, Miller J.D., *Microorganisms in home and indoor work environments*, Taylor&Francis, London–New York 2001.
23. Frössel F., *Osuszanie murów i renowacja piwnic*, tłum. P. Otawski, Oficyna Wydawnicza POLCEN, Warszawa 2007.
24. Garcia B.E., Comtois P., Borrego P.C., *Fungal content of air samples from asthmatic childrens' homes in Mexico City*, „Aerobiologia" 11, 1995.
25. Goldstein J., Newbury D.E., Joy D.C., Lyman C.E., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L., Michael J., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Springer-Verlag, Berlin 2003.
26. Górny R.L., *Aerozole biologiczne – rola normatywów higienicznych w ochronie środowiska i zdrowia*, V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych", Łódź 2009.
27. Górny R.L., *Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air – a review*, „Annals of Agricultural and Environmental Medicine" 11, 2004, 2.
28. Górny R.L., Reponen T., Willeke K., Schmechel D., Robine E., Boissier M., Grinshpun S.A., *Fungal fragment as indoor biocontaminants*, „Applied and Environmental Microbiology" 68, 2020.
29. Grajewski J.J., *Mikotoksyny i grzyby pleśniowe – zagrożenie dla człowieka i zwierząt*, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2006.
30. Hoła J., Hoła B., *Skutki długotrwał*ego zawilgocenia ścian z cegły, „Materiały Budowlane" 6, 2001.
31. Ickiewicz I., Koda P., *The influence of the environment on objects of historical value*, „Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture" 35, 2018, 65.
32. Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J., *Fizyka budowli: wybrane zagadnienia*, Politechnika Białostocka, Białystok 2000.
33. Iwasaki T., Matsuno K., Yamamoto M., Kawahata D., Keino H., *Penicillium endophthalmitis is necrotizing scleritis treated with topical corticosteroid and cyclosporin A*, „Japanese Journal of Ophthalmology" 52, 2008, 6.
34. Janowski Z., *Metody i materiały stosowane do napraw tradycyjnych konstrukcji murowych*, XIII ogólnopolska konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji", Ustroń 1999.
35. Janowski Z., *Nośność i trwałość konstrukcji murowych w obiektach zabytkowych*, IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynieryjne problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych", Kraków 1999.
36. Jarmontowicz R., *Uszkodzenia konstrukcji murowych wywołane korozją elementów ceramicznych*, „Materiały Budowlane" 4, 1999.

37. Jarmontowicz A., Krzywobłocka-Laurów R., *Skład zapraw w murach obronnych Starego Miasta w Warszawie*, „Ochrona Zabytków" 4, 1996.
38. Jarvis B.B., Hinkley S.F., Nielsen K.F., *Stachybotrys: An unusual mold associated with water-damaged buildings*, „Mycotoxin Research" 16, 2000.
39. Jaworski J., *Termografia budynków*, DWE, Wrocław 2000.
40. Jussila J., Komulainen H., Kosma V.M., Pelkonen J., Hirvonen M.R., *Inflammatory potential of the spores of Penicillium spinulosum isolated from indoor air of moisture-damaged building in mouse lungs*, „Environmental Toxicology and Pharmacology" 12, 2002, 3.
41. Kaczmarek A., Wesołowska M., Pawłowski K., *Jaki wpływ na wybrane materiały budowlane mają woda i wilgoć?*, „Izolacje" 7–8, 2010.
42. Kamiński K., *Problemy z zastosowaniem współczesnych cegieł ceramicznych do naprawy zabytkowych murów ceglanych*, „Materiały Budowlane" 11, 2004.
43. Kelsall R.W., Hamley I.W., Geoghegan M. (red.), *Nanotechnologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
44. Konca P., Maćkowiak A., Koniorczyk M., *Tynki renowacyjne jako ochrona murów przed zniszczeniem wskutek krystalizacji soli*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury" 33, 2016, 63.
45. Koprowicz R., *Technologia zapraw w pracach renowacyjnych obiektów ceglanych Torunia*, „Renowacje" 1, 2001.
46. Kosińska I., *Grzyby w powietrzu pomieszczeń a zagrożenie zdrowotne*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.
47. Kozłowski R., *Ochrona elewacji ceglanych przed zniszczeniem*, „Renowacje" 1, 1998.
48. Król M., *Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych*, „Przegląd Budowlany" 3, 2009.
49. Król M., Kondratczyk A., Tur W., *Przykłady napraw i wzmocnień konstrukcji budowlanych betonem ekspansywnym*, Politechnika Lubelska, Lublin 2009.
50. Krzyściak P., Skóra M., Macura A.B., *Atlas grzybów chorobotwórczych człowieka*, Medpharm Polska, Warszawa 2010.
51. Kurup V.P., Shen H.D., Vijay H., *Immunobiology of fungal allergens*, „International Archives of Allergy and Immunology" 129, 2002.
52. Lehmann J., *Zagrożenia zabytków przez skażenia środowiska*, „Ochrona Zabytków" 51, 1998, 1.
53. Lichołai L., *Budownictwo ogólne*, t. 3: *Elementy budynków. Podstawy projektowania*, Arkady, Warszawa 2010.
54. Linczowski C., *Trwałość, ochrona i eksploatacja budowli*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1992.
55. Lipiec A., *Grzyby – istotny alergen środowiskowy*, „Alergia" 3, 2001.
56. Maćkowski R., Buczek T., *Szkodliwe działanie siarczanu wapniowego w wyrobach ceramiki budowlanej*, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Trwałość Budowli i Ochrona przed Korozją", Warszawa–Zakopane 2002.
57. Nabrdalik M., Latała A., *Występowanie grzybów strzępkowych w obiektach budowlanych*, „Roczniki PZH" 54, 2003, 1.

58. Naukowo-Techniczny Zespół WTA dla konserwacji Budowli i Zabytków Architektury, *Instrukcja wg WTA*, „Renowacje" 3, 2000.
59. Orłowski Z., Rawicki K., *Analiza przyczyn uszkodzeń* murów w obiektach zabytkowych, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Budownictwo Sakralne i Monumentalne", Białystok 2002.
60. Pierzchlewicz J., Jarmontowicz R., *Budynki murowane – materiały i konstrukcje*, Arkady, Warszawa 1996.
61. Piontek M., *Grzyby pleśniowe i ocena zagrożenia mikotoksycznego w budownictwie mieszkaniowym*, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2004.
62. Polski G., *Techniki i materiały stosowane do napraw murowanych zabytków budownictwa sakralnego*, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Budownictwo Sakralne", Białystok 1998.
63. Rudziński L., *Konstrukcje murowe. Remonty i wzmocnienia*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010
64. Samson R.A., Hoekstra E.S., Frisvad J.C., Filtenborg O., *Introduction to food and air borne fungi*, Centraalbureau voor schimmelcultures, Utrecht 2000.
65. Sciortino C.V., *Atlas of Clinically Important Fungi*, Wiley Blackwell, New Jersey 2017.
66. Seo S.C., Grinshpun S.A., Iossifova Y., Schmechel D., Rao C., Reponen T., *A new field--compatible methodology for the collection and analysis of fungal fragments*, „Aerosol Science and Technology" 41, 2007.
67. Siegel R., Howell J., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere 1992.
68. Skibiński S., *Stan obecny i perspektywy technologicznej konserwacji kamiennych i ceglanych obiektów zabytkowych*, IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynieryjne problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych", Kraków 1998.
69. Sobolewski M., Prekiel K., *Możliwości badawcze materiałów izolacyjnych w aparacie płytowym na przykładzie polistyrenu ekstrudowanego*, „Czasopismo Techniczne. Budownictwo" 109, 2012, 3.
70. Stępień P., *Technologia budowlana a technologia konserwatorska*, „Renowacje" 1, 1998.
71. Tajchman J., *Konserwacja zabytków architektury – uwagi o metodzie*, „Ochrona Zabytków" 48, 1995, 2.
72. Tokarski D., *Analiza ryzyka w aspekcie czasu oraz kosztu realizacji procesu wzmacniania fundamentów obiektów zabytkowych w ujęciu wariantowym*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe" 18, 2017, 12.
73. Tokarski D., Zegardło B., Ogrodnik P., Woliński P., Adamczewski G., *Analiza możliwości zastosowania nowoczesnej aparatury elektrotechnicznej w postaci kamery termowizyjnej do wykrywania mikromostków cieplnych w budynku*, „Wiadomości Elektrotechniczne" 8, 2017.
74. Ważny J., Karysia J., *Ochrona budynków przed korozją biologiczną*, Arkady, Warszawa 2008.
75. Wesołowska M., *Ochrona murów licowych przed wpływem środowiska*, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2016.
76. Wesołowska M., *Rola zaprawy murarskiej w kształtowaniu integralności muru licowego*, „Izolacje" 3, 2016.

77. Wesołowska M., Kaczmarek A., *Rodzaj zaprawy a estetyka klinkierowych murów licowych*, „Izolacje" 6, 2013.
78. Więcek B., De Mey G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, PAK, Warszawa 2011.
79. Wiszniewska M., Walusiak J., Gutarowska B., Żakowska Z., Pałczyński C., *Grzyby pleśniowe w środowisku komunalnym i w miejscu pracy – istotne zagrożenie zdrowotne*, „Medycyna Pracy" 55, 2004, 3.
80. Woliński P., Woyciechowski P., Jaworska B., Adamczewski G., Tokarski D., Grudniewski T., Chodyka M., Nitychoruk J.A., *The influence of the mineral additives on the carbonation of cement composites*, „MATEC Web Conferences" 196, 2018.
81. Wójcik R., *Izolacje przeciwwodne przyziemia budynków. Metody chemiczne*, „Izolacje" 7–8, 2004.
82. Wójcik R., *Ochrona budynków przed wilgocią i wodą gruntową* [w:] P. Klemm (red.), *Budownictwo ogólne*, t. 2: *Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa 2009.
83. Wyrwał J., Świrska J., *Problemy zawilgocenia przegród budowlanych*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 1998.
84. Zegardło B., Drzymała T., Andrzejuk W., Tokarski D., Nitychoruk J., Jaworska B., *Ceramiczne odpady budowlane powstające w procesie rewitalizacji miasta – badanie możliwości ich wykorzystania jako substytutu cementu do betonów i zapraw*, „Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska" 27, 2018, 4.
85. Zegardło B., Nitychoruk J., Jarosz-Hadam M., Tokarski D., Ogrodnik P., *Analiza wpływu zmienności podstawowych parametrów fizycznych materiałów izolacyjnych na przepływ ciepła przez przegrodę budowlaną*, „SGSP Zeszyty Naukowe" 64, 2017, 4.
86. Żukiewicz-Sobczak W., *The role of fungi in allergic diseases*, „Advances in Dermatology and Allergology" 30, 2013, 1.
87. Żukiewicz-Sobczak W., Cholewa G., *Grzyby pleśniowe i domowe w budynkach po powodzi*, konferencja naukowa „Powódź 2010 – skutki dla człowieka i jego środowiska. Metody ich zwalczania", Lublin 2010.
88. Żukiewicz-Sobczak W., Cholewa G., Sobczak P., Silny W., Nadulski R., Wojtyła-Buciora P., Zagórski J., *Enzymatic activity of fungi isolated from corps*, „Advances in Dermatology and Allergology" 33, 2016, 6.
89. Żukiewicz-Sobczak W., Cholewa G., Sobczak P., Zagórski J., Wojtyła-Buciora P., *Health risks associated with exposure to fungi*, „Agriculture and Agricultural Science Procedia" 7, 2015.
90. Żukiewicz-Sobczak W., Imbor K., *Zagrożenia zdrowotne związane z ekspozycją na grzyby* [w:] W. Skowroński (red.), *Ochrona budynków przed wilgocią, korozją biologiczną i ogniem,* Politechnika Wrocławska, Wrocław 2019.
91. Żukiewicz-Sobczak W., Krasowska E., Zwoliński J., Sobczak P., Chmielewska-Badora J., Wróblewska P., Piątek J., Wojtyła A., *Allergic diseases – current state of knowledge*, „Advances in Dermatology and Allergology" 29, 2012, 6.

Normy i akty ustawodawcze

92. PN-85/B-04500 Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
93. PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu.
94. PN-EN 1015-11:2001 Metody badań zapraw do murów. Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
95. PN-EN 1015-6:2000 Metody badań zapraw do murów. Określenie gęstości objętościowej świeżej zaprawy.
96. PN-EN 1015-9:2001 Metody badań zapraw do murów. Określenie czasu zachowania właściwości roboczych i czasu korekty świeżej zaprawy.
97. PN-EN 12667:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym.
98. PN-EN 1934:1999 Właściwości cieplne budynków. Określanie oporu cieplnego metodą skrzynki grzejnej z użyciem ciepłomierza. Mury.
99. PN-EN 1946-3:2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Pomiary metodą czujników strumienia cieplnego.
100. PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości.
101. PN-EN 197-1:2012 Cement. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
102. PN-ISO 8301:1998 Izolacja cieplna. Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym. Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego.
103. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/WE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
104. Karta charakterystyki produktu sporządzona zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) 015/830 zm. R. (WE) nr 1907/2006 [w:] Klasyfikacja towarowa produktu FLUID, Biowęgiel, GUS Warszawa z dnia 15.05.2008 r.

Źródła internetowe

105. *Cemex Polska, Właściwości cementu CEM I 42,5 R*, strona internetowa, https://www.cemex.pl/cem-i-42-5-r-na.aspx [dostęp: 04.07.2019].
106. *Flir T420bx Thermal Imaging Camera*, strona internetowa, https://www.flir-direct.com/product/flir-t420bx-infrared-camera [dostęp: 12.12.2013].
107. Gładki J., *Biowęgiel szansą dla zrównoważonego rozwoju,* 2019, http://fluid.pl/fileadmin/user_upload/dokumenty/publikacje/Ksiazka_biowegiel_ang.pdf [dostęp: 01.09.2017].
108. *Gmina Janów Podlaski, Historia osady*, strona internetowa, http://www.janowpodlaski.pl/index.php?pid=26 [dostęp: 11.03.2010].
109. Grela M., *Janów Podlaski historia*, strona internetowa, http://www.geotekst.pl/artykuly/historia/janow-podlaski [dostęp: 18.10.2013].
110. *International Biochar Initiative, Building materials and composites*, strona internetowa, https://biochar-international.org/webinars/building-materials-and-composites [dostęp: 23.05.2017].
111. *Rejestratory bezprzewodowe bluetooth low energy, Bezprzewodowy rejestrator temperatury i wilgotności*, strona internetowa, https://efento.pl/product/sensor-temperatury-i--wilgotnosci/ [dostęp: 16.06.2016].
112. Schmidt H.P., *The use of biochar as building material,* strona internetowa, https://www.biochar-journal.org/en/ct/3 [dostęp: 12.05.2014].
113. *Zamek Biskupi w Janowie Podlaskim, Historia*, strona internetowa, http://www.zamekjanowpodlaski.pl/hotel/historia [dostęp: 16.09.2014].

Spis tabel

Tabela 1.1. Gatunki grzybów domowych występujących w budynkach 21

Tabela 1.2. Alergeny grzybów pleśniowych 21

Tabela 3.1. Wymagania dotyczące metod oraz materiałów naprawczych 34

Tabela 4.1. Właściwości cementu CEM I 42,5 R 48

Tabela 4.2. Identyfikacja materiału zastosowanego w badaniach laboratoryjnych 49

Tabela 4.3. Skala oceny zgodności faktury powierzchni 56

Tabela 4.4. Skala oceny technologiczności zaprawy 56

Tabela 4.5. Typy podłoży mikrobiologicznych, ich skład i zastosowanie w badaniach 59

Tabela 5.1. Macierz planu eksperymentu oraz kodowane i naturalne wartości poziomów czynników X_1, X_2, X_3, X_4 65

Tabela 5.2. Zakresy charakterystycznych wartości dla poszczególnych etapów 67

Tabela 5.3. Skład zaprojektowanych zapraw 68

Tabela 5.4. Wyniki uśrednionych pomiarów podstawowych właściwości modyfikowanych mieszanek uzupełniających $\bar{Y}_1$, $\bar{Y}_2$, $\bar{Y}_3$, $\bar{Y}_4$, $\bar{Y}_5$, $\bar{Y}_6$, $\bar{Y}_7$ w zależności od czynników X_1, X_2, X_3, X_4 69

Tabela 5.5. Wyniki wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ powstałego materiału [W/(m · K)] 76

Tabela 5.6. Skład mieszanek zakwalifikowanych do dalszych badań 77

Tabela 5.7. Badania cech fizycznych zapraw z dodatkiem biowęgla 83

Tabela 5.8. Gęstości zaprawy wraz z podanymi współczynnikami w/c, b/c 84

Tabela 6.1. Rozkłady temperatur w ścianach murowych badanych obiektów zabytkowych przed zastosowaniem zaprawy uzupełniającej z dodatkiem biowęgla oraz po jej użyciu [°C] 92

Spis rysunków

Rys. 3.1. Rodzaje prac i zabiegów w procesie konserwacji i restauracji zabytków architektury ... 32

Rys. 3.2. Przykłady spoinowania wtórnego ... 40

Rys. 4.1. Schemat powierzchni płyty i powierzchni ciepłomierza ... 51

Rys. 4.2. Schemat pomiaru wytrzymałości na ściskanie ... 52

Rys. 4.3. Schemat urządzenia do badania prędkości podciągania kapilarnego ... 54

Rys. 4.4. Schemat urządzenia do badania prędkości wysychania próbek ... 55

Rys. 5.1. Wyniki wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ powstałego materiału ... 76

Rys. 5.2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie zaprojektowanych zapraw z biowęglem ... 77

Rys. 5.3. Oznaczenia konsystencji świeżej zaprawy uzyskane przy użyciu penetrometru ... 78

Rys. 5.4. Nasiąkliwość zaprawy ... 79

Rys. 5.5. Kapilarne podciąganie wody w zaprawie ... 80

Rys. 5.6. Prędkość wysychania zaprawy ... 81

Rys. 5.7. Zgodność faktury powierzchni zaprawy ... 82

Rys. 5.8. Technologiczność zaprawy pod kątem wykonywania robót restauracyjnych ... 83

Rys. 6.1. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom –2 ... 89

Rys. 6.2. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu zachodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom –2 ... 90

Rys. 6.3. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom −2 90

Rys. 6.4. Cyfrowy i termograficzny obraz fragmentu wschodniego sklepienia i muru hydroforni Zamku Biskupiego po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom −2 91

Rys. 6.5. Cyfrowy i termograficzny obraz wschodniego muru przedsionka kościoła pw. św. Jana Chrzciciela przed zastosowaniem warstwy uzupełniającej, poziom 0 91

Rys. 6.6. Cyfrowy i termograficzny obraz wschodniego muru przedsionka kościoła pw. św. Jana Chrzciciela po zastosowaniu warstwy uzupełniającej, poziom 0 92

Rys. 6.7. Analiza porównawcza filtrów korekcyjnych na przykładzie badanej przegrody Zamku Biskupiego 93

Streszczenie

W pracy przedstawiono próbę opracowania warstw uzupełniających przegród w budynkach zabytkowych, ze szczególnym uwzględnieniem roli zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla. Oceniono również wpływ zaprojektowanej mieszanki na właściwości cieplne i zagrożenia mykologiczne restaurowanych przegród (pomieszczeń).

Głównym celem pracy było utworzenie podstaw doświadczalnych pozwalających na właściwy dobór składników mieszanki przeznaczonej do uzupełnień w murach budynków zabytkowych. Realizacja celu wymagała:

- analizy przedmiotowej literatury, zaleceń normowych prac konserwatorsko-restauratorskich oraz metod oceny stanów cieplno-wilgotnościowego i mykologicznego budynków zabytkowych,
- przeprowadzenia badań własnych i analizy ich wyników,
- autorskiego opracowania składu mineralnego zaprawy uzupełniającej, optymalnego pod względem charakterystyki podstawowych cech technicznych,
- oceny przydatności zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla do stosowania jako warstwy uzupełniającej ścian murowych budynków zabytkowych pod względem analizowanych parametrów,
- wykonania badań kontrolnych w wytypowanych obiektach budowlanych, aby zweryfikować wybrane cechy zastosowanej zaprawy uzupełniającej,
- wyboru filtra korekcyjnego podczerwieni do najskuteczniejszej, według autorów, lokalizacji mikromostków cieplnych, zawilgoceń oraz zasoleń w przegrodach niejednorodnych.

Praca ma charakter badawczy i koncentruje się na analizach, badaniach terenowych oraz laboratoryjnych. Przygotowana została w modelu empirycznym – prezentowane treści odniesiono do rzeczywistego stanu technicznego badanych budynków, a przez to zweryfikowano założenia teoretyczne z praktyką.

Zakres pracy obejmuje części teoretyczną i doświadczalną, które przedstawiono w sześciu rozdziałach. Dokonano przeglądu i analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącej procesów destrukcyjnych oddziałujących na budynki zabytkowe, a także sposobów ich naprawy. Przeprowadzono badania terenowe stanu cieplno-wilgotnościowego i mykologicznego murowanych ścian zewnętrznych Zamku Biskupiego i kościoła rzymskokatolickiego pw. św. Jana Chrzciciela w Janowie Podlaskim.

Opisano wymagania stawiane warstwom uzupełniającym stosowanym w ścianach murowych budynków zabytkowych oraz zaprojektowano i dobrano optymalny skład mieszanki zaprawy cementowej z dodatkiem biowęgla. Przeprowadzono również badania cech materiałowych i struktury powstałego kompozytu, jak też przedstawiono zalecenia praktyczne do projektowania warstw uzupełniających.

Summary

The paper presents an attempt to develop adscititious layers of partitions in historic buildings, with particular emphasis on the role of cement mortar with the including of biochar. The influence of the designed mixture on thermal properties and mycological hazards of the restored partitions (rooms) was also assessed.

The main purpose of the work was to create an experimental basis allowing for the proper selection of the components of the mixture intended for restorations in the walls of historic buildings. Achieving the goal required:

- analysis of the literature in question, standard recommendations for restoration and restoration works and methods of assessing the thermal, humidity and mycological conditions of historic buildings,
- conducting own research and analysing their results,
- original development of the mineral composition of the complementary mortar, optimal in terms of basic technical characteristics,
- assessment of the suitability of cement mortar with the addition of biochar for use as a supplementary layer of masonry walls in historic buildings in terms of the analysed parameters,
- carrying out control tests in selected buildings to verify selected features of the supplementary mortar used,
- selection of an infrared correction filter for the most effective, according to the authors, location of thermal microstructures, moisture and salinity in heterogeneous partitions.

The paper is of a research nature and focuses on analyses, field and laboratory research. It was prepared in an empirical model - the presented content was related to the actual technical condition of the buildings tested, and thus the theoretical assumptions were verified with practice.

The scope of the work includes theoretical and experimental parts, which are presented in six chapters. A review and analysis of the current state of knowledge concerning destructive processes affecting historic buildings as well as methods of their repair was carried out. Field tests of the thermal, humidity and mycological condition of the external brick walls of the Bishop's Castle and the Roman Catholic church of St. John the Baptist in Janów Podlaski. The requirements for complementary layers used in the masonry walls of historic buildings were described,

and the optimal composition of the cement mortar mixture with the addition of biochar was designed and selected. The material properties and structure of the resulting composite were also tested, as well as practical recommendations for the design of supplementary layers.

DANIEL TOKARSKI jest pracownikiem Wydziału Ekonomiczno-Socjologicznego Uniwersytetu Łódzkiego. W latach 2016–2020 pracował w Laboratorium Analiz Środowiskowych w zakresie fizyki budowli Regionalnego Centrum Badań środowiska, rolnictwa i technologii innowacyjnych Państwowej Szkoły Wyższej im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej. Swą aktywność zawodową początkowo związał z zagadnieniami diagnostyki obiektów budowlanych pod kątem wad konstrukcyjnych, a także aspektów zdrowotnych użytkowników budynków. Dalsze prace naukowo-badawcze poświęcił inżynierii zrównoważonego rozwoju.

IRENA ICKIEWICZ jest pracownikiem Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej. Jej zainteresowania zawodowe dotyczą głównie fizyki budowli. Wyniki swoich badań, nie tylko naukowych, opublikowała w ponad 170 publikacjach, jest również współautorem 4 podręczników akademickich.

Politechnika Białostocka