Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki

Szkoła Doktorska Politechniki Krakowskiej

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania mechanizmów przenikania ciepła w warstwowych kompozytach na bazie glinokrzemianów oraz włókien pochodzenia naturalnego

mgr inż. Agnieszka Przybek

Promotor rozprawy

dr hab. inż. Michał Łach, prof. PK

Kraków 2026

Pragnę złożyć wyrazy głębokiego uznania i wdzięczności

Panu dr hab. inż. Michałowi Łachowi, prof. PK

za wsparcie, merytoryczne wskazówki oraz nieocenioną pomoc okazaną na wszystkich etapach realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. Dziękuję za poświęcony czas, cierpliwość, konstruktywną krytykę oraz inspirujące dyskusje, które miały istotny wpływ na ostateczny kształt pracy. Pragnę podziękować za opiekę naukową, zaangażowanie oraz niezwykle cenne wsparcie merytoryczne i motywacyjne, bez których powstanie tej pracy nie byłoby możliwe.

Pani dr inż. Marii Hebdowskiej-Krupie

za cenne wsparcie merytoryczne, życzliwość oraz zaangażowanie okazywane w trakcie realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. Dziękuję za wartościowe uwagi, konstruktywne sugestie oraz inspirujące konsultacje, które istotnie wsparły realizację niniejszej rozprawy doktorskiej.

Szczególne podziękowania kieruję także do mojego męża, rodziców, rodzeństwa i najbliższych

Pragnę wyrazić wdzięczność mojemu mężowi za nieustanne wsparcie, cierpliwość i wiarę we mnie w trakcie całego procesu powstawania niniejszej rozprawy. Dziękuję również moim rodzicom, rodzeństwu oraz najbliższym za wsparcie emocjonalne, cenne rady i wiarę we mnie, nawet w momentach zwątpienia. Wasza obecność i zrozumienie stworzyły fundament, na którym mogłam realizować swoje naukowe ambicje.

Podziękowania składam również wszystkim osobom, które wspierały mnie w realizacji badań eksperymentalnych, w szczególności ***Panu dr. inż. Janowi Wronie*** *z Akredytowanego Laboratorium Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej,* ***Panu prof. dr hab. inż. Karolowi Prałatowi oraz Jego Zespołowi*** *z Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku, a także* ***Panu prof. dr hab. inż. Piotrowi Dudzie*** *z Katedry Inżynierii Cieplnej i Procesowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Wyrażam serdeczną wdzięczność nie tylko za pomoc w przeprowadzeniu badań, lecz także za cenne konsultacje merytoryczne dotyczące niniejszej rozprawy doktorskiej.*

Spis treści

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ ORAZ SKRÓTÓW 5
1. WPROWADZENIE 7
2. ANALIZA STANU WIEDZY DOTYCZĄCEGO ZAGADNIENIA 9
2.1. GLINOKRZEMIANY AKTYWOWANE ALKALICZNIE 9
2.2. WŁÓKNA NATURALNE 15
2.3. PRZEGRODY BUDOWLANE 21
2.4. MECHANIZMY PRZENIKANIA CIEPŁA 25
2.5. DYREKTYWY I STRATEGIE PROEKOLOGICZNE 33
3. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATYKI BADAWCZEJ 39
4. TEZA I CELE PRACY 42
5. PLAN BADAŃ 44
6. METODYKA BADAŃ 46
6.1. Obrazowanie metodą skaningowej mikroskopii elektronowej wraz z identyfikacją składu pierwiastkowego 46
6.2. Obrazowanie przy użyciu mikroskopu świetlnego 46
6.3. Identyfikacja faz mineralogicznych z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) 47
6.4. Charakterystyka składu pierwiastkowego materiałów z wykorzystaniem XRF 47
6.5. Charakterystyka rozkładu wielkości cząstek z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej 47
6.6. Charakterystyka morfologii porów i powierzchni właściwej z wykorzystaniem analizatora sorpcji fizycznej 48
6.7. Charakterystyka porowatości i rozkładu porów z wykorzystaniem porozymetru rtęciowego 48
6.8. Analiza chemiczna metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera 48
6.9. Określanie gęstości materiałów metodą geometryczną 49
6.10. Charakterystyka mechaniczna: wytrzymałość na zginanie kompozytów 49
6.11. Charakterystyka mechaniczna: wytrzymałość na ściskanie kompozytów 50
6.12. Ocena właściwości termoizolacyjnych 50
6.13. Ocena zachowania materiałów w wysokich temperaturach 54
6.14. Badanie wymywalności wodnej 55
6.15. Badanie promieniotwórczości naturalnej 56
6.16. Zakres wykorzystania technologii cyfrowych w dysertacji 57
7. WYBÓR MATERIAŁÓW DO SYNTEZY KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH 58
8. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA 75
8.1. CZĘŚĆ I – CHARAKTERYSKTYKA SUROWCÓW, MATERIAŁÓW NATURALNYCH I DOBÓR WARUNKÓW SYNTEZY 75
8.1.1. Charakterystyka surowców 75

8.1.2. Charakterystyka materiałów naturalnych ... *78*
8.1.3. Zbrojenie kompozytów warstwowych ... *94*
8.1.4. Dobór warunków syntezy ... *95*
8.1.5. Podsumowanie części I – materiały do produkcji kompozytów warstwowych ... *96*
8.2. CZĘŚĆ II – WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA KOMPOZYTÓW PROTOTYPOWYCH ... 100
8.2.1. Wytwarzanie kompozytów prototypowych ... *100*
8.2.2. Charakterystyka parametrów fizycznych kompozytów prototypowych ... *102*
8.2.3. Charakterystyka właściwości mechanicznych kompozytów prototypowych ... *110*
8.2.4. Podsumowanie części II – kompozyty prototypowe ... *122*
8.3. CZĘŚĆ III – WYTWRZANIE I CHARAKTERYSTYKA OPRACOWANYCH KOMPOZYTÓW ... 123
8.3.1. Wytwarzanie opracowanych kompozytów ... *123*
8.3.2. Charakterystyka właściwości mechanicznych opracowanych kompozytów ... *129*
8.3.3. Parametry fizyczne opracowanych kompozytów ... *134*
8.3.4. Badania zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach ... *142*
8.3.5. Wymywalność i promieniotwórczość w materiale geopolimerowym ... *161*
8.3.6. Analiza cyklu życia i analiza ekonomiczna ... *165*
8.3.7. Podsumowanie części III - opracowane kompozyty ... *174*
9. WNIOSKI KOŃCOWE ... 176
10. PERSPEKTYWY APLIKACYJNE I BADAWCZE ... 178
STRESZCZENIE ... 181
SUMMARY ... 182
BIBLIOGRAFIA NAUKOWA ... 183
SPIS TABEL ... 193
SPIS RYSUNKÓW ... 195
WYKAZ DOROBKU NAUKOWEGO ... 198

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ ORAZ SKRÓTÓW

SEM	(ang. *Scanning Electron Microscopy*) – skaningowa mikroskopia elektronowa
EDS	(ang. *Energy Disperssive Spectroscopy*) – spektroskopia dyspersji energii
XRD	(ang. *X-Ray Diffraction*) – dyfrakcja rentgenowska
XRF	(ang. *X-Ray Fluorescence)* – rentgenowska spektroskopia fluorescencyjna
PSD	(ang. *Particle Size Distribution*) – rozkład wielkości cząstek proszku
D_{10}	średnica cząstki dla 10% udziału objętościowego [µm]
D_{50}	średnica cząstki dla 50% udziału objętościowego [µm]
D_{90}	średnica cząstki dla 90% udziału objętościowego [µm]
BET	określanie powierzchni właściwej metodą adsorpcji gazu zgodnie z teorią Brunauera–Emmetta–Tellera [m^2/g]
BJH	wyznaczanie funkcji rozkładu objętości porów z wykorzystaniem metody Barretta–Joynera–Halendy
DR	wyznaczanie parametrów mikroporów metodą Dubinina–Raduszkiewicza
FTIR	(ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) – spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera
R_f	wytrzymałość na zginanie [MPa]
R_c	wytrzymałość na ściskanie [MPa]
LCA	(ang. *Life Cycle Analysis*) – analiza cyklu życia
EE	(ang. *Embodied Energy*) – energia wbudowana [MJ/kg]
EC	(ang. *Embodied Carbon*) – węgiel wbudowany [$kgCO_2/kg$]
λ	współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]
R	opór cieplny [$(m^2 \cdot K)/W$]
U	współczynnik przenikania [$W/(m^2 \cdot K)$]
C_v	objętościowa pojemność cieplna [$MJ/(m^3 \cdot K)$]
a	współczynnik dyfuzyjności cieplnej [mm^2/s]
P	poziom ufności
C_{K-40}	stężenie promieniotwórcze izotopu potasu ^{40}K [Bq/kg]
C_{Ra-226}	stężenie promieniotwórcze izotopu radu ^{226}Ra [Bq/kg]

C_{Th-232}	stężenie promieniotwórcze izotopu toru ^{232}Th [Bq/kg]
RKP	referencyjny kompozyt prototypowy
4L-K_Z4	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
4K_Z4	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
4L-K_Z8	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
4K_Z8	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
8L-K_Z4	kompozyt zawierający 8 warstw izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
8K_Z4	kompozyt zawierający 8 warstw izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
10K_Z8	kompozyt zawierający 10 warstw izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
12L-K_Z8	kompozyt zawierający 12 warstw izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
RKG	referencyjny kompozyt geopolimerowy
K4M-8P-R	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K4MP-8P-R	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K3M-6P-R	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K3MP-6P-R	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2M-4P-R	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2MP-4P-R	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K1M-2P-R	kompozyt zawierający 1 matę lniano-konopną, mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K1MP-2P-R	kompozyt zawierający 1 matę lniano-konopną pociętą na paski, mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K2M-2P-Ś	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K3MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K3M-2P-Ś	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K4MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K4M-2P-Ś	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu

1. WPROWADZENIE

Współczesne innowacje w materiałach budowlanych i izolacyjnych wynikają z rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków, ich trwałości oraz ograniczania wpływu produkcji na środowisko. Zaostrzone przepisy energetyczne i międzynarodowe działania na rzecz redukcji emisji CO_2 wymuszają rozwój nowych rozwiązań materiałowych. Nowe materiały powinny zmniejszać zużycie energii w czasie użytkowania budynku oraz ograniczać obciążenie środowiska w całym cyklu życia, od pozyskania surowców, przez produkcję, aż po recykling lub utylizację.

Sektor budowlany należy do najbardziej zasobochłonnych obszarów gospodarki i w dużym stopniu odpowiada za zużycie energii pierwotnej oraz emisję gazów cieplarnianych. Wysokie zapotrzebowanie na energię wynika zarówno z eksploatacji budynków, głównie w zakresie ogrzewania i chłodzenia, jak i z produkcji materiałów takich jak cement portlandzki czy ceramika, które są bardzo energochłonne. Z tego względu rośnie znaczenie materiałów o dobrych właściwościach cieplnych, które jednocześnie pozwalają ograniczyć emisje związane z ich wytwarzaniem i użytkowaniem. Kwestia ta ma szczególne znaczenie w Europie w związku z realizacją założeń Europejskiego Zielonego Ładu oraz pakietu Fit for 55.

W odpowiedzi na te wyzwania rośnie zainteresowanie kompozytami glinokrzemianowymi, zwłaszcza geopolimerami, które są traktowane jako alternatywa dla tradycyjnych spoiw mineralnych. Materiały te można wytwarzać z surowców odpadowych i produktów ubocznych przemysłu, takich jak popioły lotne czy żużle, co wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Matryce glinokrzemianowe aktywowane alkalicznie cechują się wysoką odpornością na temperaturę, dobrą stabilnością chemiczną oraz możliwością kształtowania struktury porowatej, co stwarza potencjał do zastosowań wymagających dobrej izolacyjności.

Równocześnie obserwuje się szybki rozwój materiałów wzmacnianych włóknami naturalnymi, które stanowią alternatywę dla włókien syntetycznych i mineralnych. Włókna takie jak len, konopie, juta czy czysta celuloza mają niską gęstość, są odnawialne i wymagają stosunkowo mało energii w procesie produkcji. Ich zastosowanie w kompozytach budowlanych, zwłaszcza w warstwach izolacyjnych, wpływa na przewodnictwo cieplne oraz zdolność materiału do akumulacji ciepła.

Połączenie matryc glinokrzemianowych aktywowanych alkalicznie z włóknami naturalnymi stwarza możliwość opracowania nowej generacji kompozytów o dobrych właściwościach użytkowych i mniejszym wpływie na środowisko. Takie podejście wpisuje się

w kierunek rozwoju zrównoważonego budownictwa, w którym aspekty konstrukcyjne, energetyczne i ekologiczne uwzględnia się już na etapie projektowania materiału.

Materiały aktywowane alkalicznie na bazie glinokrzemianów, takie jak geopolimery, są alternatywą dla tradycyjnych spoiw cementowych. Charakteryzują się mniejszym śladem węglowym, wysoką odpornością na temperaturę oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi i chemicznymi. Ich struktura opiera się na trójwymiarowej sieci tetraedrów SiO_4 i AlO_4, co pozwala kształtować właściwości fizyczne poprzez zmianę składu, rodzaju aktywatora i warunków syntezy.

Szczególną grupę stanowią warstwowe kompozyty glinokrzemianowe aktywowane alkalicznie, w których poszczególne warstwy pełnią różne funkcje konstrukcyjne, izolacyjne lub ochronne. W takich układach kluczowe są procesy wymiany ciepła, czyli przewodzenie, konwekcja i promieniowanie, a także ich wzajemne oddziaływanie na granicach warstw. Obecność włókien naturalnych o anizotropowych właściwościach, porowatej strukturze i zdolności do pochłaniania wilgoci dodatkowo komplikuje transport ciepła, ponieważ zależy on od mikrostruktury, orientacji włókien oraz warunków otoczenia.

Pomimo wzrastającej liczby prac badawczych nad właściwościami mechanicznymi i trwałością kompozytów glinokrzemianowych aktywowanych alkalicznie, mechanizmy przewodzenia ciepła w strukturach warstwowych z udziałem włókien naturalnych są nadal słabo poznane. W literaturze dominują analizy makroskopowych parametrów, takich jak współczynnik przewodzenia ciepła, natomiast zależności między sposobem połączenia warstw a efektywnym transportem ciepła pozostają przedmiotem badań. Brak jednoznacznych modeli opisujących te zjawiska utrudnia projektowanie materiałów o kontrolowanych właściwościach izolacyjnych.

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy mechanizmów przenikania ciepła w kompozytach warstwowych opartych na glinokrzemianach aktywowanych alkalicznie oraz włóknach naturalnych. Celem pracy jest określenie, w jaki sposób skład materiałowy i struktura warstw wpływają na transport ciepła oraz wskazanie czynników decydujących o efektywności cieplnej tych materiałów. Analizie poddano także wpływ układu warstw izolacyjnych na właściwości całego kompozytu. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do projektowania ekologicznych kompozytów o zoptymalizowanych parametrach termicznych do zastosowań w budownictwie i inżynierii.

2. ANALIZA STANU WIEDZY DOTYCZĄCEGO ZAGADNIENIA

2.1. GLINOKRZEMIANY AKTYWOWANE ALKALICZNIE

Glinokrzemiany aktywowane alkalicznie to nieorganiczne materiały powstające w wyniku reakcji surowców bogatych w krzem i glin z roztworami silnych zasad lub krzemianów metali alkalicznych. Materiały te nazywa się geopolimerami i od początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku są intensywnie badane jako alternatywa dla tradycyjnych spoiw hydraulicznych, zwłaszcza cementu portlandzkiego [1]. Wprowadzenie terminu „geopolimer" miało podkreślić, że powstająca struktura ma cechy polimerowe, ale jednocześnie zachowuje nieorganiczny, mineralny charakter [2].

W literaturze geopolimery opisuje się jako materiały o strukturze amorficznej lub słabo uporządkowanej, które powstają w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w niskiej temperaturze i silnie zasadowym środowisku [3]. Mechanizm wiązania różni się od hydratacji cementu portlandzkiego. Proces zaczyna się od rozpuszczenia reaktywnych składników glinokrzemianowych, po czym następuje polikondensacja jednostek strukturalnych i utworzenie przestrzennej sieci [2]. Różnica w mechanizmie wiązania przekłada się na odmienny skład chemiczny, mikrostrukturę oraz właściwości geopolimerów.

Rozwój koncepcji geopolimerów był związany z badaniami nad naturalnymi procesami geochemicznymi prowadzącymi do powstawania skał glinokrzemianowych. Joseph Davidovits przedstawił model nieorganicznej polimeryzacji, w którym reaktywne formy krzemu i glinu łączą się w środowisku alkalicznym, tworząc trójwymiarową sieć glinokrzemianową [4]. Początkowo termin „geopolimer" odnosił się głównie do układów o niskiej zawartości wapnia, opartych na metakaolinie i popiołach lotnych. Wraz z rozwojem badań zakres ten poszerzono i zaczęto stosować szersze pojęcie materiałów aktywowanych alkalicznie, które obejmuje układy o bardziej złożonym składzie chemicznym [5].

Klasyfikacja glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie jest złożona i może opierać się na rodzaju prekursora, składzie chemicznym oraz zawartości wapnia. Do najczęściej stosowanych prekursorów należą popioły lotne, metakaolin, żużle wielkopiecowe oraz naturalne gliny [6]. Zdolność tych materiałów do tworzenia geopolimerów zależy bezpośrednio od zawartości fazy amorficznej, która decyduje o ich podatności na rozpuszczanie w środowisku zasadowym.

Metakaolin powstaje przez odwadnianie kaolinitu i cechuje się wysoką reaktywnością oraz dość jednorodnym składem chemicznym, co sprzyja tworzeniu spójnej struktury glinokrzemianowej [7]. Popioły lotne mają zróżnicowany skład, który zależy od rodzaju węgla i warunków spalania, co wpływa na szybkość reakcji oraz kształtowanie się struktury

materiału [8]. Wapń obecny w żużlach wielkopiecowych sprzyja powstawaniu bardziej złożonych struktur, w których sieć glinokrzemianowa współistnieje z fazami krzemianowo-wapniowy [9]. Struktura chemiczna geopolimerów jest zwykle opisywana ogólnym wzorem stechiometrycznym (1):

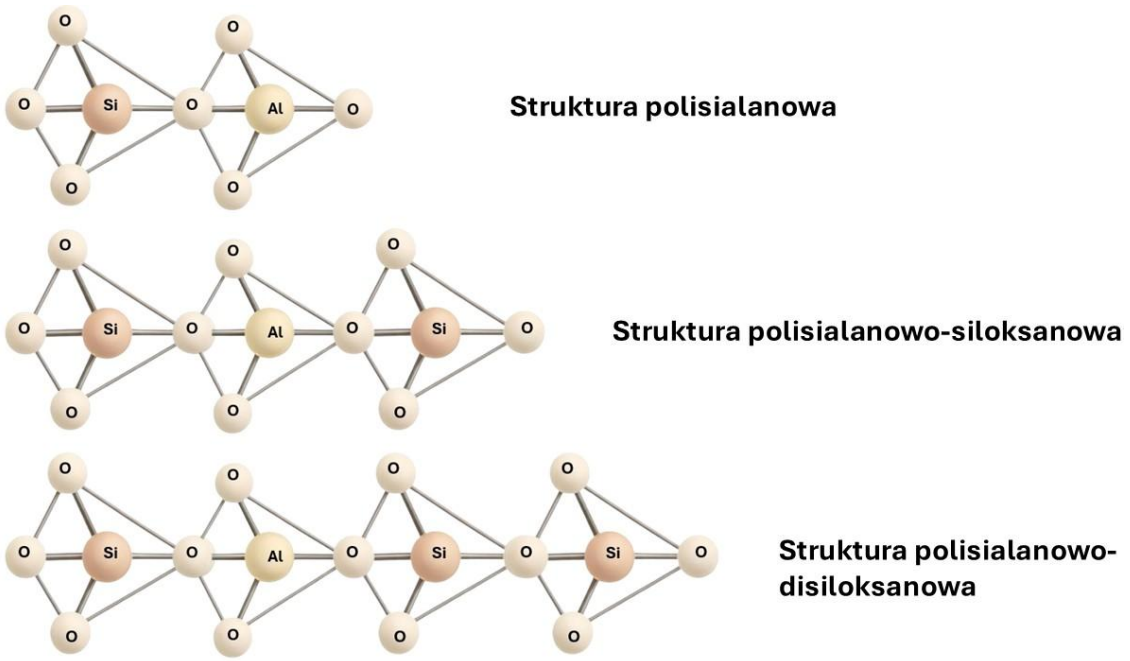
$$M_n[-(SiO_2)_z-AlO_2-]_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

gdzie „M" oznacza kation alkaliczny, najczęściej Na^+ lub K^+, „z" określa molowy stosunek Si/Al, „n" odnosi się do stopnia polimeryzacji, a „wH_2O" oznacza ilość wody związanej fizycznie i strukturalnie w matrycy glinokrzemianowej [4]. Wzór ten pokazuje zmienność składu geopolimerów oraz bezpośredni związek między budową sieci a właściwościami materiału.

Strukturę geopolimerów tworzą tetraedry krzemowe [SiO_4] i glinowe [AlO_4], które łączą się wspólnymi atomami tlenu w trójwymiarową sieć. Wprowadzenie glinu do sieci krzemianowej powoduje powstanie jednostek $[AlO_4]^-$ z ładunkiem ujemnym, który jest równoważony przez kationy alkaliczne [3]. Kationy te znajdują się w porach i kanałach sieci, gdzie stabilizują strukturę dzięki oddziaływaniom elektrostatycznym [5].

W geopolimerach dominują wiązania Si–O–Al oraz Si–O–Si, które tworzą amorficzną, trójwymiarową sieć glinokrzemianową. Udział poszczególnych wiązań zależy od składu chemicznego, zwłaszcza od stosunku molowego Si/Al oraz warunków syntezy. Zgodnie z zasadą Löwensteina bezpośrednie wiązania Al–O–Al są energetycznie niekorzystne i występują rzadko. Oznacza to, że tetraedry glinowe są zwykle oddzielone tetraedrami krzemowymi, co sprzyja równomiernemu rozmieszczeniu glinu w sieci. Taka organizacja struktury zwiększa stabilność chemiczną geopolimeru i ogranicza lokalne nagromadzenie ładunku ujemnego w matrycy [10].

Kluczowym parametrem kształtującym strukturę sieci glinokrzemianowej jest molowy stosunek Si/Al. Przy niskiej wartości tego stosunku, zbliżonej do 1, powstają struktury określane jako polisialanowe, które zawierają dużo tetraedrów glinowych i mają stosunkowo luźną budowę sieci [11]. Gdy stosunek Si/Al wzrasta do wartości około 2, powstają struktury polisialanowo-siloksanowe, w których rośnie udział wiązań Si–O–Si, a sieć staje się bardziej zwarta [12]. Dalszy wzrost stosunku Si/Al prowadzi do powstawania struktur polisialanowo-disiloksanowych o wyższym stopniu usieciowania i większej gęstości [13]. Relację tę przedstawiono graficznie na rysunku 1.



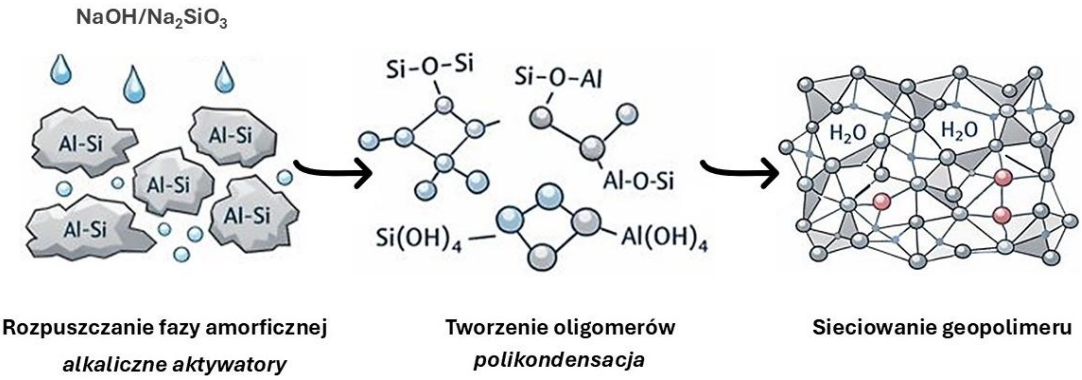
Rysunek 1. *Schematyczne przedstawienie jednostek tetraedrycznych [SiO_4] i [AlO_4] oraz sposobu ich łączenia w sieć glinokrzemianową w zależności od stosunku Si/Al (na podstawie [14]).*

W geopolimerach kationy alkaliczne równoważą ujemny ładunek tetraedrów $[AlO_4]^-$ i wpływają na budowę sieci glinokrzemianowej. Ich promień jonowy i stopień hydratacji decydują o odległościach między tetraedrami, elastyczności struktury oraz zmianach zachodzących podczas dojrzewania. Kationy sodu o mniejszym promieniu i wyższym stopniu hydratacji sprzyjają tworzeniu bardziej zwartej i jednorodnej sieci o wyższym stopniu usieciowania. Kationy potasu o większym promieniu i niższym stopniu hydratacji stabilizują strukturę w sposób bardziej luźny, co prowadzi do powstawania większych porów żelowych i większej zdolności do lokalnej reorganizacji. Różnice te wpływają na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne oraz odporność chemiczną geopolimerów [15,16].

Woda jest istotnym składnikiem geopolimerów i uczestniczy w syntezie, dojrzewaniu oraz późniejszym użytkowaniu materiału. Występuje jako woda fizycznie zaadsorbowana oraz woda związana strukturalnie. Woda strukturalna łączy się z grupami hydroksylowymi w sieci glinokrzemianowej i uczestniczy w hydratacji kationów alkalicznych równoważących ładunek tetraedrów $[AlO_4]^-$. Jej obecność stabilizuje lokalne środowisko jonowe w matrycy. Woda fizycznie zaadsorbowana wypełnia pory żelowe i kapilarne powstające podczas polikondensacji i reorganizacji sieci. Może być częściowo usuwana podczas suszenia lub ogrzewania bez naruszenia głównych wiązań strukturalnych. Ilość i rozmieszczenie wody wpływają na szybkość polikondensacji, rozwój porowatości oraz stabilność struktury w czasie.

Zmiany zawartości wody mogą prowadzić do relaksacji lub zagęszczenia sieci, co przekłada się na właściwości mechaniczne i trwałość geopolimeru [4,17].

Proces tworzenia geopolimerów rozpoczyna się od aktywacji alkalicznej prekursora, która prowadzi do jego częściowego rozpuszczenia, a następnie do kondensacji i polikondensacji uwolnionych składników. W silnie zasadowym środowisku dochodzi do destabilizacji wiązań w amorficznych fazach glinokrzemianowych, co powoduje uwolnienie reaktywnych form krzemu i glinu w postaci jonów oraz krótkich oligomerów krzemianowych i glinokrzemianowych [6,13]. W kolejnym etapie rozpuszczone jednostki strukturalne ulegają kondensacji, w wyniku czego powstają wiązania mostkowe stanowiące podstawę rozwijającej się sieci glinokrzemianowej [18]. W wyniku tych reakcji rośnie stopień polimeryzacji i powstaje żel geopolimerowy. Podczas dojrzewania materiału zachodzi dalsze usieciowanie, zagęszczenie i reorganizacja struktury, czemu towarzyszy uwalnianie wody reakcyjnej oraz rozwój mikrostruktury porowatej [19]. Ogólny schemat tego procesu, obejmujący etapy rozpuszczania, tworzenia oligomerów oraz sieciowania struktury geopolimerowej, przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. *Schemat reakcji aktywacji alkalicznej glinokrzemianów - od rozpuszczania fazy amorficznej, przez tworzenie oligomerów, po sieciowanie struktury geopolimerowej (na podstawie [2]).*

Podczas dojrzewania materiału, struktura glinokrzemianowa stopniowo się zagęszcza w wyniku polikondensacji jednostek strukturalnych i reorganizacji sieci [20]. W trakcie tego procesu wydziela się woda reakcyjna, która początkowo stabilizuje środowisko zasadowe i uczestniczy w hydratacji kationów równoważących ładunek. Z czasem woda ta przemieszcza się do porów żelowych i kapilarnych, co wpływa na rozwój mikrostruktury porowatej materiału [21]. Warunki wytwarzania mają istotny wpływ na przebieg tych procesów. Wyższa temperatura utwardzania przyspiesza kondensację i rozwój polimeryzacji sieci glinokrzemianowej, natomiast dłuższy czas dojrzewania sprzyja dalszej reorganizacji

i stabilizacji struktury [22]. Skład i stężenie aktywatora alkalicznego wpływają na szybkość reakcji oraz końcową strukturę sieci, a tym samym na jednorodność mikrostruktury i właściwości materiału po utwardzeniu [21].

Rodzaj i skład chemiczny aktywatora alkalicznego mają kluczowe znaczenie w procesie aktywacji glinokrzemianów. Aktywator inicjuje rozpuszczanie reaktywnych faz glinokrzemianowych oraz uczestniczy w tworzeniu nowej sieci, dostarczając kationy równoważące ładunek i rozpuszczalne formy krzemu [23]. Najczęściej stosowanymi aktywatorami są wodne roztwory wodorotlenków metali alkalicznych, takich jak NaOH i KOH, oraz krzemiany alkaliczne, zwykle sodowe lub potasowe [24].

Wodorotlenki alkaliczne podnoszą pH środowiska reakcji, co prowadzi do osłabienia wiązań w amorficznych fazach prekursorów glinokrzemianowych [13]. Zwiększone stężenie jonów OH^- sprzyja rozpuszczaniu krzemu i glinu w postaci form hydroksylowych, zarówno monomerycznych, jak i oligomerycznych, które stanowią podstawowe jednostki reakcyjne w procesie geopolimeryzacji [3]. Kationy Na^+ lub K^+ równoważą ujemny ładunek tetraedrów $[AlO_4]^-$ i w ten sposób stabilizują tworzącą się sieć glinokrzemianową [15].

Krzemiany alkaliczne pełnią inną, ale równie istotną rolę w procesie aktywacji. Oprócz podnoszenia zasadowości środowiska dostarczają rozpuszczalne formy krzemu, które mogą być bezpośrednio włączane do rozwijającej się sieci glinokrzemianowej [24]. Obecność rozpuszczalnych krzemianów zwiększa stopień polimeryzacji, co prowadzi do większej liczby wiązań Si–O–Si i do zagęszczenia sieci [25]. Parametrem opisującym skład krzemianów alkalicznych jest moduł krzemianowy. Określa się go jako molowy stosunek SiO_2 do M_2O i wpływa on na lepkość roztworu aktywatora oraz na kinetykę reakcji [26].

W praktyce przy syntezie geopolimerów stosuje się zwykle mieszaniny wodorotlenków i krzemianów alkalicznych, co pozwala kontrolować pH środowiska oraz dostępność reaktywnych form krzemu [27]. Takie podejście pozwala precyzyjnie kształtować strukturę sieci glinokrzemianowej pod względem stopnia usieciowania i jednorodności. Zbyt duża ilość krzemianów może jednak prowadzić do powstawania struktur o ograniczonej ruchliwości jonów, co wpływa na przebieg wiązania i rozwój mikrostruktury [28].

Bezpośrednim produktem aktywacji alkalicznej glinokrzemianów są nieorganiczne żele o strukturze amorficznej lub słabo uporządkowanej, które stanowią fazę wiążącą materiału. W układach o niskiej zawartości wapnia głównym produktem jest żel sodowy lub potasowy określany jako N-A-S-H, czyli hydrat glinokrzemianu sodowego [29]. Struktura tego żelu ma postać trójwymiarowej sieci tetraedrów połączonych mostkami tlenowymi i stabilizowanych przez kationy alkaliczne.

Żel N-A-S-H jest fazą niekrystaliczną, która wykazuje jedynie lokalny porządek strukturalny w skali kilku nanometrów [30]. Taka organizacja struktury powoduje, że właściwości mechaniczne i trwałość materiału zależą głównie od budowy sieci i stopnia jej polimeryzacji, a nie od obecności wyraźnych faz krystalicznych. Skład chemiczny żelu, w szczególności stosunek Si/Al, wpływa na jego gęstość, sztywność i stabilność chemiczną [31].

W układach zawierających wapń, takich jak materiały na bazie żużli wielkopiecowych lub mieszanek popiołów i żużli, powstają żele o bardziej złożonym składzie, określane jako C-(A)-S-H lub (N,C)-A-S-H [32]. W tych strukturach wapń częściowo zastępuje kationy alkaliczne i uczestniczy w kompensacji ładunku, a sieć glinokrzemianowa współistnieje z elementami charakterystycznymi dla uwodnionych krzemianów wapnia [33]. Prowadzi to do powstawania struktur hybrydowych, które różnią się zarówno od klasycznych geopolimerów, jak i od materiałów powstających w wyniku hydratacji cementu portlandzkiego.

Różnice między żelami N-A-S-H a C-(A)-S-H dotyczą nie tylko składu chemicznego, ale także organizacji struktury w skali nano- i mezoskopowej. Żele o niskiej zawartości wapnia mają bardziej jednorodną sieć glinokrzemianową, natomiast obecność wapnia prowadzi do większej złożoności strukturalnej i zróżnicowania środowiska chemicznego [34]. Zjawiska te bezpośrednio wpływają na właściwości mechaniczne oraz trwałość materiałów aktywowanych alkalicznie.

Proces dojrzewania żeli geopolimerowych polega na stopniowej reorganizacji struktury, zagęszczaniu sieci i zmniejszaniu ilości wolnej wody. W miarę upływu czasu rośnie stopień polimeryzacji i stabilizują się wiązania, co prowadzi do wzrostu wytrzymałości i poprawy odporności chemicznej materiału [17]. Część wody strukturalnej pozostaje trwale związana z siecią i pełni istotną rolę w jej stabilizacji [29].

Właściwości geopolimerów wynikają z ich silnie usieciowanej struktury glinokrzemianowej. Taka budowa zapewnia wysoką stabilność chemiczną oraz odporność na działanie roztworów kwasowych, siarczanów i podwyższonej temperatury. Odporność ta wynika z niskiej rozpuszczalności sieci glinokrzemianowej oraz z braku łatwo wymywanych produktów hydratacji, które występują w tradycyjnych spoiwach cementowych [20]. Geopolimery charakteryzują się dobrą stabilnością wymiarową, małym skurczem i niską podatnością na starzenie. Wynika to ze stabilnej sieci glinokrzemianowej, niewielkich zmian objętości podczas dojrzewania oraz ograniczonej migracji jonów w strukturze. Cechy te zapewniają długotrwałą stabilność mechaniczną i chemiczną, co czyni geopolimery przydatnymi w zastosowaniach wymagających wysokiej trwałości [3].

Wytrzymałość geopolimerów na ściskanie zależy od stopnia usieciowania struktury glinokrzemianowej oraz jednorodności matrycy. Wysoki stopień polimeryzacji i równomierne rozmieszczenie wiązań sprzyjają uzyskaniu dużej wytrzymałości. Geopolimery wykazują jednak kruchy sposób zniszczenia typowy dla nieorganicznych sieci polimerowych, co wynika z ograniczonej zdolności do relaksacji naprężeń i małej plastyczności struktury [35]. Właściwości fizyczne geopolimerów, takie jak gęstość objętościowa, porowatość całkowita i rozkład porów, można kształtować poprzez dobór składu i warunków syntezy. Stosunek Si/Al, rodzaj i stężenie aktywatora, ilość wody oraz temperatura i czas utwardzania bezpośrednio wpływają na rozwój mikrostruktury porowatej. Zależności te pozwalają projektować materiały o określonych właściwościach mechanicznych i fizycznych dopasowanych do zastosowań inżynieryjnych [16].

Geopolimery są odporne na wysoką temperaturę, ponieważ ich nieorganiczna sieć glinokrzemianowa jest zbudowana głównie z silnych wiązań kowalencyjnych. W tradycyjnych spoiwach cementowych produkty hydratacji ulegają rozkładowi już w temperaturze 400-600°C. Geopolimery zachowują strukturę w znacznie szerszym zakresie temperatur [12]. Podwyższona temperatura prowadzi głównie do usunięcia wody fizycznie zaadsorbowanej oraz części wody związanej z hydratacją kationów alkalicznych i grupami hydroksylowymi. Proces ten zachodzi stopniowo i nie powoduje gwałtownego rozpadu sieci glinokrzemianowej. W wyższych temperaturach struktura ulega rozluźnieniu i ponownemu uporządkowaniu, co może prowadzić do jej częściowego zagęszczenia. W niektórych przypadkach pojawiają się również wtórne fazy krystaliczne glinokrzemianów [36]. Zachowanie ciągłości sieci i brak gwałtownej degradacji sprawiają, że geopolimery utrzymują stabilność objętościową oraz w dużym stopniu zachowują właściwości mechaniczne po działaniu wysokiej temperatury. Daje im to przewagę nad tradycyjnymi spoiwami mineralnymi w zastosowaniach wymagających podwyższonej odporności termicznej i ogniowej [12,36].

2.2. WŁÓKNA NATURALNE

Włókna naturalne to grupa materiałów włóknistych pozyskiwanych z surowców biologicznych, które od lat są stosowane w przemyśle tekstylnym i papierniczym, a coraz częściej także jako zbrojenie kompozytów w inżynierii materiałowej. Zainteresowanie tymi włóknami rośnie, ponieważ są odnawialne, mają niski ślad węglowy i ulegają biodegradacji [37,38].

Podstawowym kryterium podziału włókien naturalnych jest ich pochodzenie biologiczne, dlatego wyróżnia się włókna roślinne, zwierzęce i mineralne. W kompozytach budowlanych oraz materiałach nieorganicznych, takich jak geopolimery, największe znaczenie mają włókna roślinne, ponieważ mają strukturę lignocelulozową i stosunkowo dobrą kompatybilnością z matrycami mineralnymi [39].

Włókna roślinne dzieli się dalej w zależności od części rośliny, z której pochodzą. Do najczęściej wyróżnianych grup należą włókna łykowe (np. len, konopie, juta), włókna liściowe (np. sizal, abaka), włókna nasienne (np. bawełna, kapok) oraz włókna pochodzące z łodyg i traw (np. bambus, słoma) [40]. Poszczególne grupy włókien różnią się składem chemicznym i budową, co wpływa na ich właściwości mechaniczne oraz sposób zachowania w kompozycie.

Włókna łykowe, takie jak len, konopie i juta, zawierają zwykle 60-80% celulozy i mają dobrze rozwiniętą strukturę mikrofibrylarną, co przekłada się na ich dobrą wytrzymałość i sztywność [41]. Dlatego należą do najczęściej badanych włókien naturalnych stosowanych do zbrojenia kompozytów mineralnych. Włókna liściowe, takie jak sizal i abaka, zawierają więcej ligniny i hemicelulozy, co zwiększa ich sztywność, ale jednocześnie sprawia, że są bardziej podatne na degradację w środowisku alkalicznym [42].

Włókna nasienne, reprezentowane głównie przez bawełnę, mają bardzo wysoką zawartość celulozy i dość jednorodną strukturę, jednak ich krótsza długość i mniejsza odporność chemiczna ograniczają zastosowanie w kompozytach konstrukcyjnych [43]. Włókna pochodzące z traw i łodyg wykazują dużą zmienność właściwości, która wynika z warunków wzrostu roślin oraz ich złożonej, uporządkowanej budowy anatomicznej [44].

Innym sposobem podziału włókien naturalnych jest ich skład chemiczny. Włókna lignocelulozowe składają się głównie z celulozy, hemicelulozy i ligniny, a proporcje tych składników decydują o ich właściwościach mechanicznych oraz odporności chemicznej [45]. Wysoka zawartość celulozy sprzyja dużej wytrzymałości na rozciąganie, natomiast lignina zwiększa sztywność i odporność biologiczną, ale jednocześnie może podnosić wrażliwość włókien na środowisko alkaliczne [46].

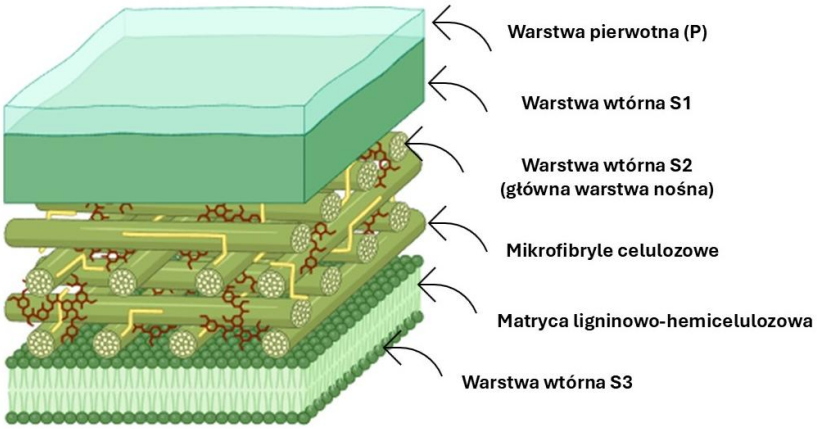
W zastosowaniach inżynierskich ważny jest także podział włókien ze względu na ich geometrię, czyli długość, średnicę i współczynnik smukłości. Parametry te bezpośrednio wpływają na skuteczność przenoszenia obciążeń w kompozycie oraz na przebieg pękania i mostkowanie rys [47]. Włókna o dużym stosunku długości do średnicy mają większy potencjał zbrojący, ale są też bardziej podatne na uszkodzenia w trakcie mieszania i formowania kompozytu [48].

Włókna naturalne mają złożoną budowę, która w dużym stopniu decyduje o ich właściwościach mechanicznych i fizycznych oraz o sposobie zachowania w kompozytach mineralnych. W przeciwieństwie do włókien syntetycznych nie są strukturami jednorodnymi, lecz materiałami wieloskładnikowymi o zróżnicowanej organizacji na poziomie makro-, mikro- i nanoskali [41].

Podstawową jednostką strukturalną włókien roślinnych jest pojedyncza komórka, której ściana składa się z kilku warstw różniących się orientacją mikrofibryli celulozowych i składem chemicznym. W centrum komórki znajduje się światło włókna, czyli lumen, a jego wielkość i kształt wpływają na gęstość, porowatość oraz zdolność pochłaniania wody [40]. Ściana komórkowa składa się z warstwy pierwotnej oraz kilku warstw wtórnych, które różnią się budową i ułożeniem mikrofibryli.

Na rysunku 3 pokazano schemat budowy ściany komórkowej włókna roślinnego z jej uporządkowaną organizacją i rozmieszczeniem głównych składników. Ściana składa się z warstwy pierwotnej (P) oraz warstw wtórnych (S1, S2, S3), które różnią się grubością, orientacją mikrofibryli celulozowych i składem chemicznym. Największe znaczenie dla właściwości mechanicznych ma warstwa S2, ponieważ zawiera dużo celulozy i ma mikrofibryle ułożone pod małym kątem względem osi włókna, co decyduje o jego wytrzymałości i sztywności [49,50].

Mikrofibryle celulozowe są osadzone w amorficznej matrycy złożonej z ligniny i hemicelulozy, która spaja strukturę oraz wpływa na jej elastyczność i zdolność wiązania wody. Składniki amorficzne są jednocześnie najbardziej podatne na degradację w środowisku alkalicznym, co ma duże znaczenie przy stosowaniu włókien naturalnych jako zbrojenia w kompozytach mineralnych [51]. Przedstawiony schemat ma charakter koncepcyjny i pokazuje fragment ściany komórkowej w powiększeniu bez zachowania rzeczywistej skali, aby w czytelny sposób przedstawić zależność między budową morfologiczną a właściwościami włókna [45].



Rysunek 3. *Schemat budowy morfologicznej ściany komórkowej włókna roślinnego z zaznaczeniem warstwy pierwotnej (P), warstw wtórnych (S1, S2, S3), mikrofibryli celulozowych oraz matrycy ligninowo-hemicelulozowej (na podstawie [49]).*

Celuloza jest głównym składnikiem nośnym włókien naturalnych i występuje w postaci mikrofibryli o obszarach krystalicznych i amorficznych. Stopień krystaliczności celulozy oraz kąt nachylenia mikrofibryli względem osi włókna w dużym stopniu decydują o wytrzymałości na rozciąganie i module sprężystości [50]. Mały kąt mikrofibrylarny sprzyja wysokiej sztywności i wytrzymałości włókna, natomiast większy kąt zwiększa jego podatność na odkształcenia [52].

Hemiceluloza i lignina tworzą matrycę otaczającą mikrofibryle celulozowe. Hemiceluloza odpowiada za elastyczność struktury i zdolność wiązania wody, natomiast lignina nadaje włóknom sztywność poprzeczną oraz zwiększa ich odporność biologiczną [45]. Obecność tych składników zwiększa jednak podatność włókien na degradację chemiczną w środowisku silnie alkalicznym, co ma szczególne znaczenie w przypadku kompozytów geopolimerowych [51].

Złożona budowa morfologiczna włókien naturalnych wpływa na ich właściwości fizyczne. Włókna te mają stosunkowo niską gęstość, zwykle w zakresie 1,2-1,6 g/cm^3, co sprawia, że są dobrym materiałem do projektowania lekkich kompozytów [37]. Ich porowata struktura sprzyja wchłanianiu wilgoci, co może powodować pęcznienie włókien, zmiany objętości oraz osłabienie przyczepności na granicy włókno-matryca [38].

Właściwości mechaniczne włókien naturalnych, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości i wydłużenie przy zerwaniu, wykazują dużą zmienność zależną od rodzaju włókna, warunków wzrostu rośliny oraz sposobu przetwarzania [43]. Włókna łykowe, takie jak len i konopie, osiągają wytrzymałość na rozciąganie rzędu 500-1000 MPa, natomiast włókna liściowe i nasienne mają zwykle niższą wytrzymałość, ale większe wydłużenie przy zerwaniu [53].

W zastosowaniach inżynierskich ważna jest także chropowatość powierzchni włókien oraz obecność defektów, takich jak pęknięcia, rozwarstwienia czy zmienna średnica. Czynniki te wpływają na sposób przenoszenia obciążeń w kompozycie oraz na skuteczność mostkowania rys [47]. Nieregularna powierzchnia włókien może sprzyjać ich mechanicznemu zespoleniu w matrycy, ale jednocześnie zwiększa podatność na inicjację uszkodzeń [54].

Zestawienie podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych wybranych włókien naturalnych, istotnych przy ich zastosowaniu w kompozytach mineralnych, przedstawiono w tabeli 1. Właściwości te wynikają bezpośrednio z ich złożonej budowy morfologicznej oraz składu chemicznego.

Tabela 1. *Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne włókien naturalnych [37,38,41,43,53].*

Rodzaj włókna	**Gęstość [g/cm³]**	**Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]**	**Moduł Younga [GPa]**	**Wydłużenie przy zerwaniu [%]**	**Celuloza [%]**	**Lignina [%]**
Len	1,4-1,5	500-900	50-70	1,2-3,0	65-80	2-5
Konopie	1,4-1,5	550-900	30-70	1,6-4,0	60-75	3-10
Juta	1,3-1,5	400-800	20-30	1,5-2,0	60-70	12-14
Sizal	1,3-1,5	350-700	9-22	2,0-7,0	60-72	8-12
Kokos	1,1-1,3	100-230	4-6	15-40	32-43	40-46
Bawełna	1,5-1,6	300-600	5-12	3,0-10,0	88-96	<1
Bambus	1,1-1,4	500-1000	20-40	1,5-4,0	40-60	20-30

Trwałość włókien naturalnych w środowisku alkalicznym jest jednym z głównych czynników ograniczających ich zastosowanie jako zbrojenia w kompozytach mineralnych, w tym w materiałach aktywowanych alkalicznie i geopolimerach. Wysokie pH typowe dla matryc nieorganicznych powoduje stopniową degradację składników lignocelulozowych, co prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych włókien oraz osłabienia przyczepności na granicy włókno-matryca [51].

Mechanizmy degradacji włókien naturalnych w środowisku alkalicznym są złożone i obejmują procesy chemiczne oraz fizyczne. Jednym z pierwszych etapów jest alkaliczna hydroliza hemicelulozy, która jest najmniej stabilnym chemicznie składnikiem

włókien roślinnych [47]. Rozkład hemicelulozy zwiększa porowatość ściany komórkowej i ułatwia wnikanie jonów alkalicznych w głąb włókna.

Celuloza, która jest głównym składnikiem nośnym włókien, jest bardziej odporna chemicznie, jednak przy długim kontakcie z silnie zasadowym środowiskiem także ulega stopniowej depolimeryzacji. Proces ten polega na rozrywaniu wiązań β-1,4-glikozydowych, co obniża stopień polimeryzacji łańcuchów celulozy i prowadzi do spadku wytrzymałości mechanicznej włókien [55]. Tempo tego procesu zależy od wartości pH, temperatury oraz czasu ekspozycji włókien na środowisko alkaliczne.

Lignina, mimo że jest dość odporna na hydrolizę alkaliczną, także ulega stopniowym przemianom chemicznym. W silnie zasadowym środowisku dochodzi do częściowego rozkładu jej struktur aromatycznych, co osłabia integralność ściany komórkowej i zmniejsza odporność włókien na uszkodzenia mechaniczne [40]. Degradacja ligniny sprzyja wymywaniu składników organicznych i zwiększa podatność włókien na mineralizację.

W matrycach mineralnych ważnym mechanizmem degradacji jest także mineralizacja, która polega na wnikaniu produktów reakcji matrycy do wnętrza włókna. W kompozytach cementowych i alkalicznie aktywowanych produkty reakcji stopniowo wypełniają pory ściany komórkowej, co prowadzi do usztywnienia włókna i utraty zdolności do odkształceń [39]. Zjawisko ta prowadzi do bardziej kruchego zniszczenia kompozytu oraz zmniejsza skuteczność mostkowania rys.

Degradacja chemiczna włókien naturalnych bezpośrednio wpływa na właściwości strefy przejściowej włókno-matryca. Osłabienie struktury włókna i zmiany jego powierzchni pogarszają adhezję oraz zmniejszają zdolność przenoszenia naprężeń między fazami kompozytu [56]. W efekcie dochodzi do spadku wytrzymałości na zginanie oraz zmniejszenia odporności materiału na propagację rys podczas eksploatacji.

Stopień degradacji włókien naturalnych w środowisku alkalicznym zależy od rodzaju włókna, jego składu chemicznego oraz warunków syntezy i dojrzewania kompozytu. Włókna o wysokiej zawartości celulozy i małym udziale hemicelulozy są bardziej odporne na działanie alkaliów, natomiast włókna bogate w składniki amorficzne degradują szybciej [38]. Duże znaczenie ma także gęstość i szczelność matrycy, ponieważ może ona ograniczać dyfuzję jonów alkalicznych do wnętrza włókien.

W kompozytach geopolimerowych zwraca się uwagę, że mimo wysokiego pH tempo degradacji włókien naturalnych może być niższe niż w klasycznych kompozytach cementowych. Wynika to z innej chemii matrycy, braku wolnego wodorotlenku wapnia oraz odmiennego charakteru produktów reakcji, co ogranicza mineralizację i spowalnia procesy

niszczenia włókien [57]. Mimo to trwałość włókien naturalnych nadal stanowi jedno z głównych wyzwań technologicznych i wymaga dalszych badań oraz stosowania odpowiednich metod modyfikacji włókien i matrycy.

2.3. PRZEGRODY BUDOWLANE

Przegrody budowlane mają duży wpływ na bilans energetyczny budynku, ponieważ stanowią barierę dla wymiany ciepła między wnętrzem a otoczeniem. Do przegród należą ściany zewnętrzne, dachy, stropy nad pomieszczeniami nieogrzewanymi, podłogi na gruncie oraz elementy oddzielające strefy o różnych temperaturach. Ich właściwości cieplne w dużym stopniu decydują o zapotrzebowaniu budynku na energię do ogrzewania i chłodzenia [58].

W budynkach wzniesionych w technologii tradycyjnej straty ciepła przez przegrody zewnętrzne mogą stanowić około 40-70% całkowitych strat energii cieplnej, w zależności od standardu energetycznego budynku, jego kształtu oraz lokalnych warunków klimatycznych [59]. W budynkach o podwyższonym standardzie energetycznym udział strat przez przegrody jest mniejszy, ale nadal stanowi główną część bilansu cieplnego. Największe straty ciepła przypadają zwykle na ściany zewnętrzne (20-35%), dachy i stropy (15-25%) oraz podłogi na gruncie (10-15%) [60].

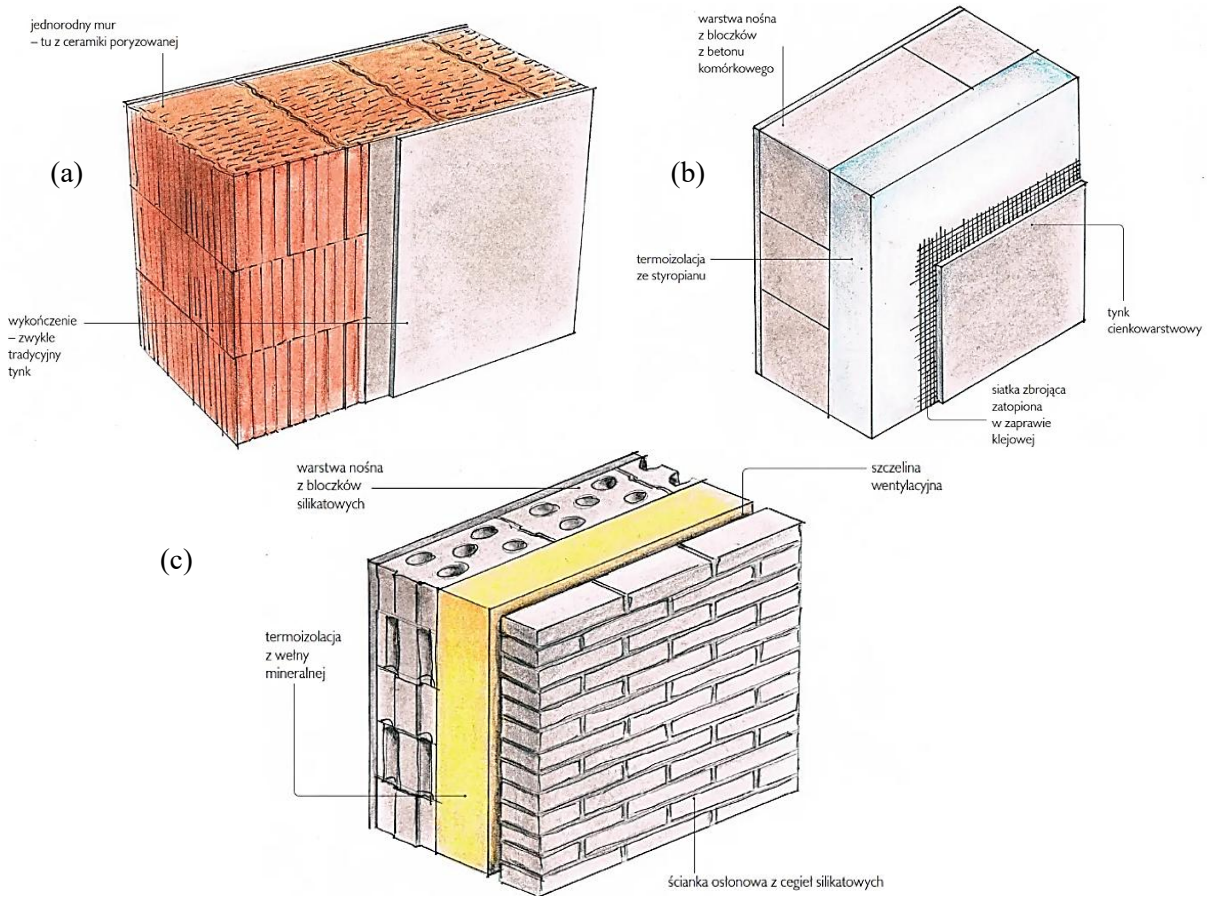
Przenikanie ciepła przez przegrodę obejmuje przewodzenie w materiałach stałych, konwekcję w warstwach powietrza oraz promieniowanie na powierzchniach granicznych. W praktyce inżynierskiej efektywność cieplną przegrody opisuje współczynnik przenikania ciepła U wyrażany w W/(m²·K). Jego wartość zależy od współczynników przewodzenia ciepła poszczególnych warstw, ich grubości oraz oporów przejmowania ciepła po obu stronach przegrody [61]. Współczesne wymagania energetyczne wymuszają stosowanie przegród o bardzo niskim współczynniku przenikania ciepła U [62]. Uzyskanie takich parametrów wymaga stosowania przegród wielowarstwowych oraz materiałów o niskim współczynniku przewodzenia ciepła, często mniejszym niż 0,040 W/(m·K).

Przegrody budowlane wpływają nie tylko na straty ciepła zimą, ale także na zyski ciepła i komfort w okresie letnim. Elementy o odpowiedniej masie i pojemności cieplnej mogą magazynować energię, opóźniać przepływ ciepła i zmniejszać wahania temperatury wewnątrz budynku. Zjawisko to nazywa się bezwładnością cieplną i ma duże znaczenie w budynkach energooszczędnych oraz pasywnych [63].

Dynamiczne zachowanie przegród opisują między innymi opóźnienie fazowe strumienia ciepła oraz współczynnik tłumienia jego amplitudy. W przegrodach o dużej bezwładności cieplnej opóźnienie może wynosić około 8-12 godzin, co pomaga ograniczyć

przegrzewanie pomieszczeń w ciągu dnia [64]. W tym kontekście coraz większą uwagę poświęca się materiałom i układom warstwowym, które łączą funkcję izolacji cieplnej z możliwością akumulacji ciepła.

Rola przegród budowlanych w bilansie energetycznym nie ogranicza się tylko do funkcji izolacyjnej. Ich właściwości cieplne, zachowanie dynamiczne oraz trwałość decydują o długoterminowej efektywności energetycznej budynku, zużyciu energii i komforcie użytkowników. Dlatego przegrody są jednym z głównych kierunków badań nad nowymi materiałami i rozwiązaniami w budownictwie energooszczędnym. Na rysunku 4 pokazano trzy podstawowe rozwiązania ścian zewnętrznych: jedno-, dwu- i trójwarstwowe. Różnią się one liczbą warstw oraz sposobem połączenia części nośnej i izolacyjnej tak, aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość, izolacyjność cieplną i wymagane parametry użytkowe [65].



Rysunek 4. *Schematy konstrukcyjne zewnętrznych ścian budynku: (a) ściana jednowarstwowa, (b) ściana dwuwarstwowa, (c) ściana trójwarstwowa [65].*

Ściana jednowarstwowa jest wykonana z jednego materiału, który musi pełnić jednocześnie funkcję nośną i izolacyjną. Aby spełnić aktualne wymagania cieplne, takie ściany

są zwykle grube, a elementy z betonu komórkowego lub ceramiki poryzowanej mają najczęściej 40-50 cm. Rozwiązanie to jest technologicznie proste, ale bardziej narażone na mostki termiczne i zazwyczaj ma słabsze parametry akustyczne niż ściany wielowarstwowe. Ściana dwuwarstwowa, często stosowana w budownictwie jednorodzinnym, składa się z warstwy nośnej o grubości około 18-25 cm oraz zewnętrznej warstwy izolacji o grubości 15-20 cm. Taki układ pozwala uzyskać lepszy współczynnik przenikania ciepła przy mniejszej całkowitej grubości przegrody. Oddzielenie funkcji nośnej i izolacyjnej zmniejsza ryzyko błędów wykonawczych i ułatwia kontrolę parametrów cieplnych. Ściana trójwarstwowa ma dodatkową warstwę osłonową umieszczoną na zewnątrz izolacji. Składa się z warstwy nośnej o grubości 18-25 cm, izolacji 15-20 cm oraz warstwy elewacyjnej o grubości 6-12 cm wykonanej z ceramiki, silikatów lub bloczków betonowych. Rozwiązanie to zapewnia najlepsze parametry cieplne i akustyczne oraz większą odporność na uszkodzenia i warunki atmosferyczne, ale jest droższe i bardziej złożone w wykonaniu [65].

Przegrody wielowarstwowe są dziś podstawowym rozwiązaniem w budownictwie mieszkaniowym i użyteczności publicznej, zwłaszcza w obiektach o podwyższonym standardzie energetycznym. Ich główną cechą jest rozdzielenie funkcji między poszczególne warstwy, co pozwala jednocześnie spełnić wymagania cieplne, mechaniczne, wilgotnościowe i użytkowe. Typowa przegroda tego typu składa się z warstwy nośnej, warstwy izolacji cieplnej oraz warstw osłonowych i wykończeniowych, a ich układ i właściwości materiałowe decydują o skuteczności całego rozwiązania [66].

Warstwa nośna odpowiada za przenoszenie obciążeń stałych i zmiennych oraz zapewnia stateczność konstrukcji. Wykonuje się ją najczęściej z betonu zwykłego lub lekkiego, ceramiki poryzowanej, silikatów albo betonu komórkowego. Materiały te mają współczynnik przewodzenia ciepła λ w zakresie około 0,20-1,80 W/(m·K) oraz dużą pojemność cieplną właściwą rzędu 800-1000 J/(kg·K), co sprzyja akumulacji ciepła w przegrodzie [67]. W praktyce warstwa nośna zwykle nie spełnia samodzielnie wymagań izolacyjności cieplnej i dlatego wymaga zastosowania dodatkowej warstwy termoizolacyjnej.

Warstwa izolacji cieplnej jest kluczowa dla ograniczenia strat energii przez przegrodę. Stosowane materiały mają niski współczynnik przewodzenia ciepła, zwykle w zakresie λ równym 0,030-0,045 W/(m·K). Najczęściej używa się polistyrenu ekspandowanego (EPS), polistyrenu ekstrudowanego (XPS) oraz wełny mineralnej [68]. Grubość warstwy izolacyjnej w nowoczesnych przegrodach zewnętrznych wynosi zwykle od 15 do 30 cm, w zależności od rodzaju materiału i wymaganej wartości współczynnika przenikania ciepła U [61].

W przegrodach wielowarstwowych rośnie znaczenie warstw odpowiedzialnych za regulację wilgotności. Warstwy paroizolacyjne i paroprzepuszczalne ograniczają dyfuzję pary wodnej oraz zmniejszają ryzyko kondensacji wewnątrz przegrody. Prawidłowy układ powinien mieć malejący opór dyfuzyjny w kierunku zewnętrznym, aby umożliwić bezpieczne odprowadzenie wilgoci [69].

Współczesne przegrody wielowarstwowe projektuje się z uwzględnieniem trwałości i odporności na warunki eksploatacji. Materiały warstw zewnętrznych muszą być odporne na zmiany temperatury, zawilgocenie, promieniowanie UV i działanie czynników atmosferycznych. Trwałość przegród ocenia się często w perspektywie czasu, co wymaga utrzymania stabilnych właściwości cieplnych i mechanicznych w czasie [70].

Ważnym kierunkiem rozwoju przegród wielowarstwowych jest łączenie funkcji konstrukcyjnych i izolacyjnych w jednym rozwiązaniu. Przykładem są ściany jednowarstwowe z materiałów o obniżonym współczynniku przewodzenia ciepła oraz przegrody hybrydowe, które łączą materiały o wysokiej wytrzymałości z warstwami o właściwościach termoizolacyjnych lub akumulacyjnych [71]. Takie podejście pozwala zmniejszyć grubość przegród, uprościć technologię wykonania oraz ograniczyć liczbę połączeń, w których mogą powstawać mostki cieplne.

Projektowanie przegród budowlanych podlega szczegółowym wymaganiom normowym i prawnym, które mają zapewnić odpowiednią efektywność energetyczną, bezpieczeństwo użytkowania oraz trwałość budynków. Wymagania te wynikają z przepisów krajowych oraz regulacji europejskich związanych z ograniczaniem zużycia energii w budownictwie [72].

Maksymalne dopuszczalne wartości U dla przegród zewnętrznych są określone w przepisach techniczno-budowlanych. W budynkach ogrzewanych wymagania wynoszą obecnie: dla ścian zewnętrznych $U \leq 0{,}20$ W/(m²·K), dla dachów i stropodachów $U \leq 0{,}15$ W/(m²·K), dla podłóg na gruncie $U \leq 0{,}30$ W/(m²·K) oraz dla przegród oddzielających pomieszczenia ogrzewane od nieogrzewanych $U \leq 0{,}25$ W/(m²·K) [62]. Spełnienie tych wymagań jest warunkiem koniecznym do uzyskania pozwolenia na użytkowanie budynku.

Oprócz izolacyjności cieplnej przegrody muszą spełniać wymagania dotyczące ochrony przed kondensacją powierzchniową i międzywarstwową. Zgodnie z normą EN ISO 13788 temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody nie powinna powodować osiągnięcia krytycznej wilgotności względnej, zwykle przyjmowanej na poziomie 80%, ponieważ mogłoby to prowadzić do rozwoju pleśni i grzybów [69]. Analiza cieplno-wilgotnościowa przegród

jest niezbędnym elementem procesu projektowego, zwłaszcza w przypadku przegród wielowarstwowych.

Wymagania użytkowe dla przegród obejmują także trwałość i stabilność właściwości materiałów w czasie. Zgodnie z zasadami planowania trwałości budynków okres użytkowania przegród zewnętrznych powinien wynosić co najmniej 50 lat, przy zachowaniu zdolności do spełniania funkcji cieplnych, mechanicznych i ochronnych [70]. Oznacza to konieczność stosowania materiałów odpornych na cykliczne zmiany temperatury, działanie wilgoci, promieniowanie słoneczne oraz zanieczyszczenia środowiskowe.

Wymagania normowe obejmują także bezpieczeństwo pożarowe. Przegrody, w zależności od funkcji budynku i wymaganej klasy odporności pożarowej, muszą spełniać określone kryteria reakcji na ogień oraz odporności ogniowej. W przypadku przegród zewnętrznych coraz częściej wymaga się stosowania materiałów niepalnych lub trudno zapalnych, aby ograniczyć rozprzestrzenianie się ognia [73].

Przegrody powinny także zapewniać odpowiedni komfort cieplny i akustyczny. Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej są określone w normach i przepisach krajowych i obejmują ochronę przed hałasem zewnętrznym oraz ograniczenie przenoszenia dźwięków między pomieszczeniami [74]. Właściwości akustyczne przegród zależą w dużym stopniu od ich masy powierzchniowej, układu warstw oraz szczelności połączeń.

Współczesne wymagania normowe coraz częściej uwzględniają zasady zrównoważonego rozwoju i efektywności środowiskowej. Przegrody ocenia się nie tylko pod względem parametrów użytkowych, ale także wpływu na środowisko w całym cyklu życia budynku. Z tego względu rośnie znaczenie materiałów trwałych, energooszczędnych i pozwalających ograniczyć zużycie energii pierwotnej [75].

2.4. MECHANIZMY PRZENIKANIA CIEPŁA

Transport ciepła w materiałach budowlanych i inżynierskich odbywa się przez przewodzenie, konwekcję oraz promieniowanie. W praktyce mechanizmy te występują jednocześnie, a ich udział zależy od struktury materiału, jego właściwości fizycznych oraz warunków brzegowych wymiany ciepła [58].

Przewodzenie ciepła jest głównym mechanizmem transportu energii w materiałach stałych i polega na przekazywaniu energii między cząstkami w wyniku różnicy temperatur. W skali makro zjawisko to opisuje prawo Fouriera, które mówi, że gęstość strumienia ciepła jest proporcjonalna do gradientu temperatury i współczynnika przewodzenia ciepła λ. Współczynnik λ jest cechą materiału i w budownictwie może wynosić od około

0,030-0,040 W/(m·K) dla materiałów izolacyjnych do ponad 1,5 W/(m·K) dla zwartych materiałów mineralnych, takich jak beton czy ceramika [76].

Na poziomie mikrostruktury przewodzenie ciepła w ciałach stałych odbywa się głównie przez drgania sieci krystalicznej, czyli fonony, a w materiałach przewodzących także przez ruch elektronów. W materiałach amorficznych i porowatych mechanizm ten jest mniej efektywny, ponieważ fonony ulegają rozpraszaniu na granicach faz i w porach [77]. Zjawisko to ma duże znaczenie przy projektowaniu materiałów o obniżonej przewodności cieplnej.

Konwekcja ciepła polega na przenoszeniu energii wraz z ruchem cieczy lub gazu. W materiałach budowlanych może zachodzić w porach wypełnionych powietrzem lub wilgocią, jeśli ich rozmiar pozwala na swobodny ruch medium. W małych porach o średnicy poniżej kilku milimetrów konwekcja naturalna jest zwykle silnie ograniczona lub całkowicie tłumiona, co sprzyja obniżeniu efektywnej przewodności cieplnej [78]. Dlatego materiały o drobnej i zamkniętej porowatości mają dobre właściwości termoizolacyjne.

Promieniowanie cieplne jest trzecim mechanizmem transportu energii i polega na emisji oraz pochłanianiu fal elektromagnetycznych w zakresie podczerwieni. W materiałach stałych jego udział jest zwykle niewielki, jednak w materiałach porowatych i w warstwach powietrza może mieć większe znaczenie, zwłaszcza przy podwyższonej temperaturze [79]. Intensywność promieniowania zależy od temperatury bezwzględnej oraz od właściwości radiacyjnych powierzchni, takich jak emisyjność.

W praktyce transport ciepła w materiałach i przegrodach jest wynikiem jednoczesnego działania przewodzenia, konwekcji i promieniowania. W materiałach jednorodnych o zwartej strukturze dominuje przewodzenie, natomiast w materiałach porowatych i układach wielowarstwowych istotne znaczenie mają także konwekcja i promieniowanie w porach oraz na granicach warstw [80]. Zrozumienie zależności między tymi mechanizmami jest podstawą analizy przenikania ciepła w materiałach kompozytowych i układach warstwowych.

W rzeczywistych układach transport ciepła między dwoma stykającymi się ciałami stałymi jest ograniczony przez opór kontaktowy, określany jako thermal contact resistance. Zjawisko to wynika z mikro- i nanometrycznej chropowatości powierzchni, przez co rzeczywisty kontakt zachodzi tylko w nielicznych punktach. Przestrzenie między nierównościami są zwykle wypełnione powietrzem lub innym medium o niskiej przewodności cieplnej, co zwiększa całkowity opór cieplny na granicy materiałów [81].

Opór kontaktowy definiuje się jako stosunek skoku temperatury na granicy dwóch materiałów do gęstości strumienia ciepła przepływającego przez to połączenie (2):

$$R_{tc} = \frac{\Delta T}{q} [\frac{m^2 \cdot K}{W}] \tag{2}$$

gdzie R_{tc} oznacza opór kontaktowy [(m²·K)/W], ΔT - różnicę temperatur po obu stronach styku [K], a q - gęstość strumienia ciepła [W/m²]. Kontakt cieplny można też opisać za pomocą współczynnika przewodzenia kontaktowego h_c, który jest odwrotnością oporu kontaktowego (3):

$$R_{tc} = \frac{1}{h_c} [\frac{m^2 \cdot K}{W}] \tag{3}$$

Wartość współczynnika h_c zależy od właściwości materiałów, chropowatości powierzchni oraz siły docisku. Dla gładkich powierzchni metalicznych h_c może wynosić rzędu 10^4-10^5 W/(m²·K), natomiast dla materiałów mineralnych, porowatych i kompozytowych typowe wartości mieszczą się w zakresie 10^2-10^3 W/(m²·K) [81,82].

Klasyczne modele oporu kontaktowego, rozwijane między innymi przez Yovanovicha, opisują zależność współczynnika przewodzenia kontaktowego od nacisku oraz właściwości mechanicznych materiałów przy użyciu zależności empirycznych (4):

$$h_c = C \cdot k_{eff} \cdot (\frac{p}{H})^m [\frac{W}{m^2 \cdot K}] \tag{4}$$

gdzie k_{eff} jest efektywną przewodnością cieplną stykających się materiałów, p oznacza nacisk kontaktowy, H - twardość materiału, natomiast C i m są współczynnikami empirycznymi, przy czym wykładnik m przyjmuje zazwyczaj wartości z zakresu 0.5-1 [82]. Zależność ta pokazuje, że większy nacisk zwiększa rzeczywistą powierzchnię styku, co prowadzi do zmniejszenia oporu kontaktowego.

W badaniach doświadczalnych obserwuje się jednak odstępstwa od tej zależności, określane jako zjawisko paradoksu oporu kontaktowego (ang. thermal contact resistance paradox). Zjawisko to polega na tym, że dalsze zwiększanie nacisku nie powoduje proporcjonalnego spadku oporu cieplnego, a w niektórych przypadkach może nawet prowadzić do jego wzrostu [83]. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w materiałach porowatych

i kompozytowych, gdzie większy docisk prowadzi do zgniatania porów, deformacji mikrostruktury oraz ograniczenia liczby ciągłych ścieżek przewodzenia ciepła.

Całkowity opór kontaktowy można traktować jako sumę oporu wynikającego z bezpośredniego styku faz stałych oraz oporu związanego ze szczelinami wypełnionymi medium pośrednim (5):

$$R_{tc} = R_{solid-solid} + R_{gap}[\frac{m^2 \cdot K}{W}] \tag{5}$$

Opór cieplny szczelin zależy głównie od przewodności cieplnej medium, które je wypełnia. W przypadku powietrza, którego współczynnik przewodzenia ciepła w temperaturze pokojowej wynosi około 0,026 W/(m·K), nawet szczeliny o grubości kilku mikrometrów mogą wyraźnie zwiększać całkowity opór cieplny styku. Zależność tę można opisać odpowiednią relacją (6):

$$R_{gap} = \frac{\delta}{k_{air}}[\frac{m^2 \cdot K}{W}] \tag{6}$$

gdzie δ oznacza efektywną grubość szczeliny [58]. Zastąpienie powietrza medium o większej przewodności cieplnej, na przykład wilgocią, zwykle obniża opór kontaktowy, co potwierdza istotną rolę fazy pośredniej w zjawisku thermal contact resistance.

W analizie transportu ciepła w układach wielowarstwowych opór kontaktowy jest istotnym składnikiem całkowitego oporu cieplnego przegrody. Dla dwóch warstw o grubościach d_1 i d_2 oraz współczynnikach przewodzenia ciepła λ_1 i λ_2 całkowity opór cieplny można przedstawić jako sumę oporów warstw oraz oporu kontaktowego na ich styku (7):

$$R_{total} = \frac{d_1}{\lambda_1} + R_{tc} + \frac{d_2}{\lambda_2}[\frac{m^2 \cdot K}{W}] \tag{7}$$

W materiałach kompozytowych i przegrodach wielowarstwowych udział oporu kontaktowego w całkowitym oporze cieplnym może wynosić od około 10 do nawet 40%, w zależności od jakości styku między warstwami oraz mikrostruktury materiału [84].

Paradoks oporu kontaktowego ma duże znaczenie przy modelowaniu przenikania ciepła w materiałach porowatych i kompozytach warstwowych. Pominięcie nieliniowego charakteru oporu kontaktowego może prowadzić do dużych różnic między wynikami obliczeń

a rzeczywistym zachowaniem cieplnym materiału, co jest szczególnie ważne w analizie nowoczesnych kompozytów o złożonej mikrostrukturze [78].

W klasycznym podejściu inżynierskim opór kontaktowy traktuje się jako dodatkowy składnik całkowitego oporu cieplnego, który zmniejsza intensywność przepływu ciepła. Założenie to jest jednak w pełni trafne głównie dla kontaktu między materiałami zwartymi, o dużej sztywności i małej podatności na deformację. W materiałach porowatych, włóknistych i w kompozytach mineralno-organicznych obserwuje się odstępstwa od tego modelu, określane jako zjawisko paradoksu oporu kontaktowego [84,85].

Paradoks ten polega na tym, że zwiększenie liczby interfejsów lub stopnia warstwowania nie zawsze podnosi całkowity opór cieplny, lecz w określonych warunkach może zwiększać efektywną przewodność cieplną układu. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w materiałach o dużej porowatości oraz w strukturach podatnych na lokalne zagęszczanie pod wpływem docisku, nasiąkania lub działania sił kapilarnych [86].

Jednym z głównych mechanizmów odpowiedzialnych za ten paradoks jest zmniejszanie się „czystego" oporu kontaktowego wraz ze wzrostem rzeczywistej powierzchni styku. W materiałach miękkich, higroskopijnych i włóknistych interfejs ulega lokalnemu zagęszczeniu, co eliminuje mikroszczeliny powietrzne i zastępuje je fazą stałą lub wilgocią o większej przewodności cieplnej. W efekcie lokalny opór cieplny maleje, a przewodzenie ciepła w strefie styku może być bardziej efektywne niż w otaczającej porowatej strukturze [67].

W kompozytach mineralno-organicznych, takich jak materiały na bazie geopolimerów i włókien naturalnych, istotną rolę odgrywają strefy przejściowe o zmienionej mikrostrukturze. Wnikanie zaczynu mineralnego w strukturę włókien prowadzi do powstawania obszarów o większej gęstości i wyższym udziale fazy mineralnej. Strefy te mają wyższą lokalną przewodność cieplną i mogą działać jak ciągłe ścieżki przewodzenia ciepła przecinające strukturę izolacyjną [87].

Efekt paradoksu nasila się w układach wielowarstwowych, gdzie każdy interfejs tworzy własną strefę przejściową o zmienionych właściwościach. Łączny wpływ wielu takich stref może prowadzić do powstania prawie ciągłej sieci przewodzącej, mimo że pojedyncze warstwy mają niską przewodność cieplną. Zjawisko to określa się jako efekt wielokrotnego interfejsu i uznaje za jedną z głównych przyczyn rozbieżności między prostymi modelami oporu szeregowego a wynikami badań eksperymentalnych [88].

Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym paradoksowi oporu kontaktowego jest wzrost udziału konwekcji i promieniowania w porach. Warstwowanie materiałów porowatych z przerwami może tworzyć połączone kanały powietrzne, w których zachodzi mikrokonwekcja

naturalna. Zwiększenie średniego rozmiaru porów sprzyja także większemu udziałowi transportu radiacyjnego, który w ujęciu makroskopowym opisuje model Rosselanda [78]. W izolacjach włóknistych wykazano, że szczeliny i przerwy między warstwami mogą zwiększać efektywną przewodność cieplną nawet o 20-40% w porównaniu z jednorodną, ciągłą warstwą materiału [89].

Z tych powodów pojedyncza, ciągła warstwa materiału porowatego może mieć lepsze właściwości izolacyjne niż kilka warstw oddzielonych interfejsami. Mniejsza liczba stref przejściowych, brak ciągłych mostków mineralnych i ograniczenie mikrokonwekcji sprzyjają utrzymaniu niskiej efektywnej przewodności cieplnej. Zjawisko paradoksu oporu kontaktowego należy więc uwzględniać przy interpretacji wyników badań nad transportem ciepła w kompozytach warstwowych oraz przy ich projektowaniu [84,90].

Materiały porowate i kompozyty wielofazowe mają złożony mechanizm transportu ciepła, ponieważ zawierają fazę stałą, gazową lub ciekłą oraz liczne granice międzyfazowe. W odróżnieniu od materiałów jednorodnych, gdzie przewodzenie odbywa się głównie w jednej fazie, w strukturach porowatych strumień ciepła rozdziela się na kilka równoległych i szeregowych ścieżek, co utrudnia jego opis [78].

Efektywną przewodność cieplną materiału porowatego charakteryzuje się współczynnikiem λ_{eff}, który uwzględnia łączny udział wszystkich mechanizmów transportu ciepła. W najprostszym modelu dwufazowym, przy założeniu równoległego przepływu przez fazę stałą i fazę wypełniającą pory, λ_{eff} można wyrazić jako sumę udziałów obu faz ważoną ich udziałem objętościowym (8):

$$\lambda_{eff} = (1 - \phi)\lambda_s + \phi\lambda_f \tag{8}$$

gdzie ϕ oznacza porowatość materiału, λ_s - współczynnik przewodzenia ciepła fazy stałej, natomiast λ_f - przewodność cieplna fazy wypełniającej pory, najczęściej powietrza lub wody [91]. Zależność ta pokazuje, że wzrost porowatości obniża efektywną przewodność cieplną tylko wtedy, gdy pory są wypełnione medium o niskiej wartości λ_f.

W rzeczywistych materiałach porowatych transport ciepła obejmuje nie tylko przewodzenie w fazie stałej i gazowej, ale także konwekcję i promieniowanie w porach. Udział konwekcji zależy głównie od rozmiaru i połączenia porów. W porach mniejszych niż kilka milimetrów konwekcja naturalna jest zwykle silnie ograniczona, natomiast w większych lub połączonych porach może wyraźnie zwiększać wartość λ_{eff} [92].

Promieniowanie cieplne w materiałach porowatych ma większe znaczenie przy podwyższonej temperaturze oraz w strukturach o większych porach. W ujęciu makroskopowym jego udział opisuje się często przybliżeniem Rosselanda, w którym promieniowanie traktuje się jako dodatkowy składnik efektywnej przewodności cieplnej (9):

$$\lambda_{rad} = \frac{16\sigma T^3}{3\beta} \tag{9}$$

gdzie σ jest stałą Stefana-Boltzmanna, T - temperaturą bezwzględną, a β - współczynnikiem ekstynkcji materiału porowatego [79]. W izolacjach włóknistych transport radiacyjny może stanowić znaczącą część całkowitego strumienia ciepła, szczególnie gdy w strukturze występują szczeliny i przerwy.

W kompozytach na transport ciepła wpływa także rozmieszczenie faz oraz charakter ich interfejsów. W materiałach mineralno-organicznych i włóknistych strumień ciepła może płynąć głównie przez fazy o wyższej przewodności, tworząc lokalne ścieżki przewodzenia. Prowadzi to do anizotropii cieplnej i do różnic w przewodności mierzonej w różnych kierunkach [93].

Efektywną przewodność cieplną kompozytów opisuje się często modelami homogenizacyjnymi, takimi jak model Maxwella-Euckena oraz jego modyfikacje uwzględniające kształt i orientację wtrąceń. Dla kompozytu z rozproszoną fazą o przewodności λ_d w matrycy o przewodności λ_m model Maxwella można zapisać w odpowiedniej postaci analitycznej (10):

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \frac{\lambda_d + 2\lambda_m + 2\phi(\lambda_d - \lambda_m)}{\lambda_d + 2\lambda_m - \phi(\lambda_d - \lambda_m)} \tag{10}$$

Model ten pokazuje, że nawet mały udział fazy o wysokiej przewodności może wyraźnie zwiększać λ_{eff}, zwłaszcza gdy faza ta tworzy częściowo ciągłą sieć przewodzącą [94].

W materiałach porowatych i kompozytach wielowarstwowych duże znaczenie ma obecność wilgoci. Zastąpienie powietrza w porach wodą, której przewodność cieplna wynosi około 0,6 W/(m·K), powoduje wyraźny wzrost efektywnej przewodności cieplnej. Nawet niewielkie nasycenie porów wodą może zwiększyć λ_{eff} o kilkadziesiąt procent, co ma istotne znaczenie w praktyce budowlanej [95].

Układy wielowarstwowe są powszechnie stosowane w inżynierii materiałowej i budownictwie, zwłaszcza w przegrodach zewnętrznych, izolacjach cieplnych i kompozytach funkcjonalnych. Przenikanie ciepła w takich strukturach jest złożone, ponieważ wynika z transportu w poszczególnych warstwach oraz na ich granicach [58]. Każda warstwa

wprowadza własny opór cieplny, a dodatkowo znaczenie mają opory przejmowania ciepła oraz opory kontaktowe na granicach między warstwami.

W najprostszym modelu jednowymiarowym, przy ustalonym przepływie ciepła i braku źródeł wewnętrznych, całkowity opór cieplny układu wielowarstwowego można przedstawić jako sumę oporów poszczególnych warstw (11):

$$R_{layers} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} \tag{11}$$

gdzie d_i oznacza grubość i-tej warstwy, natomiast λ_i jej współczynnik przewodzenia ciepła. Zależność ta stanowi podstawę klasycznych metod obliczeniowych stosowanych w analizie cieplnej przegród budowlanych [61].

W rzeczywistych układach wielowarstwowych całkowity opór cieplny nie jest jedynie sumą oporów warstw. Na granicach między nimi pojawiają się dodatkowe opory kontaktowe związane z niedoskonałością styku, chropowatością powierzchni i obecnością mikroszczelin wypełnionych medium o niskiej przewodności. Po uwzględnieniu tych efektów całkowity opór cieplny układu można przedstawić jako sumę oporów warstw i oporów kontaktowych (12):

$$R_{total} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^{m} R_{c,j} \tag{12}$$

gdzie $R_{c,j}$ oznacza opór kontaktowy na j-tym interfejsie [85]. W układach z wieloma warstwami opory kontaktowe mogą stanowić znaczną część całkowitego oporu cieplnego, a ich pominięcie prowadzi do błędnego oszacowania strumienia ciepła.

W przegrodach budowlanych ważne są także opory przejmowania ciepła na powierzchniach wewnętrznych i zewnętrznych, które wynikają z konwekcji i promieniowania między przegrodą a otoczeniem. Po ich uwzględnieniu całkowity opór cieplny przegrody obejmuje opory przejmowania, opory warstw oraz opory kontaktowe (13):

$$R = R_{si} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^{m} R_{c,j} + R_{se} \tag{13}$$

gdzie R_{si} i R_{se} są odpowiednio oporami przejmowania po stronie wewnętrznej i zewnętrznej [61].

Układy wielowarstwowe mogą wykazywać zjawiska sprzężone, takie jak konwekcja w szczelinach powietrznych i promieniowanie między powierzchniami warstw. Gdy warstwy są oddzielone pustkami powietrznymi, transport ciepła obejmuje nie tylko przewodzenie, ale także konwekcję naturalną i promieniowanie, co może zwiększać efektywną przewodność cieplną całego układu [78]. Efekty te mają szczególne znaczenie w lekkich przegrodach wielowarstwowych oraz w warstwowych materiałach izolacyjnych.

W kompozytach z warstwami o różnych właściwościach cieplnych strumień ciepła może przemieszczać się głównie przez warstwy o wyższej przewodności. Powoduje to powstawanie lokalnych mostków cieplnych, które mogą wyraźnie obniżać skuteczność izolacji, nawet przy niewielkim udziale objętościowym tych warstw [96].

Wilgotność ma istotny wpływ na przenikanie ciepła w układach wielowarstwowych. Woda w porach lub na interfejsach zwiększa przewodność cieplną warstw oraz zmniejsza opór kontaktowy przez wypełnianie mikroszczelin cieczą. Może to prowadzić do wyraźnych zmian właściwości cieplnych przegrody w trakcie eksploatacji, zwłaszcza przy zmiennych temperaturach i wilgotności względnej [95].

2.5. DYREKTYWY I STRATEGIE PROEKOLOGICZNE

Efektywność energetyczna budynków jest jednym z głównych elementów polityki klimatyczno-energetycznej na poziomie Unii Europejskiej i w przepisach krajowych. Budynki zużywają około 40% energii finalnej i odpowiadają za ponad 35% emisji CO_2 w Unii Europejskiej, dlatego sektor budowlany jest kluczowy w działaniach na rzecz ograniczenia zużycia energii i emisji gazów cieplarnianych [97].

Podstawowym aktem prawnym regulującym wymagania dotyczące charakterystyki energetycznej budynków w Unii Europejskiej jest Unii Europejskiej jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE, znana jako EPBD, która była wielokrotnie nowelizowana w celu dostosowania do aktualnych celów klimatycznych UE [98]. Dyrektywa ta wprowadziła obowiązek ustalania minimalnych wymagań energetycznych dla budynków nowych i poddawanych głębokiej renowacji oraz koncepcję budynków o niemal zerowym zużyciu energii (NZEB).

Zgodnie z założeniami EPBD od 2021 roku wszystkie nowe budynki w państwach członkowskich powinny spełniać standard NZEB, czyli mieć bardzo niskie zapotrzebowanie na energię, w dużej części pokrywane z odnawialnych źródeł. W praktyce wymagania te wdraża

się przez ograniczenie wskaźnika energii pierwotnej EP oraz zaostrzenie dopuszczalnych wartości współczynnika przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych [99].

W polskim systemie prawnym wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków określa przede wszystkim Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii w sprawie warunków technicznych. Dokument ten ustala maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych oraz graniczne wartości wskaźnika energii pierwotnej EP dla budynków mieszkalnych i niemieszkalnych [62].

Obowiązujące wymagania WT określają maksymalny współczynnik U dla ścian zewnętrznych na poziomie 0,20 W/(m²·K), dla dachów i stropodachów 0,15 W/(m²·K), a dla okien pionowych 0,90 W/(m²·K). Dopuszczalna wartość wskaźnika EP wynosi 70 kWh/(m²·rok) dla budynków jednorodzinnych oraz 65 kWh/(m²·rok) dla budynków wielorodzinnych [62].

Ważnym elementem systemu regulacyjnego jest obowiązek sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej, które mają zapewnić przejrzystą informację o zużyciu energii przez budynek. Dokumenty te zawierają dane o zapotrzebowaniu na energię użytkową, końcową i pierwotną oraz ocenę jakości przegród i systemów technicznych [100].

Uzupełnieniem przepisów technicznych są normy europejskie i międzynarodowe, które określają metody obliczania oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła przegród (EN ISO 6946), mostków cieplnych (ISO 10211) oraz właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów budowlanych (EN ISO 10456). Normy te stanowią podstawę do jednolitej oceny energetycznej przegród i całych budynków [61,76,96].

W dłuższej perspektywie regulacje prawne zmierzają do dalszego zaostrzania wymagań energetycznych i zwiększania znaczenia materiałów o niskim śladzie węglowym. Nowelizacje EPBD oraz inicjatywy, takie jak Europejski Zielony Ład, na potrzebę łączenia efektywności energetycznej z oceną wpływu materiałów budowlanych na środowisko w całym cyklu życia budynku [97,99].

Zrównoważony rozwój w budownictwie obejmuje działania, które mają ograniczyć wpływ sektora na środowisko, poprawić efektywność energetyczną budynków i zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych. Koncepcja ta wywodzi się z idei zrównoważonego rozwoju opisanej w raporcie Our Common Future (Raport Brundtlanda, 1987) i była następnie rozwijana w politykach Unii Europejskiej oraz ONZ [101].

Polityka Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju i efektywności energetycznej budynków opiera się na kilku kluczowych inicjatywach legislacyjnych. Jedną z najważniejszych jest pakiet „Fit for 55”, którego celem jest redukcja emisji gazów

cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu z poziomem z 1990 roku [102]. Działania te obejmują zaostrzenie wymagań w zakresie efektywności energetycznej budynków, rozwój odnawialnych źródeł energii oraz wsparcie dla innowacyjnych technologii i materiałów budowlanych.

Kolejną ważną inicjatywą jest REPowerEU, czyli plan przedstawiony przez Komisję Europejską w odpowiedzi na kryzys energetyczny i geopolityczny, którego celem jest zwiększenie niezależności energetycznej UE poprzez przyspieszenie rozwoju odnawialnych źródeł energii, poprawę efektywności energetycznej oraz dywersyfikację dostaw energii [103]. W odniesieniu do budownictwa REPowerEU wskazuje na potrzebę przyspieszenia renowacji istniejących budynków oraz zwiększenia udziału energii odnawialnej w pokrywaniu zapotrzebowania na ogrzewanie i chłodzenie.

Podstawowym dokumentem w obszarze efektywności energetycznej budynków jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD), która stanowi podstawę krajowych przepisów dotyczących m.in. maksymalnych wartości współczynnika przenikania ciepła U oraz wskaźnika zapotrzebowania na energię pierwotną EP [72]. Dyrektywa ta została zaktualizowana między innymi przez dyrektywę (EU) 2018/844, która wzmocniła jej zapisy i utrwaliła koncepcję budynków o niemal zerowym zużyciu energii (NZEB) jako standard dla nowych obiektów [99].

Strategie zrównoważonego budownictwa realizuje się także poprzez systemy certyfikacji, takie jak LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) czy DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen). Systemy te oceniają m.in. efektywność energetyczną, zużycie wody, jakość środowiska wewnętrznego, dobór materiałów i gospodarkę odpadami, co pozwala na całościową ocenę wpływu budynku na środowisko [104]. Strategie zrównoważonego rozwoju koncentrują się na kilku kluczowych obszarach:

- Projektowanie energooszczędne - obejmuje optymalizację kształtu bryły budynku, orientację względem słońca, minimalizację strat ciepła oraz efektywne wykorzystanie naturalnych źródeł oświetlenia i ciepła [60].
- Materiały o niskim śladzie węglowym - dobór materiałów o niskich emisjach związanych z produkcją, transportem i serwisowaniem, w tym materiałów pochodzących z recyklingu lub zasobów lokalnych [105].
- Integracja odnawialnych źródeł energii - instalowanie systemów fotowoltaicznych, pomp ciepła, kolektorów słonecznych, a także magazynów energii, co sprzyja redukcji emisji i niezależności energetycznej budynku [106].

- Zarządzanie zasobami - optymalizacja zużycia wody, systemy odzysku wody deszczowej, gospodarka odpadami i zarządzanie energią w cyklu życia obiektu [75].
- Jakość środowiska wnętrzowego - zapewnienie wysokiej jakości powietrza, komfort cieplny i akustyczny, co pozytywnie wpływa na zdrowie i dobrostan użytkowników [107].

Strategie zrównoważonego rozwoju obejmują cały cykl życia budynku - od projektowania, przez realizację, użytkowanie, aż po demontaż i recykling. Podejście to jest zgodne z metodą Life Cycle Assessment (LCA), która umożliwia ocenę wpływu materiałów i rozwiązań budowlanych na środowisko w całym cyklu życia obiektu [75,108]. LCA uwzględnia m.in. emisje gazów cieplarnianych, zużycie energii pierwotnej, wykorzystanie zasobów oraz potencjalne skutki dla zdrowia i ekosystemów.

Rysunek 5 pokazuje strategię zrównoważonego rozwoju w budownictwie w formie piramidy. Najniższy poziom obejmuje racjonalne wykorzystanie surowców oraz ograniczanie ilości odpadów i gospodarkę wodną. Kolejny poziom dotyczy stosowania materiałów przyjaznych środowisku oraz wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Na szczycie znajduje się projektowanie energooszczędne jako główny cel funkcjonalny. Cała koncepcja opiera się na trzech filarach zrównoważonego rozwoju, czyli ochronie środowiska, efektywności ekonomicznej oraz odpowiedzialności społecznej. Taki układ pokazuje, że projektowanie i realizacja budynków wymagają podejścia łączącego kwestie techniczne, środowiskowe i społeczne [102].



Rysunek 5. *Schemat hierarchii strategii zrównoważonego rozwoju w budownictwie (na podstawie [102]).*

Materiały glinokrzemianowe aktywowane alkalicznie, nazywane geopolimerami, mają coraz większe znaczenie w działaniach proekologicznych w budownictwie i inżynierii materiałowej. Ich rola wynika z dobrych właściwości użytkowych oraz z możliwości ograniczenia wpływu budownictwa na środowisko. Produkcja tradycyjnego cementu wiąże się z wysoką emisją dwutlenku węgla oraz dużym zużyciem energii. Geopolimery pozwalają tę emisję wyraźnie zmniejszyć. W warunkach coraz bardziej restrykcyjnych regulacji klimatycznych materiały te zyskują na znaczeniu. Dotyczy to między innymi polityk takich jak Europejski Zielony Ład, Fit for 55 oraz REPowerEU. W tym kontekście geopolimery są postrzegane jako realna alternatywa dla tradycyjnych spoiw cementowych [102,109].

Jednym z głównych argumentów za stosowaniem geopolimerów w budownictwie proekologicznym jest możliwość wyraźnego ograniczenia emisji dwutlenku węgla. Produkcja cementu portlandzkiego odpowiada za około 7-8% światowych emisji CO_2 pochodzenia antropogenicznego. Emisje te wynikają przede wszystkim z dekarbonizacji surowców wapiennych oraz z dużego zużycia energii podczas procesu wypalania klinkieru. W przypadku materiałów geopolimerowych emisja CO_2 może być niższa nawet o 40-80%. Skala redukcji zależy od rodzaju zastosowanego prekursora, sposobu prowadzenia syntezy oraz źródła energii użytej w procesie produkcji [110,111].

Ważnym aspektem środowiskowym jest możliwość wykorzystania surowców wtórnych i odpadów jako prekursorów geopolimerów. Popioły lotne, żużle wielkopiecowe oraz odpady ceramiczne, które w tradycyjnych rozwiązaniach są problemem środowiskowym, mogą zostać przetworzone na pełnowartościowe materiały wiążące. Takie rozwiązanie ogranicza ilość składowanych odpadów i zmniejsza zużycie surowców naturalnych. Podejście to jest zgodne z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym, czyli circular economy. Model ten jest jednym z kluczowych elementów strategii Unii Europejskiej dotyczących transformacji sektora budowlanego [112].

Z punktu widzenia użytkowania budynków materiały glinokrzemianowe wyróżniają się wysoką odpornością chemiczną oraz dobrą stabilnością w podwyższonych temperaturach. Są także odporne na działanie środowisk agresywnych, takich jak roztwory soli czy kwasy. Dzięki temu elementy wykonane z tych materiałów mogą pracować dłużej bez utraty właściwości. Dłuższa trwałość oznacza rzadsze naprawy i wymiany. W efekcie zmniejsza się zużycie surowców i energii w całym cyklu życia budynku [113].

W kontekście efektywności energetycznej budynków ważna jest możliwość kształtowania właściwości cieplnych materiałów glinokrzemianowych. Parametry te można zmieniać poprzez modyfikację mikrostruktury oraz składu surowcowego. Istotne jest także

wprowadzanie dodatków porotwórczych lub włókien naturalnych. Takie działania pozwalają obniżyć przewodność cieplną kompozytu. Dzięki temu materiał może pełnić funkcję przegrody o lepszych właściwościach termoizolacyjnych. Jednocześnie możliwe jest zachowanie wymaganej nośności i trwałości elementu [3].

Materiały glinokrzemianowe są zgodne z rozwiązaniami niskoemisyjnymi oraz systemami opartymi na odnawialnych źródłach energii. Charakteryzują się dobrą stabilnością w podwyższonych temperaturach. Wykazują także odporność na długotrwałe oddziaływanie ciepła. Dzięki temu mogą być stosowane w budynkach energooszczędnych i pasywnych. W takich obiektach ważne są nie tylko parametry izolacyjne przegród, ale również ich zdolność do magazynowania ciepła. Właściwości te sprzyjają stabilizacji temperatury wewnątrz budynku i ograniczeniu zużycia energii [12]. Wyniki analiz LCA pokazują, że dobrze zaprojektowane systemy glinokrzemianowe mogą mieć wyraźnie niższy ślad węglowy niż tradycyjne materiały cementowe. W wielu przypadkach notuje się także mniejsze zużycie energii pierwotnej. Różnice te są szczególnie widoczne wtedy, gdy jako prekursory stosuje się lokalne surowce odpadowe. Skrócenie transportu dodatkowo ogranicza emisje związane z produkcją. Dzięki temu całkowity wpływ materiału na środowisko w cyklu życia może być istotnie mniejszy [75].

Materiały glinokrzemianowe są istotnym elementem strategii proekologicznych w budownictwie. Pozwalają ograniczać emisję gazów cieplarnianych oraz efektywnie wykorzystywać surowce wtórne. Charakteryzują się także wysoką trwałością i dobrymi właściwościami użytkowymi. Ich stosowanie wspiera realizację celów klimatycznych i energetycznych Unii Europejskiej. Rozwiązania te wpisują się w długofalową zmianę sektora budowlanego w kierunku technologii bardziej zrównoważonych i odpornych na obciążenia środowiskowe.

3. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATYKI BADAWCZEJ

Współczesne budownictwo musi jednocześnie spełniać coraz ostrzejsze wymagania dotyczące efektywności energetycznej, ograniczenia wpływu na środowisko oraz zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa obiektów. Sektor ten zużywa około 40% energii końcowej w skali globalnej. Odpowiada także za ponad jedną trzecią emisji dwutlenku węgla na świecie. Z tego powodu jest jednym z głównych obszarów działań w polityce klimatycznej Unii Europejskiej oraz innych regionów świata [97]. W odpowiedzi na te wyzwania rozwija się strategie mające na celu zmniejszenie zużycia energii w budynkach. Coraz większy nacisk kładzie się na stosowanie materiałów i technologii o niższym wpływie na środowisko. Działania te obejmują zarówno etap projektowania, jak i wykonawstwa. Ważne jest także uwzględnianie całego cyklu życia budynku. Celem jest ograniczenie emisji oraz zużycia zasobów przy zachowaniu wymaganych parametrów użytkowych.

Jednym z ważnych kierunków badań jest poszukiwanie materiałów, które mogłyby częściowo zastąpić tradycyjne spoiwa cementowe. Produkcja cementu wiąże się z wysoką emisją CO_2 oraz dużym zużyciem energii. Z tego powodu rośnie zainteresowanie materiałami o niższym śladzie środowiskowym. Szczególną uwagę zwracają materiały glinokrzemianowe aktywowane alkalicznie, czyli geopolimery. Wykazują one potencjał do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Umożliwiają także wykorzystanie surowców wtórnych i odpadów jako składników wiążących [110,113]. Dotychczasowe badania pokazują, że dobrze zaprojektowane systemy geopolimerowe mogą osiągać właściwości mechaniczne porównywalne z materiałami cementowymi. W wielu przypadkach notuje się także wyższą odporność na czynniki chemiczne i podwyższoną temperaturę. Trwałość takich materiałów może być równie dobra lub lepsza niż w przypadku tradycyjnego betonu. Jednocześnie ich wytwarzanie wiąże się z mniejszym obciążeniem dla środowiska. Oznacza to możliwość łączenia wysokich parametrów użytkowych z niższym śladem węglowym [3].

Rosnące znaczenie zrównoważonego rozwoju w budownictwie zwiększa zainteresowanie materiałami pochodzenia naturalnego. Dotyczy to także włókien roślinnych stosowanych jako składniki kompozytów. Włókna takie jak len, konopie czy juta mają niski ślad węglowy. Są surowcem odnawialnym i wykazują dobre właściwości izolacyjne. Ich dodatek do kompozytów mineralnych pozwala ograniczyć zużycie surowców pierwotnych. Takie rozwiązania są zgodne z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym [37]. Jednocześnie łączenie włókien naturalnych z matrycami nieorganicznymi wiąże się z wieloma problemami technicznymi. Pojawiają się trudności związane z kompatybilnością chemiczną obu faz.

Istotnym zagadnieniem jest także trwałość włókien w środowisku alkalicznym. Duże znaczenie ma wpływ mikrostruktury na przyczepność na granicy faz. Czynniki te bezpośrednio kształtują właściwości mechaniczne i użytkowe kompozytu [38]. Zastosowanie geopolimerów jako matryc nieorganicznych może zwiększyć odporność kompozytu na działanie ognia. Materiały te charakteryzują się wysoką stabilnością w podwyższonych temperaturach. Nie ulegają gwałtownemu spalaniu ani topnieniu jak wiele tworzyw organicznych. Dzięki temu mogą chronić włókna przed bezpośrednim działaniem płomieni. Takie właściwości ułatwiają spełnienie obowiązujących wymagań i norm przeciwpożarowych.

Przy projektowaniu przegród o wysokiej efektywności energetycznej kluczowe jest zrozumienie mechanizmów przenikania ciepła w materiałach porowatych, kompozytach oraz układach wielowarstwowych. Przepływ ciepła zależy od przewodzenia w fazie stałej, transportu w porach oraz promieniowania w pustkach powietrznych. Wiele modeli obliczeniowych zakłada jednorodność materiału oraz idealny kontakt między warstwami. Takie uproszczenia nie oddają w pełni warunków rzeczywistych. W rzeczywistych kompozytach duże znaczenie mają zjawiska zachodzące na poziomie mikro- i mezostruktury. Istotną rolę odgrywa opór cieplny na granicy faz oraz obecność stref przejściowych o zmienionych właściwościach. Czynniki te mogą wyraźnie wpływać na rzeczywistą wartość współczynnika przewodzenia ciepła [78,95].

W tym kontekście istotne jest zjawisko określane jako paradoks oporu kontaktowego. Zakłada się zwykle, że większa liczba granic między warstwami zwiększa opór cieplny całego układu. Badania pokazują jednak, że zależność ta nie zawsze jest liniowa. W określonych warunkach wzrost liczby styków może prowadzić do zwiększenia efektywnej przewodności cieplnej. Zjawisko to ma duże znaczenie w materiałach porowatych oraz kompozytach mineralno-organicznych. Lokalna reorganizacja mikrostruktury może sprzyjać tworzeniu ciągłych ścieżek przewodzenia ciepła. Takie mostki cieplne zmieniają rzeczywisty bilans transportu energii w materiale [86]. Mimo rosnącej liczby badań eksperymentalnych zagadnienie to nadal nie jest w pełni opisane w odniesieniu do kompozytów geopolimerowych z dodatkiem włókien naturalnych. Brakuje spójnych modeli uwzględniających rzeczywistą mikrostrukturę takich materiałów. Ograniczona jest także liczba danych dotyczących oporu kontaktowego na granicy włókno-matryca. Utrudnia to jednoznaczną ocenę ich właściwości cieplnych. Konieczne są dalsze badania łączące analizę eksperymentalną z modelowaniem numerycznym.

Dodatkowym powodem podjęcia tej tematyki jest konieczność dostosowania materiałów do obecnych i planowanych regulacji dotyczących efektywności energetycznej budynków. Dotyczy to między innymi dyrektywy Energy Performance of Buildings Directive oraz pakietu Fit for 55. Znaczenie ma także inicjatywa REPowerEU. Dokumenty te wskazują na potrzebę dalszego ograniczania zużycia energii pierwotnej w budynkach. Podkreślają również konieczność stosowania materiałów o niskim śladzie węglowym. Ważnym celem jest także poprawa parametrów cieplnych przegród budowlanych [102,103]. Osiągnięcie tych celów wymaga dokładnego poznania zależności między składem materiału a jego właściwościami cieplnymi. Konieczne jest określenie, jak udział poszczególnych składników wpływa na przewodność cieplną. Ważne jest także zrozumienie roli porowatości oraz struktury wewnętrznej. Analiza tych czynników pozwala lepiej projektować nowe kompozyty. Bez takiej wiedzy trudno świadomie kształtować ich parametry użytkowe.

W tej sytuacji podjęcie badań nad mechanizmami przenikania ciepła w warstwowych kompozytach na bazie glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie oraz włókien naturalnych jest uzasadnione. Tematyka ta odpowiada na aktualne wyzwania naukowe związane z opisem transportu ciepła w złożonych strukturach. Ma także znaczenie praktyczne z punktu widzenia projektowania przegród budowlanych. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia procesów transportu ciepła w złożonych strukturach kompozytowych. Wiedza ta może zostać wykorzystana przy opracowywaniu nowych materiałów kompozytowych. W efekcie możliwe będzie tworzenie rozwiązań wspierających rozwój budownictwa energooszczędnego i bardziej zrównoważonego.

4. TEZA I CELE PRACY

Bazując na przeprowadzonej analizie literatury oraz ocenie aktualnego stanu wiedzy, sfomułowano następującą tezę naukową pracy:

„Materiały geopolimerowe, dzięki swojej nieorganicznej i ogniotrwałej strukturze, mogą pełnić skuteczną funkcję ochronną wobec naturalnych włókien roślinnych stosowanych w przegrodach budowlanych jako izolacje, ograniczając ich degradację termiczną oraz podatność na zniszczenie w warunkach podwyższonych temperatur i oddziaływania pożaru. Jednocześnie odpowiednie zaprojektowanie wielowarstwowego układu izolacyjnego, w którym ta sama ilość materiału włóknistego jest rozdzielona na kilka warstw o mniejszej grubości, prowadzi do poprawy właściwości izolacyjnych całej zaprojektowanej przegrody w porównaniu z rozwiązaniami dwuwarstwowymi. Efekt ten wynika z występowania dodatkowego oporu cieplnego na styku poszczególnych warstw materiałowych (oporu kontaktowego), który ogranicza transport ciepła oraz intensyfikuje rozpraszanie strumienia cieplnego. W konsekwencji, wielowarstwowe przegrody budowlane na bazie geopolimerów z izolacją z włókien naturalnych umożliwiają osiągnięcie wyższej efektywności termicznej oraz zwiększonego poziomu bezpieczeństwa pożarowego bez konieczności zwiększania całkowitej ilości materiału izolacyjnego.”

Celem naukowym rozprawy doktorskiej było doświadczalne określenie wpływu sposobu rozmieszczenia warstwy izolacyjnej z włókien naturalnych, w szczególności jej podziału na kilka warstw o mniejszej grubości, na właściwości izolacyjne wielowarstwowej przegrody budowlanej na bazie materiałów geopolimerowych. Badania ukierunkowano na identyfikację i ocenę roli oporu kontaktowego występującego na styku poszczególnych warstw materiałowych oraz na weryfikację, czy efekt ten prowadzi do poprawy parametrów izolacyjnych przegrody, czy też, zgodnie z tzw. paradoksem oporu kontaktowego, może powodować ich pogorszenie w wyniku intensyfikacji transportu ciepła na granicach fazowych.

Istotnym elementem celu naukowego było wypełnienie luki badawczej polegającej na braku systematycznych badań dotyczących wpływu wielowarstwowego układu izolacji z włókien naturalnych w przegrodach geopolimerowych, gdyż dotychczasowe prace koncentrowały się głównie na rozwiązaniach monowarstwowych oraz na materiałach opartych na cementach konwencjonalnych. W ramach pracy przeprowadzono kompleksowe badania

właściwości i analizę możliwości zastosowania włókien naturalnych jako zrównoważonych materiałów izolacyjnych w kompozytach geopolimerowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich efektywności izolacyjnej oraz odporności na degradację w warunkach oddziaływania wysokich temperatur i pożaru w obecności geopolimerowych osłon. Celem było wykazanie, że matryca geopolimerowa, dzięki swoim właściwościom nieorganicznym i ogniotrwałym, może stanowić skuteczniejszą ochronę dla materiałów włóknistych pochodzenia naturalnego w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami opartymi na betonach cementowych.

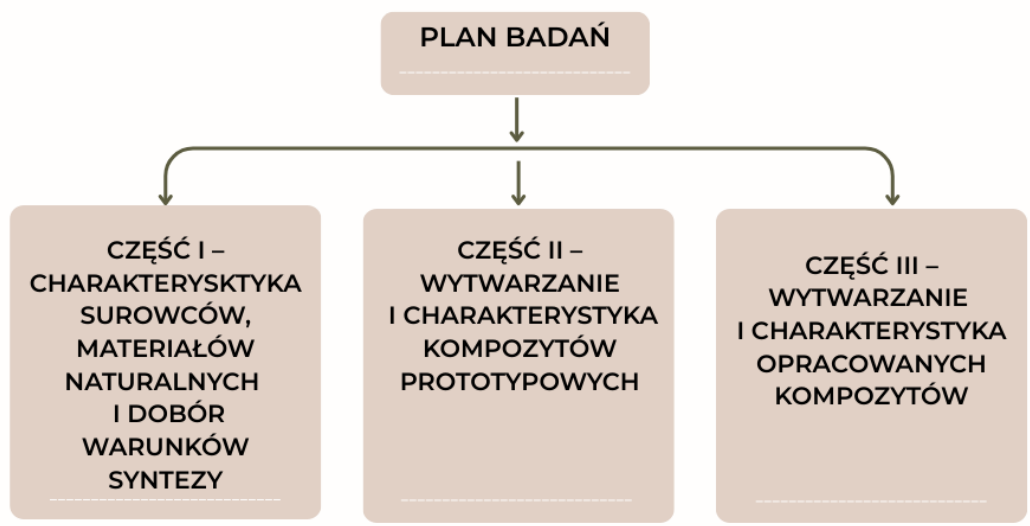
Celem utylitarnym rozprawy doktorskiej było opracowanie oraz weryfikacja koncepcji materiałowo-konstrukcyjnej wielowarstwowych przegród budowlanych, stanowiących realną i funkcjonalną alternatywę dla konwencjonalnych rozwiązań opartych na cementach portlandzkich oraz izolacjach z tworzyw sztucznych lub wełny mineralnej. Zaproponowane rozwiązanie oparto na synergicznym połączeniu materiałów odnawialnych i biodegradowalnych, z geopolimerami wytwarzanymi na bazie surowców odpadowych, uznawanymi za materiały o obniżonym śladzie węglowym i wysokim potencjale środowiskowym.

Pomimo wielowiekowej historii stosowania materiałów włóknistych jako izolacji termicznych, ich współczesne wdrożenie napotyka istotne bariery technologiczne i regulacyjne, z których jedną z kluczowych są wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego. W ramach pracy przyjęto założenie, że geopolimery, charakteryzujące się znacznie wyższą odpornością ogniową oraz stabilnością termiczną w porównaniu z betonami konwencjonalnymi, mogą stanowić efektywną matrycę ochronną umożliwiającą bezpieczne zastosowanie włókien naturalnych w przegrodach budowlanych.

Całość badań i rozwiązań technologicznych została ukierunkowana na możliwość implementacji w warunkach przemysłowych, ze szczególnym uwzględnieniem procesów prefabrykacji. W tym celu opracowano układ konstrukcyjny kompozytów warstwowych z zastosowaniem dedykowanych przekładek dystansowych, zapewniających powtarzalność i kontrolę grubości poszczególnych warstw izolacyjnych, oraz prętów kompozytowych pełniących funkcję elementów stabilizujących i przenoszących obciążenia mechaniczne. Takie podejście umożliwia skalowalność rozwiązania, jego powtarzalność produkcyjną oraz potencjalne wdrożenie w zakładach prefabrykacji elementów budowlanych (jako elementy drobnowymiarowe).

5. PLAN BADAŃ

Rysunek 6 przedstawia uproszczony schemat metodyki badań zastosowanej w pracy doktorskiej i pokazuje kolejność prowadzonych działań. Schemat porządkuje badania w trzech głównych częściach, od analizy surowców po ocenę gotowych kompozytów. Część pierwsza obejmuje charakterystykę surowców, materiałów naturalnych oraz dobór warunków syntezy matrycy geopolimerowej. Etap ten stanowi podstawę do dalszych prac i pozwala świadomie kształtować skład oraz parametry technologiczne. Część druga dotyczy wytworzenia i analizy kompozytów prototypowych. Materiały te pełniły funkcję referencyjną i umożliwiły weryfikację przyjętych założeń. Część trzecia obejmuje opracowanie docelowych kompozytów oraz ich szczegółową charakterystykę. Analizie poddano właściwości mechaniczne, cieplne, odporność na wysoką temperaturę oraz wpływ na środowisko. Cała metodyka ma charakter etapowy i sekwencyjny. Wyniki uzyskane na wcześniejszych etapach stanowiły podstawę do modyfikacji kolejnych działań. Takie podejście zapewniło spójność pracy i umożliwiło kompleksową ocenę potencjału aplikacyjnego opracowanych kompozytów geopolimerowych.



Rysunek 6. *Uproszczony schemat metodyki badań zastosowanej w niniejszej rozprawie doktorskiej.*

Rysunek 7 przedstawia schemat klasyfikacji czynników eksperymentalnych zastosowanych w planie badań. Diagram pokazuje podział zmiennych na grupy o różnym znaczeniu dla przebiegu eksperymentu. Wyróżniono czynniki materiałowe, technologiczne oraz konstrukcyjne. Taki układ pozwala jasno określić, które parametry były zmienne, a które utrzymano na stałym poziomie. Ułatwia to kontrolę warunków prowadzenia badań. Zapewnia także możliwość rzetelnego porównania uzyskanych wyników.



Rysunek 7. *Schematyczne ujęcie klasyfikacji czynników eksperymentalnych.*

Czynniki wejściowe:

x_1 - skład chemiczny matrycy glinokrzemianowej,

x_2 - rodzaj włókien naturalnych,

x_3 - zawartość i rozmieszczenie włókien w warstwie,

x_4 - liczba granic międzywarstwowych (liczba styków),

x_5 - sposób formowania warstw,

x_6 - warunki dojrzewania (czas, temperatura, wilgotność),

x_7 - gradient temperatury,

x_8- metody pomiaru,

x_9 - geometria i wymiary próbek.

Czynniki wyjściowe:

y_1 - współczynnik przewodzenia ciepła λ,

y_2 - dyfuzyjność cieplna a,

y_3 - pojemność cieplna C_v,

y_4 - udział oporu kontaktowego R_k w oporze całkowitym,

y_5 - nieliniowa zależność R od liczby warstw (objaw paradoksu oporu kontaktowego).

Czynniki zakłócające:

h_1 - niejednorodność kontaktu między warstwami,

h_2 - mikroszczeliny powietrzne na granicy faz,

h_3 - zmienna rzeczywista powierzchnia styku,

h_4 - sorpcja/desorpcja wilgoci przez włókna naturalne,

h_5 - pęcznienie i skurcz włókien,

h_6 - anizotropia strukturalna mat włóknistych.

6. METODYKA BADAŃ

6.1. Obrazowanie metodą skaningowej mikroskopii elektronowej wraz z identyfikacją składu pierwiastkowego

Do analizy morfologii powierzchni oraz składu pierwiastkowego materiałów bazowych i włókien naturalnych wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy JEOL IT200 (JEOL, Akishima, Tokio, Japonia). Analizę składu pierwiastkowego metodą EDS przeprowadzono wyłącznie dla materiałów bazowych przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych, natomiast w przypadku włókien naturalnych ograniczono się do oceny ich struktury oraz tekstury powierzchni. Próbki do badań SEM przygotowano poprzez pobranie niewielkich fragmentów materiałów, które następnie oczyszczono z pyłu i drobnych cząstek powstałych w trakcie procesu separacji. Tak przygotowane próbki umieszczono na węglowych dyskach montażowych i przymocowano do metalowych stolików w komorze mikroskopu. W celu poprawy adhezji próbek oraz zapewnienia odpowiedniego przewodnictwa elektrycznego zastosowano klej węglowy EM-Tec C33. Dodatkowo powierzchnię próbek pokryto cienką warstwą złota przy użyciu próżniowego systemu napylania DII-29030SCTR Smart Coater (JEOL Ltd., MA, USA).

6.2. Obrazowanie przy użyciu mikroskopu świetlnego

Analizę makroskopową włókien naturalnych przeprowadzono z wykorzystaniem cyfrowej mikroskopii świetlnej przy użyciu mikroskopu Keyence VHX-7000 (KEYENCE INTERNATIONAL (BELGIUM) NV/SA, Mechelen, Belgia). Badania miały na celu ocenę struktury oraz tekstury włókien, które w dużym stopniu wpływają na ich właściwości termoizolacyjne. Przed obserwacją próbki starannie przygotowano w celu uzyskania stabilnego ułożenia i ograniczenia wpływu nierówności powierzchni na jakość obrazu. Zastosowany układ optyczny oraz automatyczna regulacja ostrości umożliwiły uzyskanie wyraźnych obrazów bez dodatkowej obróbki próbek. Rejestrację prowadzono w trybie światła odbitego z użyciem oświetlenia pierścieniowego. Wykorzystano także funkcję HDR w celu poprawy kontrastu i czytelności detali. Zastosowanie funkcji łączenia głębi ostrości (Depth Composition) pozwoliło na wierne odwzorowanie trójwymiarowej morfologii powierzchni, także w przypadku silnie rozwiniętej topografii włókien.

6.3. Identyfikacja faz mineralogicznych z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej (XRD)

Skład fazowy materiałów bazowych analizowano metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) z użyciem dyfraktometru PANalytical Aeris (Malvern Panalytical, Almelo, Holandia). Celem badań była identyfikacja oraz ilościowa charakterystyka faz mineralogicznych obecnych w próbkach. Analizę ilościową wykonano metodą Rietvelda z wykorzystaniem oprogramowania HighScore Plus. Pozwoliło to na dokładne dopasowanie modeli strukturalnych do zarejestrowanych dyfraktogramów. Pomiary prowadzono z użyciem promieniowania Cu-Kα w zakresie kątowym 2θ od 10° do 100°. Zastosowano krok skanowania 0,003° oraz czas akwizycji 0,340 s na krok. Takie parametry zapewniły wysoką rozdzielczość i dobrą jakość danych. Identyfikację faz krystalicznych przeprowadzono w oparciu o bazę Crystallography Open Database (COD, wersja 2023.05).

6.4. Charakterystyka składu pierwiastkowego materiałów z wykorzystaniem XRF

Analizę składu chemicznego tlenków w materiałach bazowych wykonano metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Badania przeprowadzono przy użyciu spektrometru SHIMADZU EDX-7200 (SHIMADZU Europa GmbH, Duisburg, Niemcy). Pomiary prowadzono w atmosferze powietrza. Próbki do badań nie były zagęszczane. Zastosowano folię Mylar oraz uchwyty przeznaczone do materiałów sypkich. Takie przygotowanie zapewniło stabilne i powtarzalne warunki analityczne.

6.5. Charakterystyka rozkładu wielkości cząstek z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej

Analizę wielkości cząstek materiałów bazowych wykonano przy użyciu laserowego analizatora Anton-Paar PSA 1190LD (AntonPaar GmbH, Graz, Austria). Zakres pomiarowy urządzenia obejmuje cząstki od 0,04 μm do 2500 μm. Pozwala to na ocenę zarówno bardzo drobnych, jak i grubych frakcji. Dla każdego materiału przeprowadzono pięć niezależnych pomiarów. Otrzymane wyniki uśredniono z wykorzystaniem oprogramowania Kalliope Professional (wersja 2.22.1, Anton Paar GmbH, Graz, Austria).

6.6. Charakterystyka morfologii porów i powierzchni właściwej z wykorzystaniem analizatora sorpcji fizycznej

Dla materiałów bazowych wykonano badania powierzchni właściwej, objętości porów oraz rozkładu ich wielkości przy użyciu analizatora sorpcji fizycznej Quantachrome Autosorb iQ-MP (Anton Paar, Graz, Austria). Pomiary adsorpcji i desorpcji azotu prowadzono w zakresie ciśnień względnych od 1×10^{-6} do 0,995 z użyciem cel o średnicy wewnętrznej 9 mm. Próbki przed pomiarem poddano trzystopniowemu odgazowaniu. Najpierw ogrzewano je do 80°C z szybkością 2°C/min i wygrzewano przez 30 minut. Następnie podniesiono temperaturę do 120°C przy tej samej szybkości i ponownie wygrzewano przez 30 minut. Ostatni etap obejmował nagrzewanie do 300°C z szybkością 5°C/min i wygrzewanie przez 400 minut. Powierzchnię właściwą wyznaczono na podstawie izotermy Brunauera-Emmetta-Tellera (BET). Objętość i średnicę porów określono metodą BJH (Barretta-Joynera-Halenda). Całkowitą objętość porów obliczono dodatkowo metodą Dubinina-Raduszkiewicza (DR). Analizę danych przeprowadzono z użyciem oprogramowania Quantachrome ASiQwin (wersja 5.21).

6.7. Charakterystyka porowatości i rozkładu porów z wykorzystaniem porozymetru rtęciowego

Badania porowatości materiałów bazowych wykonano przy użyciu porozymetru rtęciowego PoreMaster 33 (Anton-Paar, Graz, Austria), pracującego w zakresie niskich ciśnień. Urządzenie umożliwia pomiary w przedziale od 0,2 do 50 psi. Pozwala to na analizę porów od około 6,4 nm do 1100 μm. Metoda polega na wtłaczaniu ciekłej rtęci w pory materiału pod rosnącym ciśnieniem. Wraz ze wzrostem ciśnienia rtęć wnika w coraz mniejsze kapilary. Na tej podstawie można wyznaczyć średnicę porów oraz ich całkowitą objętość. Aparatura umożliwiła także określenie rozkładu wielkości porów i całkowitej porowatości materiału.

6.8. Analiza chemiczna metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera

Spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR) zastosowano do analizy struktury chemicznej włókien naturalnych. Metoda ta umożliwia identyfikację charakterystycznych grup funkcyjnych oraz wiązań chemicznych. Widma rejestrowano przy użyciu spektrofotometru Thermo Scientific Nicolet iS5 z przystawką ATR iD7 (Loughborough, Wielka Brytania). Zastosowanie przystawki ATR pozwoliło na analizę powierzchni próbek bez ich wcześniejszego mielenia. Pomiary prowadzono w zakresie 4000-500 cm^{-1}. Zakres ten

obejmuje typowe pasma drgań wiązań organicznych i nieorganicznych obecnych w włóknach. Dla każdej próbki wykonano 32 skany przy rozdzielczości 4,0 cm^{-1}. Badania prowadzono w temperaturze pokojowej. Uzyskane widma pozwoliły na identyfikację podstawowych grup chemicznych oraz porównanie różnic w budowie chemicznej poszczególnych włókien.

6.9. Określanie gęstości materiałów metodą geometryczną

Gęstość kompozytów warstwowych wyznaczono metodą geometryczną na podstawie pomiaru masy i objętości próbek. W przypadku włókien naturalnych zastosowano specjalną ramkę pomiarową przeznaczoną do materiałów sypkich. Rozwiązanie to umożliwiło określenie objętości mimo nieregularnego kształtu włókien. Masę próbek zmierzono przy użyciu wagi analitycznej RADWAG PS 200/2000.R2 (Radom, Polska) z dokładnością do 0,01 g. Wymiary geometryczne określono suwmiarką o rozdzielczości 0,01 mm. Na tej podstawie obliczono objętość próbek. Gęstość (ρ) wyznaczono jako iloraz masy i objętości materiału (14):

$$\rho = \frac{m}{V}\ [\frac{kg}{m^3}] \tag{14}$$

gdzie:

m – masa badanego materiału [kg],

V – objętość badanego materiału [m^3].

6.10. Charakterystyka mechaniczna: wytrzymałość na zginanie kompozytów

Wytrzymałość próbek na zginanie określono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MATEST 3000 kN (Matest, Treviolo, Włochy). Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-5:2019-08 „Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań” [114]. Próbki miały kształt prostopadłościanów o wymiarach 50 mm × 50 mm × 150 mm. Podczas badania stosowano układ trzypunktowego zginania zgodny z wymaganiami normy. Obciążenie zwiększano stopniowo aż do momentu zniszczenia próbki. Rejestrowano maksymalną wartość siły powodującą uszkodzenie. Na tej podstawie obliczano wytrzymałość na zginanie. Do obliczeń zastosowano standardowy wzór dla schematu trzypunktowego (15).

$$R_f\ = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}\ [MPa] \tag{15}$$

gdzie:

R_f – wytrzymałość na zginanie [MPa],

b – długość boczna przekroju [mm],

F_f – maksymalne obciążenie [N],
l – odległość między podporami [mm].

6.11. Charakterystyka mechaniczna: wytrzymałość na ściskanie kompozytów

Badania wytrzymałości na ściskanie kompozytów geopolimerowych wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MATEST 3000 kN (Matest, Treviolo, Włochy). Procedurę badawczą przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań" [115]. Do badań wykorzystano połówki próbek po wcześniejszych testach zginania w kształcie sześcianów o wymiarach 50 × 50 × 50 mm. Próbki umieszczano pomiędzy metalowymi płytami o tych samych wymiarach. Wykonano także testy na pełnych próbkach o wymiarach 150 × 150 × 150 mm. Obciążenie zwiększano stopniowo i równomiernie zgodnie z wymaganiami normy. Rejestrowano maksymalną siłę niszczącą Fc. Na jej podstawie obliczano wytrzymałość na ściskanie (Rc) zgodnie z podanym wzorem (16).

$$R_c = \frac{F_c}{A} \; [MPa] \tag{16}$$

gdzie:
R_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa],
F_c – maksymalne obciążenie [N],
A – pole powierzchni próbki [mm^2].

6.12. Ocena właściwości termoizolacyjnych

Badania właściwości cieplnych kompozytów geopolimerowych wykonano przy użyciu aparatu płytowego HFM 446 Lambda firmy Netzsch (Selb, Niemcy). Urządzenie służy do dokładnego wyznaczania parametrów termoizolacyjnych materiałów budowlanych. Pomiar opiera się na metodzie dwóch płyt, czyli układzie gorącej i zimnej płyty. Próbka umieszczana jest pomiędzy płytami o kontrolowanej temperaturze. Na podstawie ustalonego strumienia ciepła wyznacza się współczynnik przewodzenia ciepła. Aparatura spełnia wymagania obowiązujących norm międzynarodowych dotyczących badań właściwości cieplnych ASTM C1784 [116], ASTM C518 [117], ISO 8301 [118] oraz EN 12664 [119]. Aparat HFM 446 Lambda charakteryzuje się zakresem pomiarowym przewodności cieplnej od 0,007 do 2,0 W/(m·K). Pozwala to na badanie zarówno materiałów bardzo dobrze izolujących, jak i bardziej przewodzących ciepło. Dokładność pomiaru wynosi ±1-2%,

powtarzalność ±0,25%, a odtwarzalność ±0,5%. Stabilne warunki temperaturowe zapewniają moduły Peltiera sterujące pracą płyt. Pomiary przewodności i oporu cieplnego prowadzono w zakresie temperatur 0-20°C. Zakres ten odpowiada typowym warunkom użytkowania materiałów izolacyjnych w budownictwie. Dla kompozytów prototypowych wykonano także pomiary w przedziałach 20-40°C oraz 30-50°C. Pozwoliło to ocenić zachowanie materiałów w wyższej temperaturze. Próbki przygotowano w postaci płyt dopasowanych do komory pomiarowej. Zapewniło to dobry kontakt z płytą grzejną i chłodzącą oraz równomierny rozkład temperatury. Wymiary próbek wynosiły 200 × 200 × 50 mm. Na podstawie pomiarów wyznaczono współczynnik przewodzenia ciepła (λ). Dla końcowych wariantów kompozytów obliczono również opór cieplny (R) zgodnie z podanym wzorem (17):

$$R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{\mathrm{m2 \cdot K}}{\mathrm{W}}\right] \tag{17}$$

gdzie:

R– opór cieplny [(m^2·K)/W],

d – grubość materiału [m],

λ – współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)].

Dla końcowych wariantów kompozytów wyznaczono także współczynnik przenikania ciepła U. Parametr ten jest podstawowym wskaźnikiem oceny izolacyjności przegród budowlanych. Obliczenia wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6946:2017-10 „Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metody obliczania" [61]. Obliczenia oparto na całkowitym oporze cieplnym przegrody. Uwzględniono opór cieplny kompozytu warstwowego oraz opory przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej i zewnętrznej. Zsumowane wartości stanowiły podstawę do dalszych obliczeń. Współczynnik przenikania ciepła U wyznaczono jako odwrotność całkowitego oporu cieplnego przegrody, zgodnie z podanym wzorem (18):

$$U = \frac{1}{\mathrm{R}_{si} + \mathrm{R}_{komp} + \mathrm{R}_{se}} \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m2 \cdot K}}\right] \tag{18}$$

gdzie:

R_{si} – opór przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej [(m^2·K)/W],

R_{komp} – całkowity opór cieplny kompozytu warstwowego, wyznaczony jako suma oporów cieplnych poszczególnych warstw [(m²·K)/W],

R_{se} – opór przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej [(m^2·K)/W].

W obliczeniach przyjęto standardowe wartości oporu przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej R_{si} oraz zewnętrznej R_{se} zgodnie z zaleceniami normowymi. Opór R_{si} uwzględnia wymianę ciepła między powierzchnią przegrody a powietrzem wewnętrznym. Obejmuje on konwekcję oraz promieniowanie cieplne. Opór R_{se} opisuje te same zjawiska po stronie zewnętrznej przegrody. Uwzględnienie tych składników pozwala lepiej odwzorować rzeczywiste warunki użytkowania. Umożliwia to także porównanie obliczonego współczynnika U z wymaganiami stosowanymi w praktyce projektowej. Wartości R_{si} i R_{se} przyjęto zgodnie z normą PN-EN ISO 6946:2017-10 dla pionowego przepływu ciepła przez przegrodę budowlaną. Zestawienie tych wartości przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. *Normowe wartości oporów przejmowania ciepła przyjęte do obliczeń współczynnika U.*

Strona przegrody	**Oznaczenie**	**Wartość [m²·K/W]**
Strona wewnętrzna	R_{si}	0,13
Strona zewnętrzna	R_{se}	0,04

Badania właściwości termicznych warstw kompozytu geopolimerowego wykonano również na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku. Pomiary przeprowadzono zgodnie z procedurą określoną w normie ASTM D5334-22ae1 [120]. W badaniach wykorzystano mikroprocesorowy analizator Isomet 2114 (Applied Precision Ltd., Bratysława, Słowacja). Dla każdej próbki wykonano osiemnaście niezależnych pomiarów, a wyniki uśredniono w celu zwiększenia wiarygodności i powtarzalności danych. Analizator Isomet 2114 działa w oparciu o metodę impulsu cieplnego. W trakcie pomiaru generowane jest kontrolowane źródło ciepła, które rozchodzi się w materiale. Sonda pozostająca w bezpośrednim kontakcie z próbką rejestruje zmiany temperatury w czasie za pomocą czujników półprzewodnikowych. Na podstawie zależności między przyrostem temperatury a logarytmem czasu urządzenie oblicza przewodność cieplną λ oraz objętościowe ciepło właściwe C_v. W badaniach zastosowano sondę powierzchniową przeznaczoną do materiałów twardych, takich jak geopolimery. Zakres pomiarowy urządzenia obejmuje przewodność cieplną od 0,015 do 6,0 W/(m·K) oraz objętościowe ciepło właściwe od 0,04 do 3 MJ/(m³·K). Deklarowana dokładność wynosi ±5%. Dane mogą być zapisywane w pamięci urządzenia lub eksportowane do komputera przez port RS-232C. Metoda impulsowa jest nieinwazyjna i dobrze sprawdza się w badaniach materiałów mineralnych. Wyznaczanie przewodności cieplnej opiera się na

równaniu wynikającym z prawa Fouriera opisującego przepływ ciepła w ciałach stałych. W przypadku zastosowanej metody impulsowej zależność ta przyjmuje postać równania (19) przy znanym strumieniu ciepła i zmierzonej zmianie temperatury w czasie.

$$\lambda = \frac{Qd}{A\Delta T}\left[\frac{W}{m \cdot K}\right] \tag{19}$$

gdzie:

Q – strumień ciepła [W],

d – odległość między dwiema izotermami [m],

A – powierzchnia przekroju [m^2],

ΔT – gradient temperatury [K].

W przypadku zastosowania urządzenia Isomet 2114 analiza przewodności cieplnej opiera się na uproszczonym modelu przewodzenia ciepła w półnieskończonym ośrodku. Model ten zakłada, że materiał otaczający sondę ma jednorodne właściwości i nieograniczoną objętość. Po przyłożeniu impulsu cieplnego temperatura w otoczeniu sondy zmienia się w funkcji czasu. Zależność ta ma charakter logarytmiczny. Opisuje ją równanie (20):

$$\Delta T = f(\ln(t)) \tag{20}$$

Zastosowane równanie umożliwia bezpośrednie wyznaczenie przewodności cieplnej λ bez potrzeby stosowania metod stacjonarnych. Pomiar odbywa się w krótkim czasie i nie wymaga ustalania stałego strumienia ciepła. Metoda ta jest zgodna z zasadami termodynamiki. Opisuje ona przepływ ciepła jako proces nieodwracalny. Układ dąży do wyrównania temperatur i osiągnięcia stanu równowagi cieplnej. Zjawisko to jest zgodne z drugą zasadą termodynamiki.

Objętościowa pojemność cieplna C_v jest podstawowym parametrem opisującym zdolność materiału do magazynowania energii cieplnej. Określa ilość ciepła potrzebną do podniesienia temperatury jednostkowej objętości materiału o 1 K. Wysoka wartość C_v oznacza większą zdolność do akumulacji energii. W praktyce ma to znaczenie przy ocenie bezwładności cieplnej przegród budowlanych. Objętościową pojemność cieplną wyznacza się na podstawie zależności przedstawionej w podanym wzorze (21):

$$C_v = \frac{Q}{V_c \Delta T}\left[\frac{MJ}{m^3 \cdot K}\right] \tag{21}$$

gdzie:

Q – strumień ciepła [W],

V_c – objętość [m^3],

ΔT – gradient temperatury [K].

Dyfuzyjność cieplna *a* jest parametrem opisującym szybkość rozchodzenia się ciepła w materiale. Określa tempo, w jakim energia cieplna przemieszcza się z obszarów o wyższej temperaturze do obszarów chłodniejszych. Jest miarą szybkości rozprzestrzeniania impulsu cieplnego. Parametr ten pozwala ocenić, jak szybko materiał reaguje na zmianę temperatury. Wysoka dyfuzyjność oznacza szybkie wyrównywanie temperatur w objętości materiału. Niska wartość wskazuje na wolniejsze rozprzestrzenianie się ciepła (22).

$$a = \frac{\lambda}{p_{b1} C_p} [\frac{mm^2}{sec}] \tag{22}$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)],

p_{b1} – gęstość materiału [kg/m^3],

C_p – ciepło właściwe [J/(kg·K)].

Badania przewodności cieplnej kompozytów wykonano także w celu dokładnej oceny ich parametrów termicznych oraz sprawdzenia obecności oporu kontaktowego między warstwami. Pomiary przeprowadzono w Akredytowanym Laboratorium Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej. Zastosowano aparat GHP 900 pracujący metodą dwóch płyt grzejnych. Próbki miały wymiary 300 × 300 × 102 mm. Zapewniło to stabilny kontakt z płytą grzejną i chłodzącą oraz równomierny rozkład temperatury. Badania prowadzono w zakresie 0-20°C przy średniej temperaturze próbki 10°C. Warunki te odpowiadają typowym warunkom użytkowania materiałów izolacyjnych. Zastosowana aparatura umożliwiła bardzo dokładne wyznaczenie przewodności cieplnej. Pozwoliła także na identyfikację efektów związanych z oporem kontaktowym między warstwami. Uzyskane dane stanowią podstawę do rzetelnej oceny właściwości termoizolacyjnych badanych kompozytów.

6.13. Ocena zachowania materiałów w wysokich temperaturach

Badania odporności materiałów na wysoką temperaturę wykonano w laboratoryjnym piecu grzewczym z zastosowaniem wieloetapowego cyklu nagrzewania. Najpierw próbki ogrzewano do 100°C przez 1 godzinę. Następnie utrzymywano je w tej temperaturze przez kolejną godzinę. W kolejnym etapie podniesiono temperaturę do 400°C w ciągu 1 godziny. Próbki wygrzewano w 400°C przez następną godzinę. Ostatni etap obejmował wzrost temperatury do 600°C w czasie 1 godziny. Po osiągnięciu tej wartości prowadzono wygrzewanie przez kolejną godzinę. W trakcie całego procesu monitorowano rozkład temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej FLIR ONE Pro. Urządzenie ma czułość 70 mK

i zakres pomiarowy od −20°C do 400°C. Częstotliwość odświeżania wynosi 8,7 Hz. Po zakończeniu cyklu cieplnego próbki poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie. Pozwoliło to ocenić wpływ wysokiej temperatury na ich właściwości mechaniczne.

6.14. Badanie wymywalności wodnej

Testy wymywalności wodnej przeprowadzono zgodnie z obowiązującą normą [121]. Oznaczanie pierwiastków metali ciężkich wykonano przy użyciu emisyjnej spektrometrii plazmowej (ICP-OES) [122], natomiast zawartość chlorków, fluorków i siarczanów określano metodą chromatografii jonowej (IC) [123]. Zawartość chromu (VI) określano metodą spektrofotometryczną [124], a rozpuszczalny węgiel organiczny (RWO) analizowano poprzez wysokotemperaturowe spalanie z detekcją podczerwieni [125]. Substancje rozpuszczone w roztworze badano metodą wagową [126], natomiast poziom rtęci określono przy użyciu absorpcji atomowej z generowaniem zimnych par [127]. Badania wykonano w akredytowanym laboratorium i2 Analytical Limited Sp. z o.o. (numer akredytacji UKAS Testing 4041) - oddział w Rudzie Śląskiej. Zapewniło to zgodność z wymaganiami jakościowymi oraz wysoką wiarygodność wyników. Analizie poddano geopolimer zawierający 50% popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego oraz 50% piasku. Materiał aktywowano roztworem 10M NaOH. Próbkę pochodzącą z jednej partii umieszczano w naczyniu laboratoryjnym. Następnie dodawano wodę dejonizowaną w stosunku 10 l/kg suchej masy materiału. Naczynie umieszczano na wytrząsarce i prowadzono mieszanie przez 24 godziny w temperaturze pokojowej. Po zakończeniu procesu oddzielano fazę stałą od roztworu metodą filtracji. Otrzymany roztwór kierowano do dalszych analiz w zależności od oznaczanego składnika. Dopuszczalne wartości stężeń w roztworze odniesiono do aktualnych przepisów dotyczących ochrony środowiska i składowania odpadów. Zestawienie tych wartości przedstawiono w tabeli 3 [128].

Tabela 3. *Kryteria dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach różnych kategorii zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r.*

Wartości graniczne dopuszczające odpady do składowania na składowiskach odpadów (ciecz/ faza stała 10:1 [mg/kg s.m.])			
Składnik	Obojętnych	Innych niż obojętne i niebezpieczne	Niebezpiecznych
Arsen (As)	0,5	2	25
Bar (Ba)	20	100	300
Kadm (Cd)	0,04	1	5
Chrom (Cr)	0,5	10	70
Miedź (Cu)	2	50	100
Rtęć (Hg)	0,01	0,2	2
Molibden (Mo)	0,5	10	30
Nikiel (Ni)	0,4	10	40
Ołów (Pb)	0,5	10	50
Antymon (Sb)	0,06	0,7	5
Selen (Se)	0,1	0,5	7
Cynk (Zn)	4	50	200
Chlorki (Cl^-)	80	15 000	25 000
Fluorki (F^-)	10	150	500
Siarczany (SO_4^{2-})	1000	20 000	50 000
Wskaźnik fenolowy	1	-	-
Rozpuszczony węgiel organiczny (DOC)	500	800	1000
Stałe związki rozpuszczone (TDS)	4 000	60 000	100 000

W trakcie testów wymywalności oznaczono także dodatkowe parametry chemiczne. Określono zawartość całkowitego węgla organicznego (TOC). Przeprowadzono analizę związków z grupy BTEX, czyli benzenu, toluenu, etylobenzenu oraz ksylenów (BTEX). Oznaczono również zawartość oleju mineralnego w zakresie C10-C40. Zbadano obecność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (PAH) oraz polichlorowanych bifenyli (PCB). Wszystkie analizy wykonano przy stosunku cieczy do fazy stałej wynoszącym 10:1.

6.15. Badanie promieniotwórczości naturalnej

Badanie promieniotwórczości naturalnej wykonano w akredytowanym laboratorium APGeotechnika (numer akredytacji AB1685, Siemianowice Śląskie, Polska). Analizie poddano

tę samą próbkę geopolimeru, która była wcześniej wykorzystana w testach wymywalności. Oceniono stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych $C_{K–40}$, C_{Ra-226} oraz C_{Th-232}. Wyniki przedstawiono w postaci wskaźnika stężenia promieniotwórczego I. Wskaźnik ten obliczono na podstawie aktywności poszczególnych izotopów zgodnie z obowiązującym wzorem (23):

$$I = \frac{C_{K-40}}{3000} + \frac{C_{Ra-226}}{300} + \frac{C_{Th-232}}{200} \tag{23}$$

gdzie:

I – wskaźnik promieniowania [Bq/kg],

$C_{K–40}$ – stężenie promieniotwórcze izotopu ^{40}K [Bq/kg],

$C_{Ra–226}$ – stężenie promieniotwórcze izotopu ^{226}Ra [Bq/kg],

$C_{Th–232}$ – stężenie promieniotwórcze izotopu ^{232}Th [Bq/kg],

Uzyskane wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego I oceniono zgodnie z obowiązującymi przepisami dotyczącymi materiałów budowlanych. Analizę odniesiono do dopuszczalnych poziomów aktywności naturalnych izotopów C_{K-40}, C_{Ra-226} oraz C_{Th-232}. Sprawdzono także, czy wartość wskaźnika nie przekracza progów wymagających zgłoszenia do właściwych organów. Ocena pozwoliła określić, czy badany materiał spełnia wymagania w zakresie bezpieczeństwa radiologicznego [129].

6.16. Zakres wykorzystania technologii cyfrowych w dysertacji

W przygotowaniu pracy narzędzia sztucznej inteligencji wykorzystano głównie jako wsparcie techniczne. AI zastosowano przy opracowaniu części graficznej oraz do korekty językowej tekstu. Z jej pomocą przygotowano schematy przedstawione na rysunkach 1 i 2. Przy użyciu AI opracowano także rysunek 5 ilustrujący hierarchię strategii zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Grafiki powstawały na podstawie szczegółowych wytycznych autora. Schemat morfologii włókna przedstawiony na rysunku 3 wykonano w programie BioRender. Pozostałe schematy przygotowano z wykorzystaniem narzędzia Canva Pro. ChatGPT (wersja 5.2) wykorzystano pomocniczo do porównywania widm FT-IR, wsparcia analiz cyklu życia i analiz ekonomicznych oraz do redakcyjnego ujednolicenia tekstu. Wykorzystanie AI miało charakter pomocniczy i było zgodne z zasadami obowiązującymi przy przygotowywaniu prac naukowych na polskich uczelniach.

7. WYBÓR MATERIAŁÓW DO SYNTEZY KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH

Projektowanie kompozytów warstwowych na bazie mineralnych matryc nieorganicznych wymaga dokładnego poznania właściwości materiałów prekursorowych przed ich użyciem w syntezie. Właściwości fizykochemiczne surowców glinokrzemianowych mają bezpośredni wpływ na przebieg reakcji wiązania. Morfologia cząstek wpływa na wzajemne ułożenie cząstek i kształtowanie się mikrostruktury. Skład chemiczny decyduje o reaktywności w środowisku alkalicznym. Struktura fazowa wpływa na udział fazy amorficznej zdolnej do rozpuszczania. Wielkość cząstek determinuje powierzchnię właściwą i szybkość reakcji. Czynniki te warunkują możliwość uzyskania określonych właściwości w kompozytach warstwowych. Z tego powodu przyjęto podejście porównawcze obejmujące trzy potencjalne materiały prekursorowe. Analizę przeprowadzono przed podjęciem decyzji o ich wykorzystaniu w dalszych badaniach technologicznych.

Do badań wstępnych wybrano dwa popioły lotne ze spalania paliw stałych oraz jeden surowiec naturalny o kontrolowanych parametrach. Pierwszym analizowanym materiałem jest popiół lotny ze spalania węgla kamiennego pochodzący z Elektrociepłowni Skawina. Materiał ten jest typowym produktem ubocznym procesu spalania. Charakteryzuje się stosunkowo stabilnym składem chemicznym. Zawiera również znaczną ilość fazy amorficznej. Cecha ta sprzyja jego zastosowaniu w technologiach alkalicznej aktywacji [2,6]. Ze względu na planowane wykorzystanie tego popiołu jako jedynego prekursora matrycy w kolejnych etapach badań jego właściwości przyjęto jako punkt odniesienia. Na jego podstawie oceniano parametry pozostałych materiałów. Takie podejście umożliwiło bezpośrednie porównanie ich przydatności technologicznej [4].

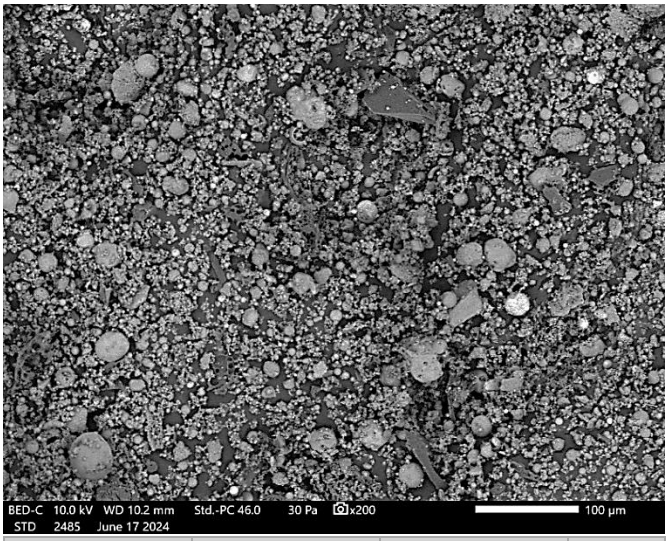
Drugim materiałem objętym badaniami jest popiół lotny ze spalania węgla brunatnego pochodzący z Elektrownia Bełchatów. Surowiec ten ma inny charakter mineralogiczny i chemiczny niż popiół z węgla kamiennego. Różnice wynikają z właściwości paliwa oraz z warunków spalania. Materiał ten zwykle zawiera więcej tlenku wapnia. Często wykazuje także większą niejednorodność fazową. Cechy te mogą wpływać na jego reaktywność w procesie alkalicznej aktywacji [18]. Uwzględnienie tego materiału w badaniach pozwala ocenić wpływ faz wapniowych na przebieg reakcji alkalicznej. Obecność wapnia może zmieniać mechanizm wiązania i skład powstających produktów reakcji. Może także wpływać na tempo twardnienia oraz rozwój mikrostruktury. Analiza tego surowca umożliwia wskazanie potencjalnych ograniczeń technologicznych. Dotyczy to zwłaszcza możliwości uzyskania jednorodnych warstw kompozytu [9,130]. Uwzględnienie tego materiału w badaniach wynika

także z problemu jego zagospodarowania. Popioły z węgla brunatnego powstają w dużych ilościach. Ich składowanie wiąże się z obciążeniem środowiska. Poszukiwanie nowych kierunków wykorzystania ma więc znaczenie praktyczne i środowiskowe.

Trzecim analizowanym surowcem jest metakaolin produkowany przez firmę Keramost, otrzymywany w procesie kontrolowanej kalcynacji kaolinitu. Materiał ten charakteryzuje się wysoką czystością i dobrze określonym składem chemicznym. Dzięki temu wykazuje stabilne i powtarzalne właściwości reaktywne. W niniejszych badaniach pełni funkcję materiału referencyjnego [3]. Jego wysoka reaktywność oraz powtarzalność właściwości umożliwiają porównanie zachowania popiołów lotnych z układem modelowym. W takim układzie wpływ zmienności surowca jest ograniczony do minimum. Dzięki temu łatwiej ocenić rzeczywiste różnice wynikające ze składu i struktury badanych popiołów [131]. Analiza metakaolinu pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy reakcji zachodzących w badanych układach. Materiał o kontrolowanych parametrach stanowi punkt odniesienia dla interpretacji wyników. Umożliwia to ocenę potencjału surowców odpadowych w porównaniu z układem modelowym. Dzięki temu można wskazać ich rzeczywiste możliwości i ograniczenia technologiczne [132].

Przyjęta metodyka obejmowała pełną charakterystykę fizykochemiczną wszystkich trzech materiałów. Analizowano skład chemiczny, identyfikowano fazy mineralne oraz oceniano morfologię i uziarnienie cząstek. Badania te stanowiły podstawę do dalszych decyzji. Na ich podstawie wybrano materiał najbardziej odpowiedni do syntezy kompozytów warstwowych. Wybór nie był więc przypadkowy, lecz oparty na danych eksperymentalnych. Takie podejście zapewniło spójność między etapem badań podstawowych a kolejnymi badaniami aplikacyjnymi.

Na rysunku 8 przedstawiono obraz morfologii popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego uzyskany metodą mikroskopii elektronowej wraz z analizą składu pierwiastkowego EDS. Obraz pozwala ocenić kształt oraz wielkość cząstek. Umożliwia także określenie stopnia ich zeszklenia. Na tej podstawie można wnioskować o jednorodności mikrostruktury materiału. Analiza EDS pozwala zidentyfikować główne pierwiastki budujące nieorganiczną fazę popiołu. Dzięki temu możliwa jest wstępna ocena jego przydatności jako prekursora w procesie alkalicznej aktywacji.



Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	44,05±0,42	58,11±0,55
Na	K	1,97±0,09	1,81±0,08
Mg	K	1,03±0,07	0,89±0,06
Al	K	21,44±0,30	16,77±0,23
Si	K	25,68±0,37	19,30±0,27
K	K	4,01±0,22	2,17±0,12
Ca	K	1,83±0,17	0,96±0,09
Total		100,00	100,00

Rysunek 8. *Morfologia popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS.*

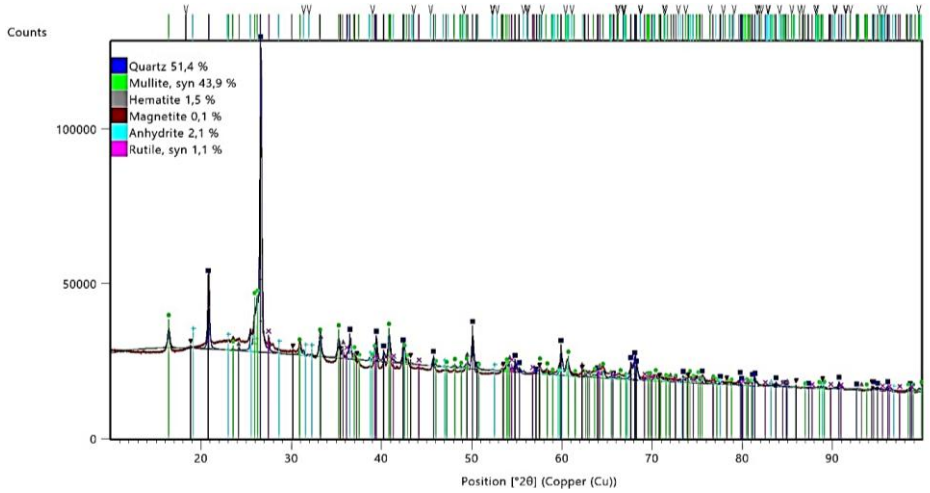
Morfologia popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego wskazuje na obecność drobnych, głównie kulistych cząstek o gładkiej powierzchni. Taka forma jest typowa dla materiałów powstających w wyniku szybkiego chłodzenia stopionej fazy mineralnej podczas spalania. Widoczne są ziarna o zróżnicowanych rozmiarach, które miejscami tworzą aglomeraty. Obraz ten potwierdza znaczny udział fazy zeszklonej oraz niejednorodność uziarnienia. Kulista morfologia sprzyja dobrej urabialności i zwiększa powierzchnię reaktywną materiału. Ma to korzystny wpływ na przebieg alkalicznej aktywacji. Analiza EDS wykazała dominację tlenu, krzemu i glinu, co jest typowe dla materiałów glinokrzemianowych. Udział masowy tlenu wynosił 44,05 ± 0,42%, a atomowy 58,11 ± 0,55%. Krzem występował w ilości 25,68 ± 0,37% mas. (19,30 ± 0,27% at.), a glin 21,44 ± 0,30% mas. (16,77 ± 0,23% at.). Stosunek Si/Al można uznać za korzystny z punktu widzenia tworzenia amorficznej sieci glinokrzemianowej. W mniejszych ilościach obecne były potas, sód, magnez i wapń. Zawartość potasu wynosiła 4,01 ± 0,22% mas. (2,17 ± 0,12% at.). Zawartość sodu nie przekraczała 1,97 ± 0,09% mas. (1,81 ± 0,08% at.), a magnezu 1,03 ± 0,07% mas. (0,89 ± 0,06% at.). Wapń występował w ilości 1,83 ± 0,17% mas. (0,96 ± 0,09% at.), co pozwala zaklasyfikować popiół jako niskowapniowy. Taki skład jest typowy dla popiołów ze spalania węgla kamiennego.

Potwierdza to ich przydatność jako prekursorów w technologiach materiałów aktywowanych alkalicznie. Obserwowana morfologia oraz dominacja pierwiastków Si, Al i O są zgodne z danymi opisywanymi w literaturze [2,6].

W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy fazowej popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla kamiennego. Przedstawiono w niej zidentyfikowane fazy mineralogiczne obecne w materiale. Na rysunku 9 pokazano dyfraktogram ilustrujący skład fazowy badanego popiołu. Ta analiza umożliwia wizualizację obecnych faz krystalicznych oraz ocenę stopnia ich udziału w strukturze materiału.

Tabela 4. *Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla kamiennego.*

Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego			
Nazwa fazy	Kod wzorca dyfrakcyjnego	Wzór chemiczny	Ilościowy udział fazy [%]
Kwarc	01-075-8321	SiO_2	51,4
Mulit	00-015-0776	$Al_6Si_2O_{13}$	43,9
Hematyt	00-001-1053	Fe_2O_3	1,5
Magnetyt	00-003-0862	Fe_3O_4	0,1
Anhydryt	00-003-0162	$CaSO_4$	2,1
Rutyl	04-001-9262	TiO_2	1,1

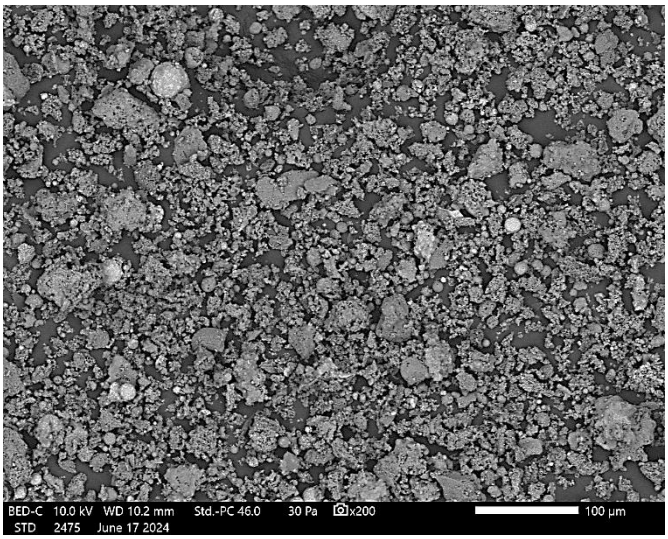


Rysunek 9. *Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego.*

Analiza fazowa popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego wykazała, że dominującymi fazami są kwarc (SiO_2, 51,4%) oraz mulit ($Al_6Si_2O_{13}$, 43,9%). Taki skład jest charakterystyczny dla popiołów klasy F. Materiały tej klasy mają niską zawartość wapnia i wysoki udział faz krzemowo-glinowych [18,133]. Kwarc jest fazą stabilną termicznie

i w dużej mierze pozostaje nieprzereagowany w trakcie spalania. Stanowi on główny składnik krystaliczny popiołu. Mulit jest chemicznie odpornym glinokrzemianem. Jego obecność może częściowo ograniczać reaktywność alkaliczną materiału [18,134]. W mniejszych ilościach stwierdzono obecność hematytu (Fe_2O_3, 1,5%), magnetytu (Fe_3O_4, 0,1%), anhydrytu ($CaSO_4$, 2,1%) oraz rutylu (TiO_2, 1,1%). Ich obecność jest typowa dla popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego. Związki żelaza powstają w wyniku utleniania minerałów obecnych w paliwie. Anhydryt wiąże się z obecnością siarki w węglu. Rutyl jest efektem koncentracji tytanu w fazie mineralnej. Wyniki te są zgodne z danymi opisywanymi w literaturze [133–135]. Niska zawartość faz wapniowych potwierdza niskowapniowy charakter analizowanego popiołu. Taki skład sprzyja tworzeniu jednorodnej sieci glinokrzemianowej podczas alkalicznej aktywacji. Ograniczona ilość wapnia zmniejsza udział produktów typu C-A-S-H. Ułatwia to rozwój typowej struktury geopolimerowej opartej na wiązaniach Si–O–Al [18,136]. Obecność niewielkich ilości faz żelaza i tytanu może wpływać głównie na barwę materiału. Może także w pewnym stopniu modyfikować jego właściwości sorpcyjne. Ich udział jest jednak zbyt mały, aby istotnie zmieniać mechanizm wiązania w procesie geopolimeryzacji. Nie wpływają one znacząco na tworzenie podstawowej sieci glinokrzemianowej [134,137]. Przedstawiony skład fazowy potwierdza typową mineralogię popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego. Widoczna jest dominacja faz Si–Al–O. Zawartość wapnia jest niska. Obecne są niewielkie ilości tlenków żelaza i tytanu. Analiza jest zgodna z danymi literaturowymi. Taki skład wskazuje na umiarkowaną reaktywność alkaliczną materiału.

Na rysunku 10 przedstawiono obraz morfologii popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego uzyskany metodą mikroskopii elektronowej. Równolegle wykonano analizę składu pierwiastkowego metodą EDS. Pozwoliło to określić dominujące pierwiastki występujące w tym popiele.



Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	35,67±0,52	54,93±0,80
Mg	K	1,00±0,07	1,02±0,07
Al	K	9,67±0,21	8,83±0,19
Si	K	1,92±0,11	1,69±0,10
S	K	11,28±0,26	8,67±0,20
Ca	K	40,46±0,73	24,87±0,45
Total		100,00	100,00

Rysunek 10. *Morfologia popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS.*

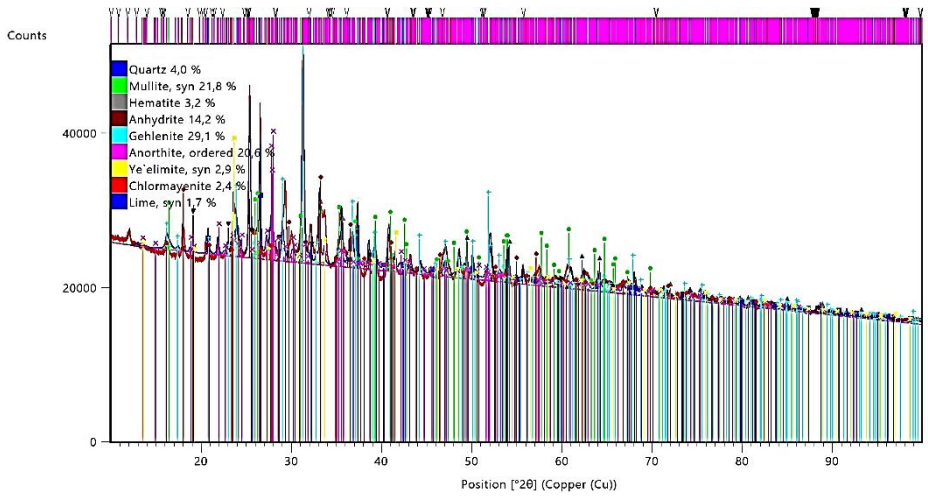
Analiza morfologii popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego wykonana metodą mikroskopii elektronowej wykazała duże zróżnicowanie kształtu i wielkości cząstek. W materiale występują nieregularne fragmenty o chropowatej powierzchni. Obecne są także częściowo kuliste ziarna. Taki obraz wskazuje na bardziej złożony przebieg procesów przemian w trakcie spalania. Różnorodność form odzwierciedla warunki spalania węgla brunatnego. Może również świadczyć o udziale procesów krystalizacji faz mineralnych podczas chłodzenia [133,138]. Analiza pierwiastkowa metodą EDS wykazała wysoki udział tlenu (O, 35,67% mas., 54,93% at.) oraz wapnia (Ca, 40,46% mas., 24,87% at.). Istotny jest także udział siarki (S, 11,28% mas., 8,67% at.). Zawartość glinu (Al, 9,67% mas., 8,83% at.), krzemu (Si, 1,92% mas., 1,69% at.) oraz magnezu (Mg, 1,00% mas., 1,02% at.) jest wyraźnie niższa. Taki skład pozwala zaklasyfikować materiał jako popiół wysokowapniowy. Różnice między udziałami masowymi i atomowymi wynikają z małej masy atomowej tlenu. Wskazuje to na dominację związków tlenkowych w strukturze nieorganicznej popiołu [139,140]. Zestawienie obserwacji morfologicznych z analizą składu chemicznego wskazuje, że popiół z węgla brunatnego jest bardziej zróżnicowany pod względem składu i mikrostruktury niż popiół z węgla kamiennego. Występuje w nim większa zmienność faz oraz większe różnice w budowie cząstek. Taka niejednorodność może wpływać na przebieg reakcji w środowisku alkalicznym.

Ma to znaczenie przy ocenie jego reaktywności. Jest to również istotne przy rozważaniu zastosowania materiału w technologiach geopolimerowych oraz innych rozwiązaniach opartych na surowcach odpadowych [133,139,140].

W tabeli 5 przedstawiono fazy mineralogiczne zidentyfikowane w popiele lotnym ze spalania węgla brunatnego na podstawie analizy rentgenowskiej. Zestawienie to pozwala określić udział poszczególnych faz krystalicznych w materiale. Na rysunku 11 pokazano dyfraktogram ilustrujący skład fazowy badanego popiołu.

Tabela 5. *Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla brunatnego.*

Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego			
Nazwa fazy	Kod wzorca dyfrakcyjnego	Wzór chemiczny	Ilościowy udział fazy [%]
Kwarc	01-075-8321	SiO_2	4,0
Mulit	00-010-0394	$Al_6Si_2O_{13}$	21,8
Hematyt	00-001-1053	Fe_2O_3	3,2
Anhydryt	00-003-0162	$CaSO_4$	14,2
Gehlenit	04-015-3030	$Ca_2Al_2SiO_7$	29,1
Anortyt	00-041-1486	$CaAl_2Si_2O_8$	20,6
Bezwodny sulfoaluminian wapnia	04-009-7268	$Ca_4Al_6(SO_4)O_{12}$	2,9
Majenit	00-048-1882	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	2,4
Tlenek wapnia	04-005-4757	CaO	1,7

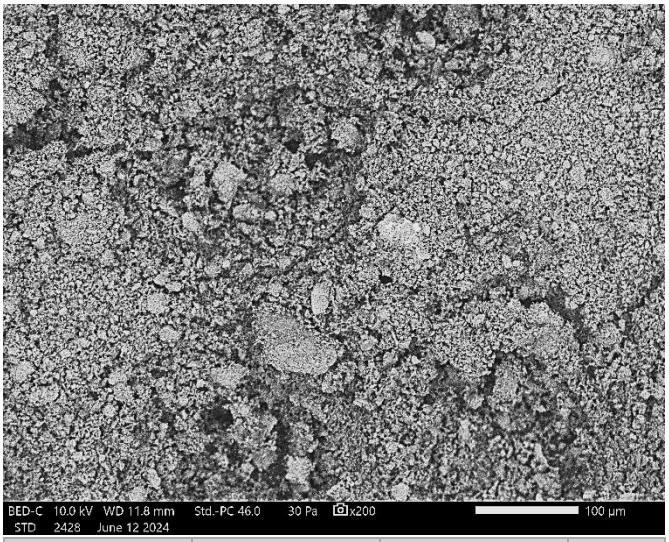


Rysunek 11. *Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego.*

Analiza fazowa popiołu ze spalania węgla brunatnego wykazała złożony skład mineralogiczny. Dominują w nim fazy wapniowo-glinokrzemianowe oraz siarczanowe. Największy udział mają gehlenit ($Ca_2Al_2SiO_7$, 29,1%), mulit ($Al_6Si_2O_{13}$, 21,8%) oraz anortyt ($CaAl_2Si_2O_8$, 20,6%). Taki skład potwierdza wysokowapniowy charakter materiału. Obecność licznych faz zawierających wapń odróżnia ten popiół od popiołów ze spalania węgla kamiennego. W tych ostatnich dominują fazy krzemionkowe i glinokrzemianowe o niższej zawartości Ca. Tego typu skład jest typowy dla popiołów brunatnych opisywanych w literaturze [18,133,141]. Obecność gehlenitu i anortytu wskazuje na reakcje między CaO a fazami glinokrzemianowymi zachodzące w warunkach wysokotemperaturowego spalania paliwa. Są one typowe dla popiołów z węgla brunatnego. W środowisku alkalicznym mogą wykazywać reaktywność. Mogą uczestniczyć w tworzeniu uwodnionych produktów wiążących typu C-A-S-H. Możliwy jest także udział w formowaniu struktur o charakterze hybrydowym, łączących cechy żelu C-A-S-H i sieci glinokrzemianowej [18,113]. Jednocześnie wysoka zawartość mulitu, który jest fazą termodynamicznie stabilną, może ograniczać ogólną reaktywność materiału. Mulit trudno ulega rozpuszczaniu w środowisku alkalicznym. Zmniejsza to ilość składników dostępnych do tworzenia żelu wiążącego. Zależność ta jest zgodna z obserwacjami opisywanymi w badaniach nad alkaliczną aktywacją popiołów wysokowapniowych [3,141]. Znaczący udział anhydrytu ($CaSO_4$, 14,2%) oraz obecność bezwodnego sulfoaluminianu wapnia (2,9%) potwierdzają wysoką zawartość siarki w materiale. Cecha ta jest typowa dla popiołów ze spalania węgla brunatnego. Fazy siarczanowe mogą wpływać na przebieg reakcji w środowisku alkalicznym. Oddziałują na kinetykę wiązania oraz skład powstających produktów. W układach o wysokiej zawartości wapnia mogą modyfikować strukturę żelu wiążącego. Literatura wskazuje także na ich znaczenie dla trwałości długoterminowej materiałów aktywowanych alkalicznie [5,113]. Niewielki udział kwarcu (4,0%) wskazuje na małą zawartość krystalicznej krzemionki. Faza ta zwykle nie uczestniczy aktywnie w reakcjach alkalicznej aktywacji. Odróżnia to badany popiół od popiołów ze spalania węgla kamiennego, w których kwarc często dominuje. Obecność hematytu (3,2%) jest typowa i wynika z utleniania żelaza zawartego w paliwie. Wykrycie majenitu (2,4%) oraz wolnego tlenku wapnia (1,7%) wskazuje na obecność faz o wysokiej reaktywności. Składniki te mogą powodować szybki wzrost pH po kontakcie z wodą. Sprzyja to inicjacji procesów wiązania w środowisku alkalicznym [3,18]. Skład fazowy badanego popiołu brunatnego jest zgodny z danymi opisywanymi w literaturze. Potwierdza jego wysokowapniowy i wielofazowy charakter. Obecność reaktywnych faz wapniowo-glinowych wpływa na przebieg reakcji w środowisku alkalicznym. Jednocześnie obecność stabilnych faz

krystalicznych może ograniczać całkowitą reaktywność materiału. Taki układ faz determinuje specyficzne właściwości popiołu. Wymaga to starannego doboru warunków aktywacji alkalicznej. Odpowiednie parametry procesu są kluczowe dla uzyskania jednorodnych i trwałych kompozytów.

Na rysunku 12 przedstawiono morfologię metakaolinu uzyskaną metodą mikroskopii elektronowej wraz z analizą składu pierwiastkowego EDS. Obraz umożliwia ocenę kształtu i wielkości cząstek materiału. Analiza EDS pozwala określić dominujące pierwiastki budujące jego strukturę. Zebrane dane stanowią podstawę do porównania metakaolinu z popiołami lotnymi ze spalania węgla kamiennego i brunatnego. Porównanie to pozwala ocenić jego przydatność jako materiału odniesienia o kontrolowanym składzie chemicznym.



Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	37,07±0,53	50,47±0,72
Al	K	30,53±0,49	24,64±0,39
Si	K	31,27±0,57	24,25±0,44
K	K	1,13±0,19	0,63±0,10
Total		100,00	100,00

Rysunek 12. *Morfologia metakaolinu wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS.*

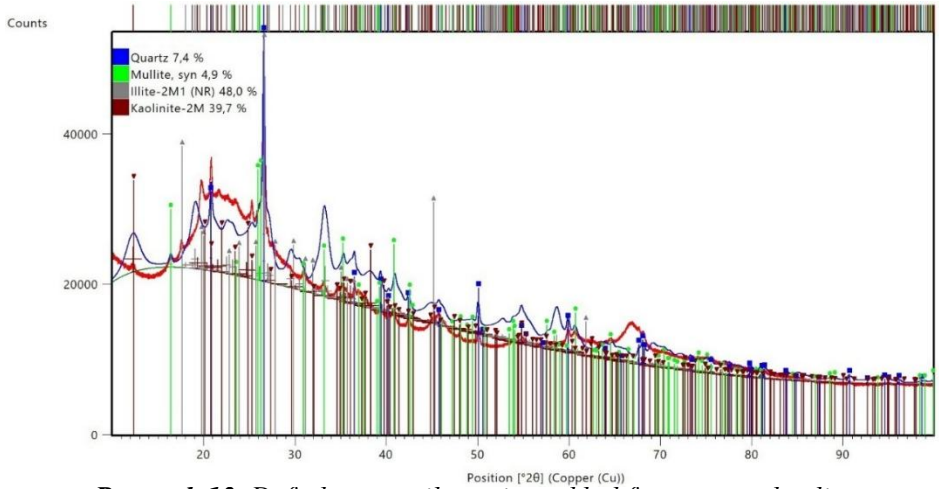
Obserwacje morfologiczne pokazują, że cząstki metakaolinu mają nieregularny i drobnoziarnisty kształt. Często przyjmują formę płytek lub łusek. Taka struktura jest typowa dla materiału powstałego w wyniku kalcynacji kaolinitu. Cząstki mają stosunkowo wyrównaną wielkość. Taka budowa sprzyja wysokiej reaktywności w środowisku alkalicznym [142,143]. Analiza EDS wykazała dominujący udział tlenu (O, 37,07% mas.; 50,47% at.) oraz wysoką zawartość glinu (Al, 30,53% mas.; 24,64% at.) i krzemu (Si, 31,27% mas.; 24,25% at.). Skład ten odpowiada typowej strukturze aluminosilikatu charakterystycznej dla metakaolinu.

Niewielka ilość potasu (K, 1,13% mas.; 0,63% at.) może wynikać z obecności drobnych domieszek mineralnych lub pozostałości surowca wyjściowego. Jednorodność morfologiczna i chemiczna materiału zapewnia stabilne i powtarzalne właściwości reaktywne. Dzięki temu metakaolin stanowi wiarygodny materiał odniesienia w badaniach porównawczych z popiołami lotnymi [142,143]. Taka charakterystyka pozwala ocenić wpływ mikrostruktury i składu chemicznego na kinetykę reakcji w środowisku alkalicznym. Umożliwia analizę procesu tworzenia faz wiążących. Pozwala także powiązać te zjawiska z właściwościami końcowymi kompozytów. Porównanie metakaolinu z popiołami lotnymi pokazuje, jak zmienność surowców odpadowych wpływa na przebieg aktywacji alkalicznej. Ułatwia to ocenę roli metakaolinu jako materiału odniesienia w badaniach geopolimerów [143,144].

W tabeli 6 przedstawiono fazy mineralogiczne zidentyfikowane w metakaolinie na podstawie analizy rentgenowskiej. Na rysunku 13 pokazano dyfraktogram ilustrujący skład fazowy metakaolinu. Widoczne położenia i intensywności refleksów pozwalają na identyfikację poszczególnych faz mineralnych.

Tabela 6. *Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w metakaolinie.*

Metakaolin			
Nazwa fazy	Kod wzorca dyfrakcyjnego	Wzór chemiczny	Ilościowy udział fazy [%]
Kwarc	01-075-8321	SiO_2	7,4
Mulit	00-015-0776	$Al_6Si_2O_{13}$	4,9
Illit	00-026-0911	$(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	48,0
Kaolinit	01-075-0938	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	39,7

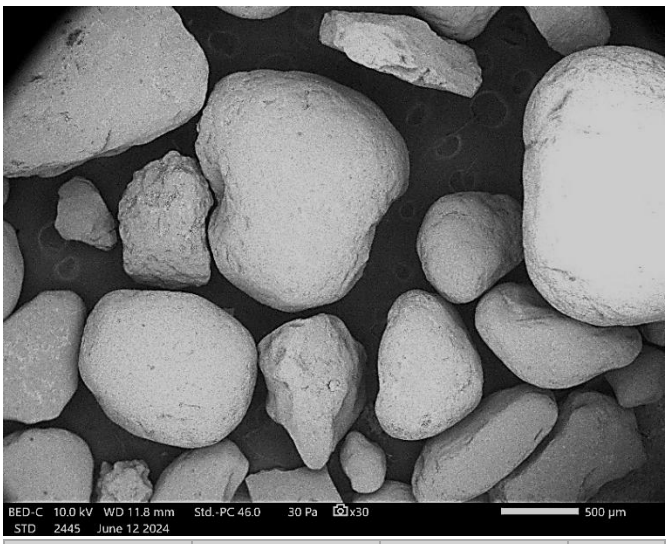


Rysunek 13. *Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy metakaolinu.*

Analiza fazowa metakaolinu wykazała obecność czterech głównych faz: kwarcu (7,4%), mulitu (4,9%), illitu (48,0%) oraz kaolinitu (39,7%). Największy udział mają illit i kaolinit.

Skład ten wskazuje na częściową transformację termiczną surowca ilastego. W trakcie kalcynacji nie dochodzi do całkowitej dehydroksylacji wszystkich faz. Obecność tych faz wpływa na jego zachowanie w środowisku alkalicznym [145,146]. Obecność kwarcu, mimo niewielkiego udziału, jest typowa dla metakaolinu. Wynika ona z domieszek mineralnych surowca lub z pozostałości pierwotnej fazy krystalicznej. Kwarc nie wykazuje istotnej reaktywności w procesie geopolimeryzacji. Nie uczestniczy w tworzeniu sieci glinokrzemianowej. Pełni głównie rolę wypełniacza. Może także wpływać na stabilność mikrostruktury materiału [146,147]. Mulit, który powstaje w wyniku wysokotemperaturowej przemiany glinokrzemianów, również cechuje się niską reaktywnością chemiczną. Faza ta trudno ulega rozpuszczaniu w środowisku alkalicznym. Nie uczestniczy w istotnym stopniu w tworzeniu żelu wiążącego. Może jednak wpływać na sztywność i stabilność struktury materiału. Jego obecność zwiększa odporność metakaolinu na działanie temperatury [4,145]. Duży udział illitu i kaolinitu wskazuje na wysoki potencjał reaktywny materiału. Obie fazy są źródłem krzemu i glinu dostępnych w środowisku alkalicznym. Podczas kalcynacji struktura kaolinitu ulega częściowej dehydroksylacji. Prowadzi to do powstania fazy amorficznej o zwiększonej reaktywności. Jednocześnie w materiale pozostają resztkowe składniki krystaliczne. Taki obraz fazowy jest zgodny z opisami metakaolinu otrzymywanego w kontrolowanych warunkach termicznych [4,145–147]. Skład fazowy badanego metakaolinu wskazuje na przewagę reaktywnych faz glinokrzemianowych. Obecne są także niewielkie ilości faz krystalicznych o ograniczonej reaktywności. Taki układ sprzyja stabilnemu przebiegowi reakcji w środowisku alkalicznym. Jednocześnie pozwala ograniczyć wpływ składników nierozpuszczalnych na wyniki badań. Dzięki temu metakaolin może pełnić funkcję materiału odniesienia w analizach porównawczych z popiołami lotnymi i innymi surowcami stosowanymi do geopolimeryzacji.

Jako wypełniacz do warstwowych kompozytów geopolimerowych wybrano piasek kwarcowy pochodzący z piaskowni w Świętochłowicach. Materiał ten zawiera głównie krzemionkę, dlatego jest chemicznie stabilny. Wykazuje wysoką odporność na działanie czynników chemicznych i podwyższonej temperatury. W środowisku alkalicznym materiał ten wykazuje bardzo niską reaktywność. Dzięki temu może pełnić funkcję obojętnego składnika w kompozycie. Umożliwia to porównanie jego zachowania z surowcami reaktywnymi, takimi jak popioły lotne i metakaolin. Na rysunku 14 przedstawiono morfologię piasku kwarcowego uzyskaną metodą mikroskopii elektronowej wraz z analizą EDS.



Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	50,25±0,43	63,92±0,55
Al	K	0,99±0,07	0,75±0,06
Si	K	48,76±0,48	35,33±0,35
Total		100,00	100,00

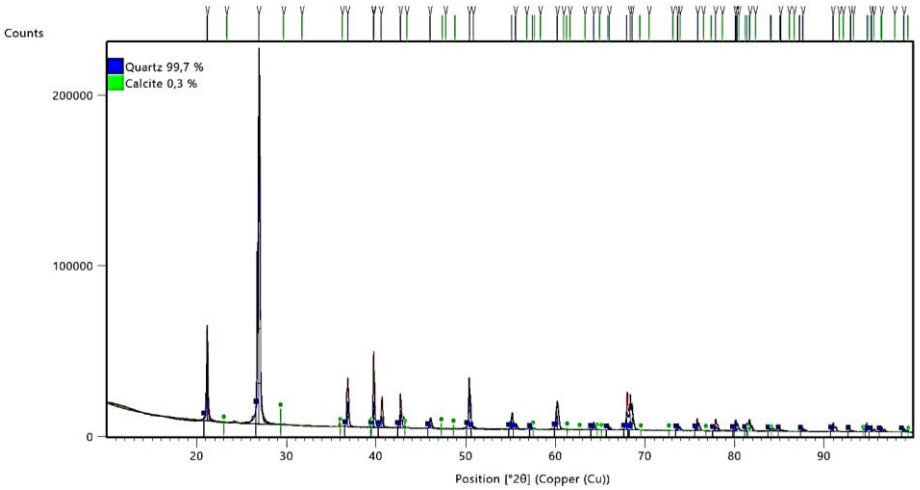
Rysunek 14. *Morfologia piasku kwarcowego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS.*

Analiza morfologii piasku kwarcowego wykazała, że ziarna mają regularny, klinowy kształt i ostre krawędzie. Taka forma jest typowa dla naturalnych piasków o wysokiej zawartości krzemionki. Kształt ziaren wynika z procesów wietrzenia oraz transportu mechanicznego. Klinowe ziarna sprzyjają dobremu wypełnieniu przestrzeni w kompozycie. Ułatwiają także mechaniczne zespolenie w matrycy. Może to korzystnie wpływać na właściwości mechaniczne całego układu [148,149]. Analiza składu metodą EDS potwierdziła, że piasek kwarcowy zbudowany jest głównie z tlenu (O, 50,25% mas.; 63,92% at.) oraz krzemu (Si, 48,76% mas.; 35,33% at.). Taki stosunek pierwiastków odpowiada typowej strukturze SiO_2. Wskazuje to na dominację fazy krzemionkowej. Zawartość glinu jest bardzo niska (Al, 0,99% mas.; 0,75% at.). Świadczy to o śladowych domieszkach mineralnych. Ich obecność nie wpływa istotnie na chemiczną stabilność materiału [148,150]. Piasek kwarcowy jest uznawany za materiał chemicznie stabilny. Wykazuje wysoką odporność na działanie wody, cementu oraz roztworów zasadowych. W typowych warunkach nie wchodzi w reakcje chemiczne z matrycą. Dzięki temu pełni funkcję obojętnego wypełniacza w kompozytach budowlanych. Nie wpływa bezpośrednio na przebieg reakcji wiązania spoiwa [149,151]. Wysoka zawartość krzemionki wiąże się z dużą twardością ziaren. Świadczy to o wysokiej odporności mechanicznej materiału. Ziarna są również odporne na ścieranie. Cecha ta ma znaczenie przy obciążeniach mechanicznych kompozytu. Sprzyja to zwiększeniu trwałości materiałów kompozytowych [149].

W tabeli 7 przedstawiono fazy mineralogiczne zidentyfikowane w piasku kwarcowym. Zestawienie to oparto na wynikach analizy rentgenowskiej. Na rysunku 15 pokazano dyfraktogram ilustrujący skład fazowy materiału. Widoczne refleksy pozwalają na identyfikację faz krystalicznych. Analiza intensywności pików umożliwia ocenę ich udziału ilościowego. Dane te pozwalają także określić stopień czystości fazy SiO_2.

Tabela 7. *Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w piasku kwarcowym.*

Piasek kwarcowy			
Nazwa fazy	Kod wzorca dyfrakcyjnego	Wzór chemiczny	Ilościowy udział fazy [%]
Kwarc	01-075-8321	SiO_2	99,7
Kalcyt	00-001-0837	$Ca\ CO_3$	0,3



Rysunek 15. *Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy piasku kwarcowego.*

Analiza fazowa wykazała, że piasek kwarcowy jest niemal jednofazowy. Dominującą fazą jest kwarc (SiO_2, 99,7%). Stwierdzono jedynie śladową ilość kalcytu ($CaCO_3$, 0,3%). Tak wysoka zawartość krzemionki potwierdza wysoką czystość mineralną materiału. Skład ten odpowiada wymaganiom stawianym piaskom kwarcowym stosowanym jako wypełniacze i surowce przemysłowe. W takich materiałach udział SiO_2 zwykle przekracza 99% [152,153]. Dominująca obecność kwarcu wynika z jego powszechnego występowania jako podstawowego minerału krzemionkowego. Kwarc jest odporny na wietrzenie chemiczne i mechaniczne. Zachowuje stabilność także podczas transportu w środowisku naturalnym. Dzięki temu utrzymuje swoją strukturę krystaliczną w postaci ziaren piasku. Cecha ta decyduje o jego trwałości i szerokim zastosowaniu w materiałach budowlanych [154]. Faza SiO_2 jest chemicznie stabilna w typowych warunkach użytkowania. Nie reaguje istotnie w środowisku alkalicznym ani w obecności wody czy spoiw cementowych. Dzięki temu nie wpływa

na przebieg reakcji wiązania. Zachowuje swoje właściwości w czasie eksploatacji. Z tego powodu piasek kwarcowy jest odpowiednim wypełniaczem w materiałach kompozytowych i konstrukcyjnych [152,155]. Niewielka zawartość kalcytu wskazuje na obecność śladowych domieszek mineralnych. Ich ilość jest zbyt mała, aby wpływać na właściwości piasku jako wypełniacza. Materiał zachowuje cechy typowe dla surowców o wysokiej czystości krzemionki. W literaturze podkreśla się, że piaski o zawartości SiO_2 przekraczającej 99% cechują się dużą odpornością chemiczną i mechaniczną. Są również stabilne w podwyższonej temperaturze. Z tego powodu znajdują zastosowanie w budownictwie, filtracji oraz w produkcji szkła i materiałów ceramicznych [152,154,155]. Skład fazowy badanego piasku kwarcowego wskazuje na niemal wyłączną obecność krzemionki przy śladowym udziale kalcytu. Jest to typowe dla piasków o wysokiej czystości mineralnej. Potwierdza to jego stabilność chemiczną i strukturalną. Materiał nie wykazuje istotnej reaktywności w środowisku alkalicznym. Dzięki temu może pełnić funkcję obojętnego wypełniacza w analizowanych kompozytach i materiałach konstrukcyjnych.

W tabeli 8 przedstawiono skład tlenkowy materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych wykonany metodą XRF. Zestawienie obejmuje popiół lotny ze spalania węgla kamiennego, popiół ze spalania węgla brunatnego, metakaolin oraz piasek kwarcowy. Dane pozwalają porównać zawartość podstawowych tlenków, takich jak SiO_2, Al_2O_3, CaO i Fe_2O_3. Na tej podstawie można ocenić potencjał poszczególnych surowców do tworzenia reaktywnej matrycy. Analiza umożliwia także określenie ich zdolności do budowy stabilnej fazy nieorganicznej w kompozytach warstwowych.

Tabela 8. *Analiza składu tlenkowego materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych.*

Skład tlenkowy [%]	**Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego**	**Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego**	**Metakaolin**	**Piasek kwarcowy**
SiO_2	59,246	21,501	51,838	98,985
Al_2O_3	30,677	35,232	46,457	-
Fe_2O_3	4,002	8,014	0,590	0,179
CaO	2,365	24,587	0,231	0,170
K_2O	2,126	0,098	0,641	0,328
TiO_2	0,803	0,446	0,176	-
SO_3	0,552	9,873	-	0,126
MnO, V_2O_5, SrO, ZnO, Cr_2O_3, ZrO_2 <0,05%				

Analiza składu tlenkowego wykazała wyraźne różnice między badanymi surowcami. Różnice te mają bezpośredni wpływ na ich reaktywność i zdolność do tworzenia matrycy w kompozycie. Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego zawiera głównie SiO_2 (59,25%) oraz Al_2O_3 (30,68%). Taki skład wskazuje na wysoki udział fazy glinokrzemianowej. Sprzyja to aktywności w procesie alkalicznej aktywacji. Zawartość Fe_2O_3 wynosi 4,00%, a CaO 2,37%. Obecne są także K_2O (2,13%), TiO_2 (0,80%) oraz SO_3 (0,55%). Składniki te mogą wpływać na cechy mikrostruktury. Ich udział nie ogranicza jednak zdolności materiału do tworzenia reaktywnej matrycy [11,136]. Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego zawiera mniej SiO_2 (21,50%) i więcej Al_2O_3 (35,23%) niż popiół z węgla kamiennego. Wyróżnia się także wysoką zawartością CaO (24,59%) oraz SO_3 (9,87%). Taki skład wskazuje na większy udział faz wapniowych i siarczanowych. Może to wpływać na mechanizm wiązania w środowisku alkalicznym. Obecność wapnia sprzyja tworzeniu produktów typu C-A-S-H. Fazy siarczanowe mogą modyfikować przebieg reakcji i tempo twardnienia. Zawartość Fe_2O_3 wynosi 8,01%, K_2O 0,10%, a TiO_2 0,45%. Składniki te mogą wpływać na rozwój mikrostruktury kompozytu. Mogą także oddziaływać na przebieg reakcji alkalicznych [11,136]. Metakaolin zawiera wysokie ilości SiO_2 (51,84%) i Al_2O_3 (46,46%). Udział pozostałych tlenków jest niewielki. Zawartość Fe_2O_3 wynosi 0,59%, CaO 0,23%, K_2O 0,64%, a TiO_2 0,18%. Taki skład sprzyja wysokiej reaktywności w układach krzemowo-glinowych. Materiał nie zawiera istotnych ilości wapnia ani faz siarczanowych. Dzięki temu reakcje w środowisku alkalicznym przebiegają w sposób bardziej przewidywalny. Z tego powodu metakaolin stanowi odpowiedni materiał odniesienia w badaniach nad kompozytami aktywowanymi alkalicznie [4,156]. Piasek kwarcowy zawiera niemal wyłącznie SiO_2 (98,99%). Udział pozostałych tlenków jest bardzo niski. Zawartość Al_2O_3 wynosi 0,99%, Fe_2O_3 0,18%, K_2O 0,33%, a SO_3 0,13%. Ilość CaO jest minimalna i wynosi 0,17%. Taki skład potwierdza wysoką czystość i stabilność chemiczną materiału. W środowisku alkalicznym nie wykazuje on istotnej reaktywności. Pełni więc funkcję obojętnego wypełniacza. Zapewnia stabilność geometryczną kompozytu i sprzyja jego jednorodności [153,154]. We wszystkich badanych materiałach stwierdzono także śladowe ilości tlenków, takich jak MnO, V_2O_5, SrO, ZnO, Cr_2O_3 i ZrO_2, których zawartość nie przekracza 0,05%. Ilości te nie wpływają istotnie na właściwości chemiczne ani reaktywność surowców. Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego i brunatnego mogą pełnić funkcję aktywnej matrycy w kompozytach. Różnice w zawartości SiO_2, Al_2O_3 i CaO decydują o mechanizmie wiązania oraz typie powstającej struktury. Metakaolin, dzięki jednorodnemu i powtarzalnemu składowi, umożliwia porównanie reaktywności w warunkach modelowych.

Piasek kwarcowy pozostaje chemicznie stabilny i nie uczestniczy w reakcjach. Pełni rolę obojętnego wypełniacza, wpływając głównie na właściwości mechaniczne materiału.

W tabeli 9 przedstawiono rozkład wielkości cząstek materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych. Zestawienie pozwala ocenić stopień jednorodności uziarnienia poszczególnych surowców. Dane te mają znaczenie przy analizie właściwości reologicznych świeżej masy. Wielkość i rozkład cząstek wpływają na urabialność oraz zagęszczanie mieszanki. Parametry te determinują także przebieg formowania i proces wiązania kompozytu.

Tabela 9. *Charakterystyka rozkładu wielkości cząstek materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych.*

Charakterystyka wielkości cząstek	**Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego**	**Popiół lotny ze spalania węgla brunatnego**	**Metakaolin**	**Piasek kwarcowy**
D_{10} [μm]	2,399	3,965	1,6108	253,792
D_{50} [μm]	12,789	22,248	8,948	348,269
D_{90} [μm]	32,326	43,867	27,301	477,907
Średnia wielkość cząstek [μm]	16,269	24,374	12,682	396,421
Odchylenie standardowe [μm]	0,032	0,005	0,023	0,015

Analiza rozkładu wielkości cząstek wykazała różnice między badanymi surowcami. Różnice te wpływają na reaktywność, jednorodność mieszanki oraz właściwości mechaniczne i reologiczne kompozytu. Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego zawiera głównie drobną frakcję. Wartości charakterystyczne wynoszą D10 równe 2,40 μm, D50 równe 12,79 μm i D90 równe 32,33 μm. Średnia wielkość cząstek to 16,27 μm. Taki rozkład oznacza dużą powierzchnię właściwą. Sprzyja to intensywniejszej reakcji w środowisku alkalicznym. Zwiększona dostępność powierzchni ułatwia przebieg geopolimeryzacji. Może to prowadzić do bardziej jednorodnej matrycy [143,157]. W popiele lotnym ze spalania węgla brunatnego rozkład cząstek jest szerszy. Wartości wynoszą D10 równe 3,97 μm, D50 równe 22,25 μm i D90 równe 43,87 μm. Średnia wielkość cząstek to 24,37 μm. Oznacza to większy udział frakcji grubych. Większe ziarna mają mniejszą powierzchnię właściwą w przeliczeniu na jednostkę masy. Może to ograniczać kontakt z roztworem alkalicznym. W efekcie reakcja geopolimerowa może przebiegać wolniej. Badania wskazują, że drobniejsze cząstki zwykle wykazują wyższą aktywność reaktywną [143,158]. Metakaolin charakteryzuje się

najmniejszymi średnicami cząstek spośród analizowanych materiałów reaktywnych. Wartości wynoszą D10 równe 1,61 µm, D50 równe 8,95 µm i D90 równe 27,30 µm, a średnia 12,68 µm. Taki rozkład wskazuje na przewagę drobnej frakcji. Drobne cząstki zapewniają dużą powierzchnię właściwą. Sprzyja to wysokiej reaktywności w układzie krzemowo-glinowym. Ułatwia to także porównanie jego zachowania z popiołami lotnymi w badaniach nad kompozytami aktywowanymi alkalicznie [2,156]. W odróżnieniu od materiałów reaktywnych piasek kwarcowy zawiera bardzo grubą frakcję. Wartości wynoszą D10 równe 253,79 µm, D50 równe 348,27 µm i D90 równe 477,91 µm. Średnia wielkość cząstek to 396,42 µm. Tak duże ziarna nie uczestniczą w reakcjach chemicznych w środowisku alkalicznym. Pełnią funkcję obojętnego wypełniacza. Wpływają na stabilność wymiarową kompozytu. Sprzyjają także uzyskaniu jednorodnej struktury materiału [148,149].

Na podstawie porównania właściwości fizykochemicznych i granulometrycznych wybrano do dalszych badań popiół lotny ze spalania węgla kamiennego oraz piasek kwarcowy. Popiół z węgla kamiennego zawiera dużo SiO_2 i Al_2O_3 oraz znaczący udział fazy amorficznej. Zapewnia to dobrą reaktywność w środowisku alkalicznym. Drobne cząstki zwiększają powierzchnię właściwą i ułatwiają przebieg reakcji. Niska zawartość CaO i Fe_2O_3 ogranicza udział faz, które mogłyby zaburzać tworzenie jednorodnej matrycy. Piasek kwarcowy składa się niemal wyłącznie z krzemionki i ma dużą frakcję ziaren. Jest chemicznie stabilny i nie reaguje w układzie alkalicznym. Pełni funkcję obojętnego wypełniacza. Wpływa na stabilność i właściwości mechaniczne kompozytu, nie zmieniając mechanizmu wiązania. Zestawienie wszystkich wyników wskazuje, że popiół z węgla kamiennego najlepiej sprawdza się jako składnik reaktywny, a piasek jako faza wypełniająca. Połączenie tych dwóch materiałów umożliwia uzyskanie kompozytów o spójnej mikrostrukturze i powtarzalnych właściwościach. Popiół ze spalania węgla brunatnego nie został wybrany do dalszych badań ze względu na zmienny skład chemiczny i większą niejednorodność. Cechy te mogłyby utrudniać jednoznaczną interpretację wyników. W niniejszej części pracy przedstawiono jedynie pojedynczy wynik jako analizę wstępną. Metakaolin nie został uwzględniony w dalszym etapie ze względu na wysoką cenę. Ogranicza to zasadność jego zastosowania w kontekście potencjalnych wdrożeń technologicznych.

8. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

8.1. CZĘŚĆ I – CHARAKTERYSKTYKA SUROWCÓW, MATERIAŁÓW NATURALNYCH I DOBÓR WARUNKÓW SYNTEZY

8.1.1. Charakterystyka surowców

W części 7 pracy opisano materiały użyte do syntezy kompozytów warstwowych. Przedstawiono ich właściwości fizyczne, morfologię, skład fazowy, skład tlenkowy oraz rozkład wielkości cząstek. W części 8 rozszerzono badania o analizę struktury porowatej dwóch wybranych materiałów. Były to popiół lotny ze spalania węgla kamiennego oraz piasek kwarcowy. Do oceny porowatości zastosowano metody sorpcji fizycznej i porozymetrię rtęciową. Wyniki pozwoliły dokładniej określić ich właściwości teksturalne.

W tabeli 10 przedstawiono wyniki analizy materiałów bazowych uzyskane metodą sorpcji fizycznej. Metoda ta pozwala określić właściwości teksturalne ważne przy projektowaniu kompozytów warstwowych. Zestawienie dotyczy popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego oraz piasku kwarcowego. Podano takie parametry jak powierzchnia właściwa, objętość porów oraz rodzaj porowatości. Parametry te pokazują, jak bardzo rozwinięta jest powierzchnia dostępna do kontaktu z matrycą. Pozwalają też ocenić możliwą zdolność materiału do adsorpcji.

Tabela 10. *Charakterystyka materiałów bazowych metodą sorpcji fizycznej.*

Badana cecha		**Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego**	**Piasek kwarcowy**
Powierzchnia właściwa [m^2/g]	Powierzchnia BET	5,270	0,505
	Powierzchnia właściwa DR	6,533	0,551
	Powierzchnia właściwa BJH	3,630	0,493
Objętość porów [cm^3/g]	Całkowita objętość porów w pojedynczym punkcie (przy $P/P_0 = 0.99$)	0,006	0,001
	Objętość mikroporów (DR)	0,002	0,000
	Objętość mezoporów (BJH)	0,005	0,001

Rozmiar porów [nm]	Średnica mikroporów (DR)	1,676	2,125
	Średnica mezoporów (BJH)	1,690	1,944
	Średnia średnica porów	4,392	9,943

Wyniki analizy sorpcji fizycznej pokazują wyraźne różnice we właściwościach teksturalnych popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego i piasku kwarcowego. Różnice te są zgodne z charakterem tych materiałów oraz z danymi podawanymi w literaturze. Popiół lotny ma kilkukrotnie większą powierzchnię właściwą niż piasek kwarcowy. Dotyczy to wartości wyznaczonych metodą BET oraz metodami DR i BJH. Powierzchnia właściwa w zakresie 5-7 m^2/g jest typowa dla popiołów lotnych z dużym udziałem fazy amorficznej. Wartości te wiążą się także z obecnością rozwiniętej mikro- i mezoporowatości. Takie cechy są często opisywane w pracach dotyczących popiołów stosowanych jako prekursory materiałów aktywowanych alkalicznie [2,3]. Większa powierzchnia właściwa sprzyja intensywniejszym reakcjom na granicy faz. Poprawia też zwilżalność i adhezję w matrycy kompozytowej. Popiół lotny ma wyraźnie większą całkowitą objętość porów niż piasek kwarcowy. Ma również większy udział mikroporów i mezoporów. W badanym materiale stwierdzono mikropory o średnicy około 1,7 nm. Obecne są także mezopory o średnicy zbliżonej do 1,7 nm. Taka struktura jest typowa dla popiołów powstających podczas spalania w wysokiej temperaturze. Gwałtowne chłodzenie cząstek prowadzi do powstania porowatej, częściowo zeszklonej mikrostruktury [159]. Dane literaturowe pokazują, że taka struktura porowa sprzyja sorpcji. Zwiększa też reaktywność chemiczną popiołów w środowisku alkalicznym. Ma to bezpośrednie znaczenie dla przebiegu reakcji wiązania. Wpływa również na sposób kształtowania się struktury geopolimerowej [2,6]. Piasek kwarcowy, w przeciwieństwie do popiołu lotnego, ma bardzo niską powierzchnię właściwą. Jej wartość nie przekracza 0,6 m^2/g. Materiał ten ma także niewielką objętość porów. Wynika to z jego krystalicznej budowy. Charakteryzuje się zwartą mikrostrukturą i brakiem rozwiniętej porowatości wewnętrznej. Takie właściwości są szeroko opisywane w literaturze dotyczącej kruszyw i wypełniaczy kwarcowych [67,160]. Większa średnia średnica porów w piasku kwarcowym wynika głównie z przestrzeni między ziarnami. Nie jest ona związana z porowatością wewnętrzną materiału. Taki typ porowatości potwierdza jego chemiczną obojętność. Oznacza też brak istotnego udziału w procesach sorpcji i reakcji chemicznych. Porównanie wyników z danymi literaturowymi potwierdza zasadność zastosowania popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego jako materiału o rozwiniętej strukturze porowatej. Wskazuje również na jego podwyższoną aktywność powierzchniową. Dzięki temu może on aktywnie uczestniczyć

w tworzeniu matrycy kompozytowej [2,3,6,159]. Niska powierzchnia właściwa i mała porowatość piasku kwarcowego wskazują na jego rolę jako stabilnego wypełniacza. Materiał ten jest chemicznie obojętny. Jego zadaniem jest kształtowanie struktury kompozytu. Wpływa też na jego właściwości mechaniczne. Nie bierze jednak istotnego udziału w reakcjach chemicznych zachodzących w materiale [67,160].

W tabeli 11 przedstawiono wyniki analizy materiałów bazowych wykonanej metodą porozymetrii rtęciowej. Metoda ta pozwala ocenić strukturę porowatą w szerokim zakresie średnic porów. Zestawienie obejmuje popiół lotny ze spalania węgla kamiennego oraz piasek kwarcowy. Na podstawie wyników można określić całkowitą objętość porów. Można też przeanalizować rozkład ich wielkości. Dane te pozwalają ocenić stopień rozwinięcia porowatości badanych surowców.

Tabela 11. *Charakterystyka materiałów bazowych metodą porozymetrii rtęciowej.*

Surowiec	**Całkowita porowatość [%]**	**Międzycząsteczkowa porowatość [%]**	**Wewnątrzcząsteczkowa porowatość [%]**	**Zakres średnic porów [μm]**	**Objętość intrudowanej rtęci [cm^3/g]**
Popiół lotny ze spalania węgla kamiennego	17,809	17,808	0,0004	4,27-116,44	0,287
Piasek kwarcowy	8,868	8,868	0,0000	4,26- 115,13	0,037

Badanie porowatości metodą porozymetrii rtęciowej wykazało wyraźne różnice między popiołem lotnym ze spalania węgla kamiennego a piaskiem kwarcowym. Popiół lotny ma całkowitą porowatość na poziomie 17,81%. Prawie całość tej wartości stanowi porowatość międzycząsteczkowa wynosząca 17,808%. Udział porów wewnątrzcząsteczkowych jest znikomy i wynosi 0,0004%. Średnice porów mieszczą się w zakresie od 4,27 do 116,44 μm. Objętość intrudowanej rtęci wynosi 0,287 cm^3/g. Wyniki te wskazują na dobrze rozwiniętą strukturę porową, w której dominują przestrzenie między cząstkami. Struktura ta powstaje w wyniku szybkiego schładzania cząstek oraz częściowego zeszklenia fazy amorficznej. Takie obserwacje są zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi popiołów lotnych stosowanych w geopolimerach i innych kompozytach mineralnych [2,3]. Wysoka porowatość międzycząsteczkowa ułatwia wnikanie roztworów alkalicznych w strukturę materiału. Zwiększa dostępność powierzchni reaktywnej. Wpływa też na sposób kształtowania się mikrostruktury matrycy kompozytowej. Piasek kwarcowy ma znacznie niższą całkowitą porowatość wynoszącą 8,87%. Składa się ona wyłącznie z porów międzycząsteczkowych. Porowatość wewnątrzcząsteczkowa jest praktycznie zerowa. Zakres średnic porów

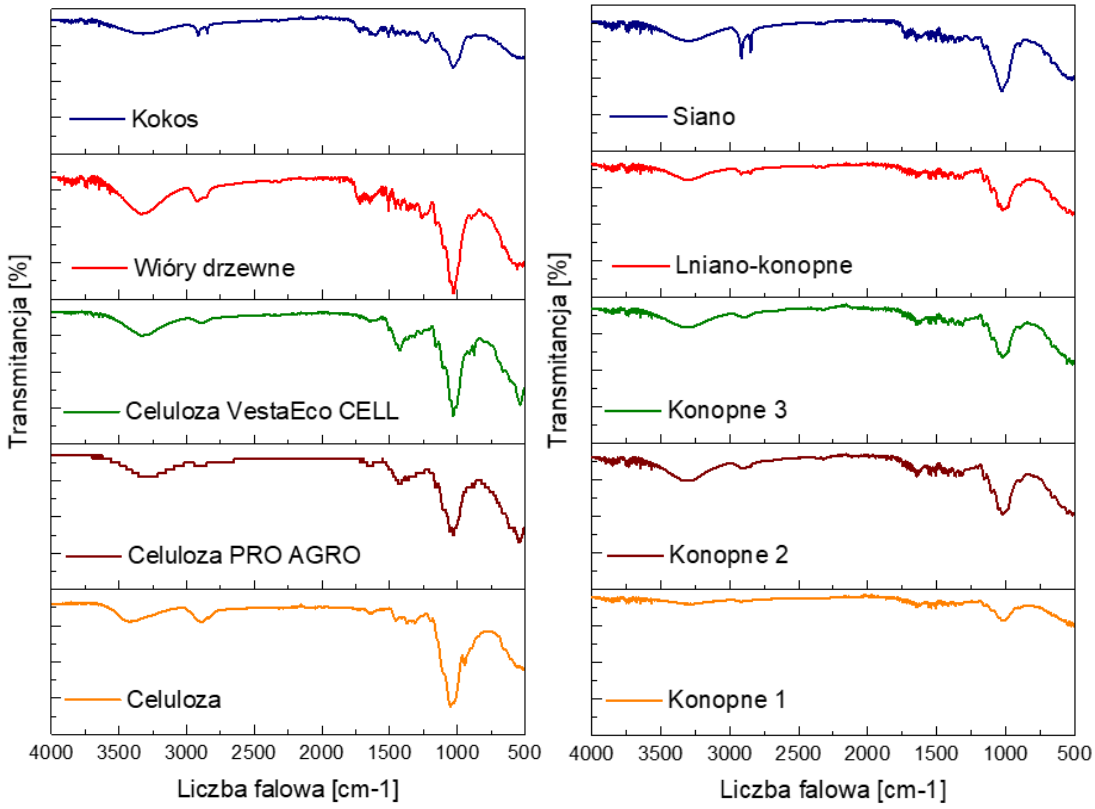
od 4,26 do 115,13 μm jest zbliżony do wartości dla popiołu. Objętość intrudowanej rtęci jest jednak ponad siedmiokrotnie mniejsza i wynosi 0,037 cm^3/g. Wynik ten potwierdza zwarty i słabo rozwinięty charakter porowaty piasku kwarcowego. Taka struktura jest typowa dla ziaren krystalicznych. Ogranicza ona dostępność powierzchni do sorpcji i reakcji chemicznych. Potwierdza to rolę piasku jako stabilnego wypełniacza wzmacniającego kompozyty warstwowe pod względem mechanicznym [67,160]. Wyniki porozymetrii rtęciowej pokazują, że popiół lotny ze spalania węgla kamiennego ma wyraźnie rozwiniętą porowatość. Taka struktura sprzyja jego reaktywności chemicznej. Piasek kwarcowy pełni natomiast rolę wypełniacza o charakterze strukturalnym. Ma on ograniczoną powierzchnię aktywną. Wyniki te są zgodne z wcześniejszymi obserwacjami z analiz morfologicznych i sorpcyjnych.

8.1.2. Charakterystyka materiałów naturalnych

Przed wyborem dwóch materiałów przeznaczonych na warstwę izolacyjną kompozytów warstwowych przeprowadzono wstępne badania różnych włókien naturalnych. Oceniono ich właściwości fizyczne i termiczne. Przeanalizowano także ich strukturę i teksturę. Badaniami objęto dziewięć rodzajów włókien. Były to dwie formy celulozy PRO AGRO i VestaEco, siano i wióry drzewne z firmy Dach-Wkręt, włókno kokosowe ze Sri Lanki oferowane przez PROMAT, włókna lniano-konopne oraz trzy typy włókna konopnego z Double Raw Fiberworks. Zbadano również gotowe wyroby włókniste w postaci mat, filców i wełn naturalnych. Mata kokosowa pochodziła z hurtowni tapicerskiej Akces. Pozostałe filce i wełny zakupiono w firmie Double Raw Fiberworks. Celem było porównanie najważniejszych parametrów tych materiałów. Uwzględniono właściwości fizykochemiczne i termiczne. Oceniono także cechy mikrostrukturalne. Większość surowych włókien jest łatwo dostępna na rynku. Siano i wióry drzewne wybrano ze względu na brak ich wcześniejszego zastosowania w izolacyjnych przegrodach budowlanych. Badane produkty włókniste zawierały wcześniej opisane włókna. Pozwoliło to porównać ich zachowanie w formie złożonej z właściwościami pojedynczych włókien. Dodatkowo przeprowadzono analizę rynku. Oceniono dostępność materiałów, ich przewodność cieplną, aspekty ekologiczne oraz koszty. Wyniki tej oceny stanowiły podstawę do wyboru surowców do dalszej syntezy kompozytów warstwowych.

Na rysunku 16 pokazano widma absorpcyjne w podczerwieni dla dziewięciu badanych włókien naturalnych. Jako materiał odniesienia zastosowano celulozę firmy Sigma Aldrich. Widma FT-IR pozwalają zidentyfikować charakterystyczne grupy funkcyjne obecne w strukturze włókien. Umożliwiają też ocenę stopnia uwodnienia materiału. Na ich podstawie

można określić podstawowe cechy budowy chemicznej. Porównanie widm pozwala wskazać podobieństwa i różnice między włóknami surowymi. Umożliwia również wykrycie zmian chemicznych związanych z obróbką materiału lub jego pochodzeniem geograficznym.



Rysunek 16. *Widma FT-IR badanych włókien naturalnych.*

Wszystkie próbki wykazują szerokie pasmo w zakresie 3600-3000 cm^{-1}, które odpowiada drganiom rozciągającym grup O-H obecnych w strukturze celulozy, hemicelulozy i ligniny. Szerokość tego pasma wynika z rozbudowanej sieci wiązań wodorowych typowej dla włókien lignocelulozowych [40]. W obszarze około 2900 cm^{-1} widoczne są pasma drgań C-H w grupach metylowych i metylenowych, charakterystyczne dla łańcuchów polisacharydowych [40]. Właściwości strukturalne celulozy, w tym jej organizacja krystaliczna i amorficzna, wpływają na kształt pasm w zakresie 1500-900 cm^{-1} [161]. Pasmo około 1430 cm^{-1} jest związane z drganiami deformacyjnymi CH_2 i bywa traktowane jako wskaźnik uporządkowania struktury [161]. Różnice w intensywności tego sygnału między próbkami wskazują na zróżnicowany udział fazy krystalicznej. W zakresie 1375-1315 cm^{-1} obserwuje się pasma związane z drganiami C-H oraz strukturą celulozy [162]. Zmiany intensywności w tym obszarze mogą świadczyć o różnym stopniu uporządkowania sieci krystalicznej

oraz ewentualnych modyfikacjach struktury [162]. Silne pasmo w rejonie 1160 cm^{-1} odpowiada asymetrycznym drganiom mostka C-O-C w wiązaniach β-1,4-glikozydowych [163]. Sygnały w zakresie 1050-1030 cm^{-1} są przypisywane drganiom C-O w cząsteczce celulozy [163]. Obecność tych pasm we wszystkich próbkach potwierdza dominujący udział celulozy jako głównego składnika włókien. W zakresie 1735-1720 cm^{-1} widoczne są pasma pochodzące od drgań grup karbonylowych C=O w hemicelulozach oraz estrach ligniny [164]. Sygnał ten jest wyraźniejszy w wiórach drzewnych oraz niektórych włóknach konopnych, co wskazuje na większą zawartość składników nie celulozowych [164]. Stosunek intensywności pasm 1430/898 cm^{-1} może być wykorzystany do oceny stopnia krystaliczności celulozy [165]. W celulozach technicznych obserwuje się wyższy udział pasma 1430 cm^{-1} w stosunku do 898 cm^{-1}, co sugeruje większe uporządkowanie struktury [165]. Pasmo około 898 cm^{-1} jest charakterystyczne dla wiązań β-glikozydowych i wiąże się z obecnością fazy amorficznej [166]. Wyższa względna intensywność tego pasma w surowych włóknach roślinnych wskazuje na większy udział obszarów nieuporządkowanych [166]. Różnice w intensywności pasm powierzchniowych mogą również wynikać z odmiennej budowy warstwy zewnętrznej włókien oraz obecności zanieczyszczeń naturalnych [167]. Dotyczy to szczególnie włókien kokosowych i drzewnych, w których skład chemiczny jest bardziej złożony [167]. W obszarze 1600-1500 cm^{-1} obserwuje się pasma charakterystyczne dla drgań szkieletowych pierścieni aromatycznych ligniny [168]. Najsilniejsze są one w wiórach drzewnych i włóknach kokosowych, co potwierdza większą zawartość ligniny w tych próbkach [168]. W celulozie referencyjnej pasma ligninowe są bardzo słabe lub nieobecne, co świadczy o jej wysokiej czystości. Analiza widm FT-IR pokazuje, że wszystkie badane materiały mają wspólny szkielet celulozowy, natomiast różnią się zawartością ligniny, hemicelulozy oraz stopniem krystaliczności. Otrzymane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi struktury chemicznej włókien lignocelulozowych.

W tabeli 12 przedstawiono parametry fizyczne badanych włókien naturalnych. Uwzględniono właściwości istotne przy ich zastosowaniu jako warstwy izolacyjne w kompozytach warstwowych. Zestawienie pozwala porównać włókna pod względem gęstości objętościowej i przewodnictwa cieplnego. Parametry te wpływają na zachowanie materiału w warunkach eksploatacyjnych. Analiza danych umożliwia ocenę ich przydatności przy projektowaniu lekkich i energooszczędnych kompozytów. Stanowi też podstawę do dalszej selekcji materiałów do badań aplikacyjnych.

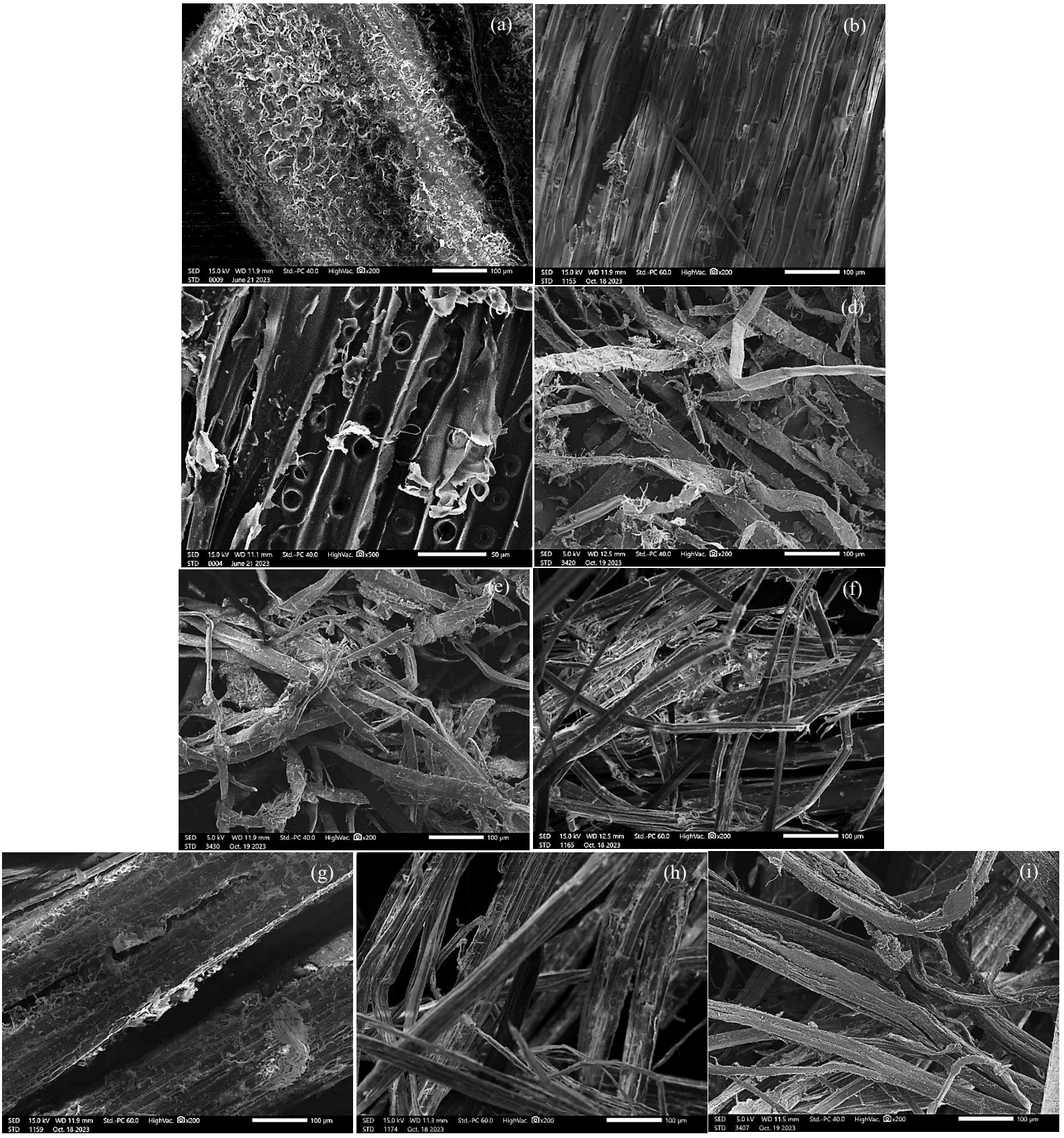
Tabela 12. *Parametry fizyczne włókien naturalnych.*

Włókna	**Gęstość [kg/m^3]**	**Przewodność cieplna [W/(m·K)]**
Celuloza PRO AGRO	52,06	0,040 ± 0,001
Celuloza VestaEco CELL	54,11	0,040 ± 0,001
Kokos	47,15	0,047 ± 0,001
Lniano-konopne	51,29	0,039 ± 0,001
Siano	46,35	0,042 ± 0,001
Konopne 1	39,20	0,052 ± 0,001
Konopne 2	35,75	0,045 ± 0,001
Konopne 3	34,23	0,045 ± 0,001
Wióry drzewne	34,06	0,044 ± 0,001

Wyniki parametrów fizycznych pokazują wyraźne różnice między badanymi włóknami naturalnymi. Różnice te wynikają ze składu chemicznego oraz budowy morfologicznej materiałów. Najwyższą gęstość objętościową mają celulozy techniczne PRO AGRO (52,06 kg/m³) i VestaEco CELL (54,11 kg/m³). Wynika to z ich wysokiego stopnia oczyszczenia, jednorodnej struktury i małej porowatości wewnętrznej. Jednocześnie materiały te mają najniższy współczynnik przewodzenia ciepła na poziomie około 0,039-0,040 W/(m·K). Wartości te są zgodne z danymi literaturowymi dla włókien celulozowych stosowanych w izolacjach budowlanych. Potwierdza to ich dobre właściwości termoizolacyjne [68,169,170]. Włókna lniano-konopne mają parametry zbliżone do celuloz technicznych. Ich gęstość wynosi 51,29 kg/m³. Współczynnik przewodzenia ciepła osiąga wartość 0,039 W/(m·K). Wynik ten potwierdza dominujący udział celulozy oraz umiarkowaną porowatość materiału. Zależność ta była widoczna także w analizie FT-IR. Dane literaturowe wskazują, że włókna lniane i konopne mogą osiągać parametry termoizolacyjne porównywalne z celulozą techniczną. Warunkiem jest odpowiednie rozluźnienie ich struktury [37,38]. Włókno kokosowe i siano mają niższą gęstość objętościową, odpowiednio 47,15 i 46,35 kg/m³. Wykazują też wyższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła, które wynoszą 0,047 i 0,042 W/(m·K). Wynika to z ich bardziej złożonej struktury lignocelulozowej. Materiały te zawierają więcej ligniny. Lignina zwiększa sztywność włókien. Jednocześnie ogranicza ilość zamkniętych porów powietrznych odpowiedzialnych za dobrą izolacyjność cieplną. Podobne wartości przewodnictwa cieplnego dla włókna kokosowego i innych materiałów roślinnych o wysokiej zawartości ligniny są często opisywane w literaturze [171,172]. Najniższą gęstość objętościową mają trzy warianty włókna konopnego

oraz wióry drzewne. Wartości te mieszczą się w zakresie od 34,06 do 39,20 kg/m³. Jednocześnie materiały te wykazują najwyższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła w przedziale 0,044-0,052 W/(m·K). Niska gęstość wynika z luźnej struktury i obecności dużych porów międzycząsteczkowych. Brak jednorodnej mikrostruktury oraz wysoki udział ligniny pogarszają jednak właściwości termoizolacyjne. Dane literaturowe wskazują, że materiały drzewne i surowe włókna konopne często mają wyższe wartości λ niż włókna wysokooczyszczone. Ogranicza to ich skuteczność jako samodzielnych izolatorów cieplnych [37,173]. Uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi. Potwierdzają, że najlepsze właściwości fizyczne mają materiały o wysokim udziale celulozy i jednorodnej strukturze. Włókna o dużej zawartości ligniny wykazują gorszą izolacyjność cieplną. Wyniki te stanowią ważne kryterium w procesie selekcji materiałów do dalszych badań aplikacyjnych. Są też istotne przy projektowaniu warstw izolacyjnych kompozytów warstwowych.

Na rysunku 17 pokazano obrazy mikroskopowe badanych włókien naturalnych. Ilustrują one zróżnicowanie morfologii i struktury powierzchniowej w zależności od rodzaju surowca. W zestawieniu uwzględniono włókna lignocelulozowe oraz materiały wysokooczyszczone. Umożliwia to bezpośrednie porównanie ich cech mikrostrukturalnych.



Rysunek 17. *Obrazy mikroskopowe włókien ilustrujące różne typy materiałów: a) włókna kokosowe, b) siano, c) wióry drzewne, d) celuloza PRO AGRO, e) celuloza VestaEco CELL, f) włókna lniano-konopne, g) włókna konopne 1, h) włókna konopne 2, i) włókna konopne 3.*

Analiza obrazów mikroskopowych z rysunku 17 pokazuje wyraźne różnice morfologiczne między badanymi włóknami naturalnymi. Różnice te są związane z ich pochodzeniem, składem chemicznym oraz stopniem przetworzenia. Dotyczą one kształtu i średnicy włókien. Obejmują także stopień rozwinięcia powierzchni oraz jednorodność struktury. Cechy te mają bezpośredni wpływ na właściwości fizyczne i funkcjonalne materiałów [40,163]. Włókna kokosowe (rys. 17a) mają dużą średnicę i nieregularny przekrój poprzeczny. Ich powierzchnia jest wyraźnie chropowata i często spękana. Taka morfologia jest typowa dla włókien o wysokiej zawartości ligniny. W literaturze wskazuje się, że sprzyja ona wysokiej sztywności i odporności biologicznej. Jednocześnie utrudnia zagęszczanie materiału i uzyskanie jednorodnej struktury kompozytu [171,174]. Siano (rys. 17b) ma wyraźnie niejednorodną strukturę. Składa się z cienkich i wydłużonych elementów włóknistych. Między nimi występują liczne pustki powietrzne. Taka budowa jest typowa dla surowców roślinnych o niskim stopniu przetworzenia. Obecność dużej ilości powietrza sprzyja dobrym właściwościom izolacyjnym. Może jednak obniżać wytrzymałość mechaniczną materiału. Utrudnia też uzyskanie jednorodnej struktury kompozytu [40,172]. Wióry drzewne (rys. 17c) mają nieregularny, płytkowy kształt i ostre krawędzie. Wynika to z mechanicznego rozdrabniania drewna. Taka morfologia w połączeniu z wysokim udziałem ligniny zwiększa sztywność materiału. Jednocześnie utrudnia jego równomierne rozmieszczenie w matrycy kompozytowej. Może też sprzyjać powstawaniu koncentracji naprężeń [37,173]. Celulozy techniczne PRO AGRO i VestaEco CELL (rys. 17d-e) mają jednorodną strukturę złożoną z cienkich i równomiernych włókien. Ich powierzchnia jest gładka. Taki obraz mikrostruktury jest typowy dla wysokooczyszczonych celuloz. W literaturze opisuje się go jako korzystny pod względem przewidywalnych interakcji z matrycą. Sprzyja on także dobrej zdolności do zagęszczania. Zapewnia również stabilne właściwości fizyczne materiału [163,175]. Włókna lniano-konopne (rys. 17f) mają bardziej uporządkowaną i wydłużoną morfologię niż włókna o wysokiej zawartości ligniny. Zachowują one równowagę między jednorodnością a rozwiniętą powierzchnią. Taka budowa sprzyja dobrym właściwościom mechanicznym. Może też zapewniać korzystną adhezję do matrycy kompozytowej. Zależność ta jest często opisywana w literaturze dotyczącej włókien lnianych i konopnych [38,40]. Trzy warianty włókien konopnych (rys. 17g-i) mają zbliżoną morfologię. Tworzą je długie i smukłe włókna o nierównomiernym przekroju. Ich powierzchnia jest umiarkowanie rozwinięta. Niewielkie różnice w stopniu rozwłóknienia i grubości mogą wynikać z innego pochodzenia surowca. Mogą też być efektem zastosowanej obróbki mechanicznej. Takie zależności są opisywane w literaturze dla włókien konopnych pozyskiwanych różnymi metodami [38,175]. Obrazy

mikroskopowe potwierdzają, że włókna o wysokim stopniu oczyszczenia mają najbardziej jednorodną strukturę. Materiały o dużej zawartości ligniny wykazują większą chropowatość i wyraźną niejednorodność. Wyniki te są zgodne z danymi literaturowymi. Stanowią one ważne uzupełnienie analiz chemicznych i fizycznych. Umożliwiają też pełniejszą ocenę przydatności badanych włókien jako materiałów izolacyjnych w kompozytach warstwowych [40,163,173].

Na rysunku 18 pokazano obrazy makroskopowe badanych włókien naturalnych. Umożliwiają one ocenę ich ogólnej postaci, stopnia rozwłóknienia, długości oraz jednorodności wizualnej. Zestawienie obejmuje materiały o różnym charakterze, od surowców o wysokiej zawartości ligniny po wysokooczyszczone włókna celulozowe. Pozwala to na bezpośrednie porównanie ich cech morfologicznych w skali makroskopowej. Obrazy te stanowią uzupełnienie wcześniejszych obserwacji mikroskopowych.



Rysunek 18. *Obrazy makroskopowe włókien ilustrujące różne typy materiałów: a) włókna kokosowe, b) siano, c) wióry drzewne, d) celuloza PRO AGRO, e) celuloza VestaEco CELL, f) włókna lniano-konopne, g) włókna konopne 1, h) włókna konopne 2, i) włókna konopne 3.*

Analiza obrazów makroskopowych z rysunku 18 potwierdza wyraźne różnice między badanymi włóknami naturalnymi pod względem formy przestrzennej, jednorodności i stopnia rozwłóknienia. Różnice te wynikają z pochodzenia surowca oraz stopnia jego przetworzenia. Obserwacje makroskopowe uzupełniają analizy mikroskopowe. Pozwalają ocenić cechy istotne z punktu widzenia formowania i projektowania warstw izolacyjnych kompozytów warstwowych. Włókna kokosowe, siano i wióry drzewne (rys. 18a-c) wykazują dużą niejednorodność kształtu i rozmiaru elementów. Tworzą luźną i nieregularną strukturę przestrzenną. Taka postać jest typowa dla surowców lignocelulozowych o wysokiej zawartości ligniny i niskim stopniu przetworzenia. Zależność ta jest opisywana w literaturze dotyczącej włókien roślinnych i materiałów drzewnych. Materiały te dobrze tworzą struktury porowate. Ich nieregularna geometria może jednak utrudniać uzyskanie jednorodnej gęstości. Może też ograniczać powtarzalność właściwości mechanicznych kompozytów [40,173,174]. Celulozy techniczne PRO AGRO i VestaEco CELL (rys. 18d-e) mają wyraźnie inną postać makroskopową. Charakteryzują się wysokim stopniem rozdrobnienia, dobrą jednorodnością i sypką strukturą. Taki wygląd jest typowy dla wysokooczyszczonych celuloz przemysłowych. W literaturze opisuje się go jako korzystny przy jednorodnym formowaniu materiału. Sprzyja on także dobrej zdolności do zagęszczania. Zapewnia również bardziej przewidywalne właściwości fizyczne [163,170]. Zbyt duża jednorodność i bardzo drobna frakcja mogą zwiększać gęstość objętościową gotowych wyrobów. Należy to uwzględnić przy projektowaniu lekkich warstw izolacyjnych w kompozytach warstwowych. Włókna lniano-konopne oraz trzy warianty włókien konopnych (rys. 18f-i) mają formę pośrednią między materiałami wysokooczyszczonymi a surowcami o wysokiej zawartości ligniny. Widoczne są wydłużone elementy włókniste o umiarkowanym stopniu rozwłóknienia. Materiały te wykazują też dobrą jednorodność wizualną. Literatura wskazuje, że taka postać sprzyja równowadze między niską masą, podatnością na formowanie a właściwościami mechanicznymi. Z tego względu włókna lniane i konopne są uznawane za atrakcyjne w zastosowaniach kompozytowych [37,38,40]. Niewielkie różnice między wariantami włókien konopnych potwierdzają, że pochodzenie surowca i sposób obróbki mechanicznej wpływają na ich postać makroskopową. Obrazy z rysunku 18 pokazują, że badane włókna obejmują szerokie spektrum form strukturalnych. Wśród nich znajdują się materiały luźne i wyraźnie niejednorodne oraz włókna bardziej uporządkowane i jednorodne. Wyniki te są zgodne z danymi literaturowymi. Mają one znaczenie przy ocenie przydatności surowców jako warstw izolacyjnych w kompozytach warstwowych. Dotyczy to zwłaszcza technologii formowania, jednorodności struktury oraz kontroli właściwości użytkowych gotowego materiału.

Na rysunku 19 pokazano makrofotografie włókien naturalnych w postaci mat, filców i wełny. Materiały te reprezentują różny stopień przetworzenia surowców roślinnych. Odzwierciedlają też odmienne formy użytkowe wyrobów włóknistych. Makrofotografie pozwalają ocenić strukturę przestrzenną materiału. Umożliwiają analizę jednorodności i stopnia zagęszczenia. Pokazują także sposób ułożenia włókien w skali makroskopowej. Zestawienie to pozwala porównać wpływ formy materiału, czyli maty, filcu lub wełny, na jego budowę przestrzenną. Daje też podstawę do oceny potencjalnych właściwości użytkowych.



Rysunek 19. *Makrofotografie włókien w postaci mat, filców i wełny: a) mata kokosowa, b) filc jutowy, c) filc lniany, d) filc lniano-konopny 1, e) filc konopny, f) filc lniano-jutowy, g) filc lniano-konopny 2, h) wełna lniana, i) wełna konopna, j) wełna lniano-jutowa.*

Analiza makrofotografii z rysunku 19 pokazuje wyraźny wpływ formy przetworzenia włókien, czyli maty, filcu i wełny, na ich strukturę przestrzenną. Zmienia się stopień zagęszczenia oraz jednorodność materiału. Różnice te mają istotne znaczenie dla właściwości mechanicznych. Wpływają też na izolacyjność cieplną. Są również ważne z punktu widzenia technologii wytwarzania warstw izolacyjnych kompozytów warstwowych. Zależności te są szeroko opisywane w literaturze dotyczącej naturalnych materiałów włóknistych [38,40,170]. Mata kokosowa (rys. 19a) ma grubą i wyraźnie splątaną strukturę. Tworzą ją włókna o dużej średnicy i wysokiej sztywności. Wynika to z dużej zawartości ligniny. Literatura wskazuje, że maty kokosowe cechują się dobrą odpornością mechaniczną i biologiczną. Ich nieregularna budowa oraz mała podatność na zagęszczanie mogą jednak utrudniać uzyskanie jednorodnej struktury warstwy izolacyjnej materiału kompozytowego [171,174]. Filce jutowy, lniany, lniano-konopny oraz konopny (rys. 19b-g) mają wyraźnie zwartą i bardziej jednorodną strukturę przestrzenną. Jest to efekt procesu filcowania. Włókna wzajemnie się zazębiają i tworzą stabilną sieć. Prowadzi to do poprawy spójności materiału. Dane literaturowe wskazują, że filce włókniste łączą porowatość z dobrą stabilnością mechaniczną. Taki kompromis sprawia, że są one atrakcyjne w zastosowaniach izolacyjnych i kompozytowych [37,38,172]. Różnice między poszczególnymi filcami wynikają głównie z rodzaju zastosowanych włókien oraz ich udziału ilościowego. Wpływa to na stopień zagęszczenia i elastyczność struktury. Wełny lniana, konopna i lniano-jutowa (rys. 19h-j) mają luźną i wyraźnie porowatą budowę. Między włóknami widoczne są liczne przestrzenie powietrzne. Taka struktura sprzyja dobrym właściwościom termoizolacyjnym. Wpływa też korzystnie na izolacyjność akustyczną. Zależność ta jest opisywana w literaturze dotyczącej naturalnych materiałów izolacyjnych na bazie włókien roślinnych [169,170]. Literatura wskazuje jednak, że luźna struktura wełen włóknistych może wymagać dodatkowej stabilizacji w zastosowaniach konstrukcyjnych. Jest to potrzebne, aby zapobiec osiadaniu materiału w trakcie eksploatacji [68,172]. Obrazy makroskopowe z rysunku 19 pokazują, że forma użytkowa materiału włóknistego wyraźnie wpływa na jego strukturę przestrzenną i potencjalne właściwości aplikacyjne. Filce zapewniają większą jednorodność i stabilność geometryczną. Wełny oferują najwyższą porowatość i duży potencjał izolacyjny. Mata kokosowa cechuje się większą sztywnością i odpornością mechaniczną. Obserwacje te są zgodne z danymi literaturowymi.

W tabeli 13 przedstawiono parametry fizyczne włókien naturalnych w postaci mat, filców i wełen. Uwzględniono właściwości istotne przy ich zastosowaniu jako warstw izolacyjnych w kompozytach warstwowych. Zestawienie obejmuje gęstość objętościową

oraz współczynnik przewodzenia ciepła. Analiza tych danych pozwala porównać wpływ formy użytkowej włókien na ich właściwości termoizolacyjne i strukturalne.

Tabela 13. *Parametry fizyczne włókien w postaci mat, filców i wełn.*

Włókna w postaci mat, filców i wełny	**Gęstość [kg/m3]**	**Przewodność cieplna [W/(m·K)]**
Mata kokosowa_1 warstwa	123,86	0,038 ± 0,001
Mata kokosowa_2 warstwy	121,6	0,040 ± 0,001
Mata kokosowa_3 warstwy	126,9	0,041 ± 0,001
Filc jutowy_1 warstwa	84,91	0,034 ± 0,001
Filc jutowy_2 warstwy	84,80	0,036 ± 0,001
Filc jutowy_3 warstwy	82,11	0,036 ± 0,001
Filc lniany_1 warstwa	113,50	0,034 ± 0,001
Filc lniany_2 warstwy	120,80	0,036 ± 0,001
Filc lniany_3 warstwy	123,27	0,038 ± 0,001
Filc lniano-konopny 1_1 warstwa	121,98	0,039 ± 0,001
Filc lniano-konopny 1_2 warstwy	118,65	0,040 ± 0,001
Filc lniano-konopny 1_3 warstwy	121,25	0,043 ± 0,001
Filc konopny_1 warstwa	116,69	0,035 ± 0,001
Filc konopny_2 warstwy	121,59	0,038 ± 0,001
Filc konopny_3 warstwy	121,42	0,039 ± 0,001
Filc lniano-jutowy_1 warstwa	106,54	0,037 ± 0,001
Filc lniano-jutowy_2 warstwy	107,65	0,038 ± 0,001
Filc lniano-jutowy_3 warstwy	104,02	0,039 ± 0,001
Filc lniano-konopny 2_1 warstwa	99,49	0,036 ± 0,001
Filc lniano-konopny 2_2 warstwy	103,44	0,036 ± 0,001
Filc lniano-konopny 2_3 warstwy	115,82	0,040 ± 0,001
Wełna lniana (docisk)	78,85	0,031 ± 0,001
Wełna lniana (bez docisku)	14,06	0,043 ± 0,001
Wełna konopna (docisk)	53,71	0,033 ± 0,001
Wełna konopna (bez docisku)	13,85	0,048 ± 0,001
Wełna lniano-jutowa (docisk)	38,75	0,035 ± 0,001
Wełna lniano-jutowa (bez docisku)	14,40	0,047 ± 0,001

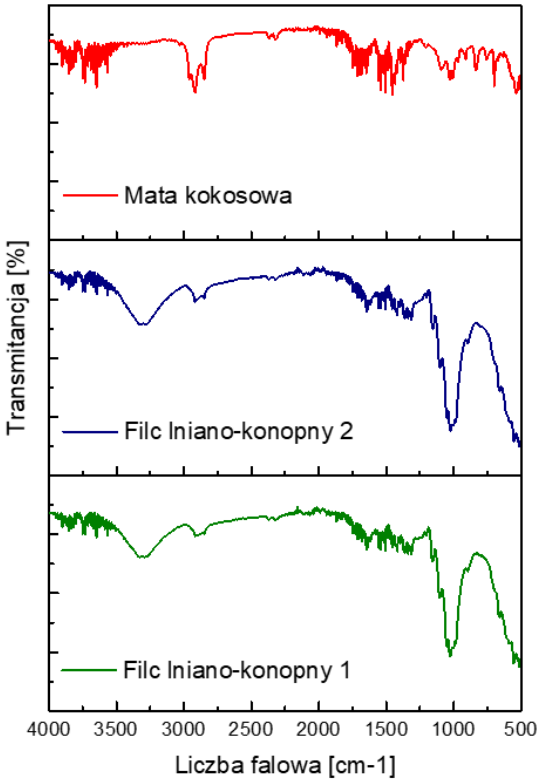
Wyniki z tabeli 13 pokazują wyraźny wpływ formy materiału włóknistego, czyli maty, filcu i wełny, na jego właściwości fizyczne. Znaczenie ma także stopień zagęszczenia, w tym liczba warstw i zastosowany docisk. Parametry te wpływają na gęstość objętościową

oraz współczynnik przewodzenia ciepła. Zależności te są zgodne z opisami literaturowymi. Przewodnictwo cieplne materiałów porowatych zależy od udziału fazy stałej i powietrza. Istotny jest także stopień uporządkowania struktury [68,169,170]. Maty kokosowe mają najwyższą gęstość objętościową spośród analizowanych materiałów i wynosi ona około 122-127 kg/m³. Wynika to z dużej średnicy włókien oraz wysokiej zawartości ligniny. Wraz ze wzrostem liczby warstw obserwuje się niewielki wzrost współczynnika przewodzenia ciepła z 0,038 do 0,041 W/(m·K). Wzrost liczby warstw powoduje częściowe zagęszczenie struktury materiału i zmniejszenie objętości powietrza zamkniętego między włóknami, które w największym stopniu odpowiada za izolacyjność cieplną. Podobne wartości λ dla mat kokosowych są podawane w literaturze. Są one uznawane za typowe dla sztywnych materiałów włóknistych o wysokim stopniu lignifikacji [171,174]. Filce jutowe, lniane, konopne i hybrydowe wykazują korzystniejszy kompromis między gęstością a izolacyjnością cieplną. Dla większości z nich współczynnik λ mieści się w zakresie 0,033-0,039 W/(m·K). Gęstość tych materiałów wynosi od około 80 do 123 kg/m³. Wraz ze wzrostem liczby warstw przewodnictwo cieplne nieznacznie rośnie, co potwierdzają dane z literatury. Gdy filc jest bardziej zagęszczony, zawiera mniej powietrza odpowiedzialnego za izolację, a więcej materiału stałego, który łatwiej przewodzi ciepło [38,169,170]. Najniższe wartości λ uzyskano dla filcu jutowego i lnianego w jednej warstwie. Potwierdza to ich wysoki potencjał jako materiałów termoizolacyjnych. Filce lniano-konopne oraz konopne wykazują nieco wyższe wartości przewodnictwa cieplnego. Przy trzech warstwach współczynnik λ przekracza 0,040 W/(m·K). Zależność tą można wiązać z większą sztywnością włókien konopnych. Ogranicza ona zdolność do tworzenia jednorodnej i drobnoporowatej struktury przy większym zagęszczeniu. Literatura wskazuje, że materiały z większym udziałem włókien konopnych wymagają optymalizacji struktury. Jest to konieczne, aby utrzymać niskie wartości λ przy zachowaniu odpowiedniej stabilności mechanicznej [37,38]. Największe zróżnicowanie parametrów dotyczy wełn włóknistych. Kluczowe znaczenie ma tu stopień docisku materiału. Wełny poddane dociskowi osiągają gęstość w zakresie 39-79 kg/m³. Wykazują też bardzo korzystne wartości współczynnika λ na poziomie 0,031-0,035 W/(m·K). Wełny bez docisku mają bardzo niską gęstość około 14 kg/m³. Jednocześnie ich λ jest wyraźnie wyższe i wynosi 0,043-0,048 W/(m·K). Wynika to z nasilenia konwekcji powietrza w dużych i otwartych porach. Zależność ta jest szeroko opisywana w literaturze. Stanowi ona jedną z głównych przyczyn konieczności kontrolowanego zagęszczania naturalnych materiałów izolacyjnych [68,170,172]. Uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi. Potwierdzają, że najlepsze właściwości termoizolacyjne osiągają materiały o umiarkowanej gęstości

i kontrolowanej porowatości. Dotyczy to zwłaszcza filców jednowarstwowych oraz wełen poddanych dociskowi. Nadmierne zagęszczenie zwiększa udział przewodzenia przez fazę stałą. Zbyt luźna struktura sprzyja konwekcji powietrza. Oba zjawiska prowadzą do pogorszenia właściwości izolacyjnych.

Na podstawie analiz chemicznych, mikro- i makrostrukturalnych oraz badań fizycznych wybrano dwa materiały do dalszych prac nad kompozytami warstwowymi. Są to filc lniano-konopny oraz mata kokosowa. Filc lniano-konopny wybrano ze względu na korzystne połączenie cech strukturalnych i użytkowych. Ma on jednorodną i stabilną strukturę wynikającą z procesu filcowania. Ułatwia to formowanie warstw i zapewnia powtarzalność właściwości. Analiza FT-IR potwierdziła dominujący udział celulozy przy umiarkowanej zawartości ligniny i hemicelulozy. Taki skład może sprzyjać dobrej adhezji do matrycy. Materiał ten ma też niski współczynnik przewodzenia ciepła przy umiarkowanej gęstości. Dzięki temu pełni funkcję efektywnej warstwy izolacyjnej. Połączenie włókien lnianych i konopnych pozwala uzyskać równowagę między elastycznością, wytrzymałością a stabilnością geometryczną. Mata kokosowa została wybrana jako drugi materiał izolacyjny. Cechuje ją wysoka sztywność oraz dobra odporność mechaniczna i biologiczna. Wynika to z dużej zawartości ligniny. Obrazy mikro- i makroskopowe potwierdziły grubą i splątaną strukturę włókien. Sprzyja ona zachowaniu kształtu i nośności warstwy izolacyjnej. Mimo wyższej gęstości mata kokosowa zachowuje akceptowalne właściwości termoizolacyjne. Jej stabilność sprawia, że dobrze nadaje się do warstw narażonych na odkształcenia. Dodatkową zaletą jest trwałość oraz dostępność jako surowca odnawialnego. Filc lniano-konopny wybrano również ze względu na lokalną dostępność surowca. Dla porównania zastosowano matę kokosową jako materiał egzotyczny. Połączenie filcu lniano-konopnego i maty kokosowej pozwala projektować kompozyty łączące dobrą izolacyjność z wysoką sztywnością. Umożliwia to ocenę wpływu różnic w morfologii i składzie chemicznym włókien na właściwości użytkowe. Stwarza też możliwość optymalizacji struktury pod kątem zastosowań budowlanych i izolacyjnych.

Dla wybranych materiałów izolacyjnych wykonano dodatkową analizę FT-IR. Jej celem była dokładniejsza ocena składu chemicznego. Analiza pozwoliła też zidentyfikować grupy funkcyjne istotne przy oddziaływaniu z matrycą kompozytową. Wyniki przedstawiono na rysunku 20. Rysunki te pokazują widma FT-IR filcu lniano-konopnego oraz maty kokosowej.



Rysunek 20. *Widma FT-IR mat i filców.*

Na rysunku 20 przedstawiono widma FT-IR maty kokosowej oraz dwóch filców lniano-konopnych. Wszystkie materiały wykazują szerokie pasmo w zakresie 3600-3000 cm^{-1}, które odpowiada drganiom rozciągającym grup O-H obecnych w celulozie, hemicelulozie i ligninie [40]. Szerokość tego pasma wynika z obecności wiązań wodorowych typowych dla materiałów lignocelulozowych [161]. W rejonie około 2900 cm^{-1} widoczne są pasma drgań C-H charakterystyczne dla łańcuchów polisacharydowych [40]. W zakresie 1735-1720 cm^{-1} obserwuje się pasmo związane z obecnością grup karbonylowych C=O w hemicelulozach oraz estrach ligniny [164]. Sygnał ten jest wyraźniejszy w macie kokosowej niż w filcach lniano-konopnych, co wskazuje na większy udział składników niecelulozowych. W obszarze 1600-1500 cm^{-1} widoczne są pasma przypisywane drganiom szkieletowym pierścieni aromatycznych ligniny [168]. Ich intensywność jest największa dla maty kokosowej, co potwierdza wyższy stopień lignifikacji tego materiału. Filce lniano-konopne wykazują wyraźne pasma w zakresie 1160-1030 cm^{-1}, które odpowiadają drganiom mostków C-O-C oraz wiązań C-O w strukturze celulozy [163]. Intensywność tych pasm wskazuje na dominujący udział celulozy w obu wariantach filcu. W zakresie około 1430 cm^{-1} obserwuje się pasmo związane z uporządkowaną strukturą celulozy [165]. Jego obecność sugeruje istotny udział fazy krystalicznej w strukturze włókien tworzących filc. Pasmo około 898 cm^{-1}, charakterystyczne dla obszarów amorficznych celulozy, jest również widoczne, co potwierdza typową dla włókien

naturalnych budowę półkrystaliczną [166]. Porównanie obu filców wskazuje na zbliżony charakter chemiczny, jednak różnice w intensywności pasm w obszarze 1000-900 cm^{-1} mogą świadczyć o odmiennym stopniu zagęszczenia struktury lub różnicach w obróbce surowca. W obu przypadkach widma mają charakter pośredni między czystą celulozą a materiałem silnie lignifikowanym. Mata kokosowa wykazuje najbardziej złożone widmo spośród analizowanych materiałów. Silniejsze pasma ligninowe oraz wyraźne sygnały karbonylowe wskazują na wysoki udział ligniny i hemicelulozy [40,168]. Taki skład chemiczny może zwiększać sztywność i odporność biologiczną materiału, ale jednocześnie ograniczać reaktywność powierzchniową i adhezję do matrycy kompozytowej [40,167]. Analiza FT-IR pokazuje, że filce lniano-konopne mają bardziej celulozowy charakter, natomiast mata kokosowa zawiera większą ilość ligniny. Różnice te mogą mieć istotny wpływ na właściwości mechaniczne, sorpcyjne i adhezyjne materiałów stosowanych jako warstwy izolacyjne w kompozytach [40,163,167].

8.1.3. Zbrojenie kompozytów warstwowych

W celu zapewnienia stabilności konstrukcyjnej i nośności kompozytów warstwowych zastosowano zbrojenie w postaci prętów kompozytowych. Ich zadaniem jest ograniczenie ryzyka rozwarstwienia oraz zwiększenie odporności na obciążenia mechaniczne i czynniki zewnętrzne. Użyto prętów o średnicy 4 mm i 8 mm wykonanych z włókna szklanego nasyconego żywicą epoksydową (rysunek 21). Elementy te są produkowane przez firmę TROKOTEX. Pręty mają wytrzymałość na rozciąganie około 1250 MPa. Ich moduł sprężystości wynosi około 55 GPa. Parametry te pozwalają skutecznie przenosić naprężenia i zwiększają sztywność układu warstwowego. Materiał zachowuje się liniowo sprężyście w szerokim zakresie obciążeń. Ogranicza to ryzyko trwałych odkształceń. Niski współczynnik rozszerzalności liniowej zmniejsza naprężenia termiczne w zmiennych warunkach temperatury. Pręty mają niski współczynnik przewodzenia ciepła na poziomie około 0,35 W/(m·K). Ogranicza to powstawanie mostków cieplnych w kompozycie. Gęstość wynosząca około 1890 kg/m^3 zapewnia korzystny stosunek wytrzymałości do masy. Zbrojenie kompozytowe jest odporne na korozję. Stanowi to przewagę nad tradycyjną stalą w środowiskach wilgotnych i agresywnych chemicznie. Materiał nie przewodzi prądu elektrycznego. Jest także przepuszczalny dla fal elektromagnetycznych. Pozwala to stosować go w miejscach wrażliwych na zakłócenia elektromagnetyczne. Producent deklaruje trwałość eksploatacyjną na poziomie co najmniej 100 lat. Materiał może być również poddany utylizacji

przy ograniczonym wpływie na środowisko [176]. W połączeniu z warstwami izolacyjnymi z włókien naturalnych pręty te umożliwiają wytworzenie monolitycznych i trwałych kompozytów warstwowych. Tak wytworzone kompozyty spełniają wymagania mechaniczne, termiczne i użytkowe.



Rysunek 21. *Pręty kompozytowe z włókna szklanego przesyconego żywicą epoksydową zastosowane jako zbrojenie w kompozytach warstwowych [176].*

8.1.4. Dobór warunków syntezy

Dobór warunków syntezy kompozytów warstwowych, w tym rodzaju i stężenia aktywatora alkalicznego, ma istotny wpływ na przebieg reakcji oraz właściwości końcowe matrycy. W badaniach zastosowano roztwór wodorotlenku sodu o stężeniu 10 M. Zapewnia on wysokie pH niezbędne do rozpuszczania amorficznych faz krzemowo-glinowych obecnych w popiele lotnym. Umożliwia to rozpoczęcie reakcji polikondensacji. W jej wyniku powstaje stabilna struktura geopolimerowa [1,2]. Z danych literaturowych wynika, że stężenia NaOH w zakresie 8-12 M są uznawane za optymalne przy aktywacji popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego. Zakres ten umożliwia skuteczne uwalnianie jonów krzemianowych i glinianowych. Jednocześnie nie prowadzi do nadmiernej degradacji tworzącej się struktury matrycy [6,18]. Zbyt niskie stężenie aktywatora powoduje niepełną aktywację surowca. Prowadzi to do obniżenia wytrzymałości mechanicznej materiału. Zbyt wysokie stężenie NaOH może zwiększać porowatość. Sprzyja też powstawaniu mikropęknięć. W efekcie pogarsza się trwałość długoterminowa materiału [2,3]. Wybór stężenia 10 M NaOH jest kompromisem między wysoką reaktywnością układu a stabilnością chemiczną i mikrostrukturalną matrycy. Przy tym stężeniu reakcja przebiega intensywnie, ale nie prowadzi do nadmiernych uszkodzeń struktury. Z danych literaturowych wynika, że 10 M pozwala uzyskać korzystny stopień polimeryzacji przy odpowiedniej gęstości sieci geopolimerowej. Przekłada się to na dobre właściwości mechaniczne materiału. Ogranicza też skurcz i poprawia stabilność wymiarową matryc aktywowanych alkalicznie [1,8,18]. Zastosowanie NaOH jako jedynego aktywatora

upraszcza przebieg reakcji. Ułatwia to ocenę wpływu składu surowców i warunków syntezy na właściwości kompozytów warstwowych. Stężenie 10 M dobrano także ze względu na zgodność z materiałami izolacyjnymi i zbrojeniem kompozytowym. Zapewnia ono odpowiednią szybkość reakcji. Nie powoduje przy tym degradacji włókien naturalnych ani elementów wzmacniających. Przyjęte warunki pozwoliły uzyskać jednorodną i dobrze związaną matrycę. Stanowi ona podstawę do dalszej oceny właściwości użytkowych wytworzonych kompozytów warstwowych.

8.1.5. Podsumowanie części I – materiały do produkcji kompozytów warstwowych

Ze względu na założenia projektowe ukierunkowane na ograniczenie wpływu środowiskowego oraz poprawę efektywności energetycznej wykonano analizę porównawczą w aspekcie środowiskowym. W tabeli 14 zestawiono energię wbudowaną (EE) oraz wbudowaną emisję CO_2 (EC) dla wybranych materiałów budowlanych i izolacyjnych. Pozwala to porównać projektowane kompozyty z rozwiązaniami konwencjonalnymi i alternatywnymi. Takie podejście jest powszechnie stosowane w ocenie materiałów dla zrównoważonego budownictwa. Umożliwia ono ilościową ocenę wpływu środowiskowego już na etapie wyboru surowców [75,177]. Dane opracowano na podstawie metodologii analizy cyklu życia (LCA). Jest to uznane narzędzie do oceny wpływu produktów na środowisko w całym okresie ich istnienia. Metoda ta obejmuje wszystkie etapy życia materiału. Uwzględnia pozyskanie i przetwarzanie surowców. Obejmuje także proces wytwarzania, transport i etap użytkowania. Analizuje również recykling lub końcową utylizację [178]. W przypadku materiałów budowlanych analiza ta pozwala określić ilościowo zużycie energii oraz emisję gazów cieplarnianych przypadającą na jednostkę materiału. Dane te mają istotne znaczenie przy projektowaniu budynków o niskim śladzie węglowym [75,179]. Z danych literaturowych wynika, że udział energii wbudowanej w bilansie energetycznym budynku rośnie wraz ze wzrostem jego standardu energetycznego. W budynkach konwencjonalnych największy udział ma energia operacyjna. Energia wbudowana stanowi w nich mniejszą część całkowitego bilansu. W budynkach niskoenergetycznych znaczenie energii wbudowanej wyraźnie rośnie. W budynkach pasywnych energia operacyjna i wbudowana osiągają zbliżony poziom. W obiektach samowystarczalnych lub plusenergetycznych całkowity wpływ energetyczny jest w dużej mierze determinowany przez energię wbudowaną. Może ona nawet przewyższać wartości notowane w budynkach pasywnych [177,180,181]. W tym kontekście dane z tabeli 14 stanowią ważny punkt odniesienia przy ocenie projektowanych kompozytów warstwowych. Pozwalają oszacować ich potencjał w zakresie ograniczenia zużycia energii

oraz emisji CO_2 już na etapie doboru materiałów. Porównanie umożliwia sprawdzenie, czy wykorzystanie surowców odpadowych i włókien naturalnych jest zgodne z kierunkiem rozwoju zrównoważonego budownictwa. Odnosi się także do zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, które są szeroko omawiane w aktualnej literaturze naukowej [179,181].

Tabela 14. *Porównanie energii wbudowanej i wbudowanego CO_2 w wybranych materiałach budowlanych i izolacyjnych [180–184].*

Materiał	**EE[MJ/kg]**	**EC [kgCO_2/kg]**
Popiół lotny	0,10	0,01
Piasek	0,10	0,005
Cement	4,60	0,83
Beton	0,95	0,13
Geopolimer	0,30-0,40	0,05-0,10
Celuloza	0,94-3,30	0,05-0,20
Len (izolacja)	39,50	1,70
Wełna mineralna	16,60	1,20
Wełna skalna	16,80	1,05
Wełna papierowa (wióry drzewne)	20,17	0,60-0,70
Wełna drzewna	10,80	0,20-0,40
Wełna z recyklingu	20,90	0,30-0,60
Wełna (ogółem)	3,00	0,15
Spieniony polistyren	88,60	2,50
Termoformowalny spieniony PS	109,20	3,40
Poliuretan	72,10	3,00
Mata kokosowa	~42	0,20-0,50
Mata lniana	~50	0,40-0,80
Mata konopna	~40	0,30-0,70

Analiza danych z tabeli 14 pokazuje bardzo duże różnice w energii wbudowanej (EE) oraz wbudowanej emisji CO_2 (EC) między poszczególnymi grupami materiałów budowlanych i izolacyjnych. Potwierdza to, że dobór materiałów ma kluczowe znaczenie przy projektowaniu rozwiązań niskoemisyjnych. Zgodnie z analizą literaturową przeprowadzoną przez Cabeza i in. [184], materiały tradycyjne, takie jak cement i beton, mają stosunkowo wysoką emisję CO_2 w przeliczeniu na jednostkę masy. Wynika to z energochłonnej produkcji klinkieru cementowego oraz z emisji procesowych. W tabeli 14 wartości te wynoszą około

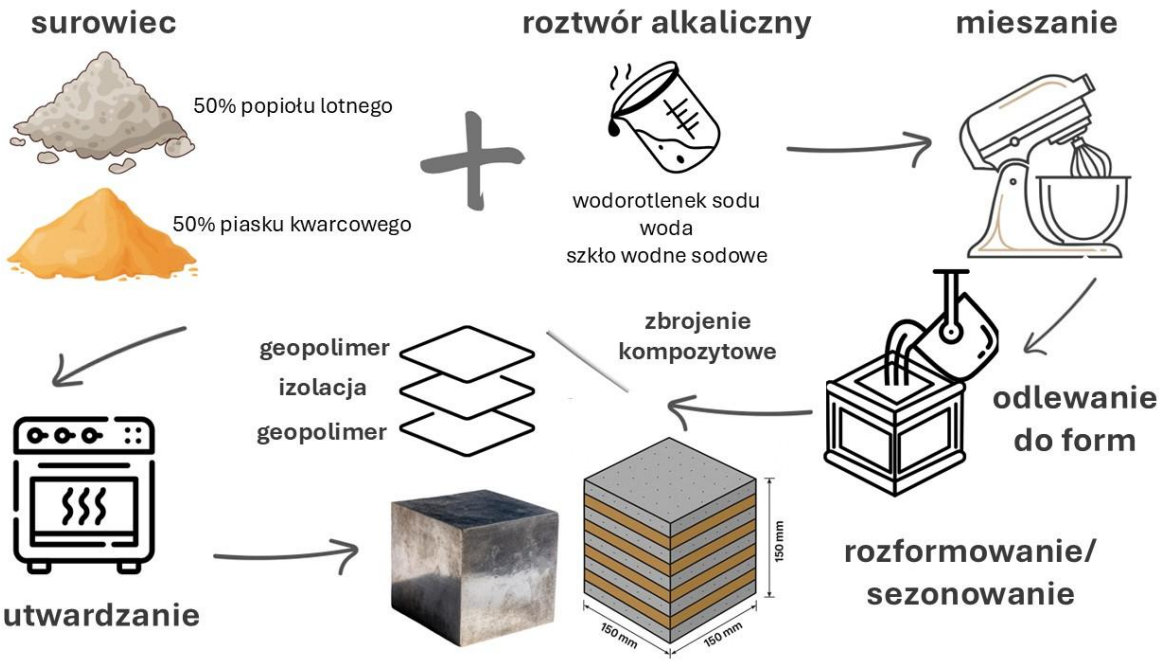
0,83 kg CO_2/kg dla cementu i 0,13 kg CO_2/kg dla betonu. Dane te są zgodne z informacjami raportowanymi w bazach LCA [183,184]. Na tym tle surowce uboczne i odpadowe, takie jak popiół lotny i piasek, mają bardzo niskie wartości energii wbudowanej i emisji CO_2. Energia wbudowana wynosi około 0,1 MJ/kg. Emisja CO_2 mieści się w zakresie 0,005-0,01 kg CO_2/kg. Dane te wskazują na ich korzystny profil środowiskowy. Uzasadniają też ich wykorzystanie jako surowców alternatywnych w nowoczesnych materiałach budowlanych [183,184]. Geopolimery, jako alternatywa dla cementu portlandzkiego, mają niższą energię wbudowaną i mniejszą emisję CO_2. Wynika to z braku procesu klinkieryzacji. W tabeli podano wartości EE na poziomie około 0,30-0,40 MJ/kg. Emisja CO_2 mieści się w zakresie 0,05-0,10 kg CO_2/kg. Zakresy te są zgodne z danymi raportowanymi w przeglądach literaturowych. Potwierdza to potencjał geopolimerów w ograniczaniu śladu węglowego budownictwa [184]. Naturalne materiały izolacyjne, takie jak len, konopie, celuloza i mata kokosowa, mają zróżnicowane wartości energii wbudowanej i emisji CO_2. Jak podają Pedroso i in. [182], wysoka energia wbudowana dla niektórych włókien, na przykład lnu na poziomie około 39,5 MJ/kg, wynika z uprawy, zbioru i przetwarzania surowca. Mimo to emisja CO_2 tych materiałów jest wyraźnie niższa niż w przypadku materiałów polimerowych. W analizach LCA zwraca się także uwagę na możliwość częściowej kompensacji emisji dzięki sekwestracji CO_2 w biomasie podczas wzrostu roślin [182,183]. Materiały izolacyjne pochodzenia mineralnego, takie jak wełna mineralna i wełna skalna, mają umiarkowaną energię wbudowaną na poziomie około 16-17 MJ/kg. Ich emisja CO_2 wynosi około 1,0-1,2 kg CO_2/kg. Wartości EC sytuują je pomiędzy materiałami naturalnymi a tworzywami sztucznymi pod względem wpływu środowiskowego [183,184]. Najwyższe wartości energii wbudowanej i emisji CO_2 dotyczą materiałów polimerowych. Dotyczy to zwłaszcza spienionego polistyrenu (EPS, XPS) oraz poliuretanu. Energia wbudowana w tych materiałach przekracza 70-100 MJ/kg. Emisja CO_2 osiąga poziom 2,5-3,4 kg CO_2/kg. Dane te są zgodne z informacjami podawanymi w bazie ICE oraz w przeglądach literaturowych. Wskazują one na wysoki koszt środowiskowy tradycyjnych izolacji syntetycznych [183,184]. Dane z tabeli 13 wskazują, że kompozyty warstwowe oparte na popiele lotnym, matrycy geopolimerowej oraz naturalnych materiałach izolacyjnych mogą znacząco ograniczać energię wbudowaną i emisję CO_2 w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi. Oznacza to realny potencjał redukcji wpływu środowiskowego już na etapie materiałowym. Wyniki te są zgodne z kierunkiem rozwoju zrównoważonego budownictwa. Potwierdzają też zasadność przyjętej koncepcji materiałowej zgodnie z wynikami analiz LCA.

W tej części rozprawy przeprowadzono kompleksową charakterystykę materiałów przeznaczonych do wytwarzania kompozytów warstwowych. Obejmowała ona surowce mineralne oraz włókna naturalne. Badania rozpoczęto od analizy właściwości strukturalnych surowców mineralnych metodą sorpcji fizycznej i porozymetrii rtęciowej. Pozwoliło to określić powierzchnię właściwą, porowatość i rozkład wielkości porów. Wyniki wykazały wyraźne różnice między popiołem lotnym ze spalania węgla kamiennego a piaskiem kwarcowym. Popiół charakteryzował się wysoką porowatością i rozwiniętą powierzchnią, co wskazuje na jego potencjalną reaktywność w procesie aktywacji alkalicznej. Piasek kwarcowy charakteryzuje się zwartą strukturą i chemiczną obojętnością. Przeprowadzono także analizę składu chemicznego i fazowego surowców mineralnych, co pozwoliło ocenić ich przydatność jako składników matrycy i wypełniaczy (omówiono w części 7 niniejszej rozprawy). Wyniki te umożliwiły świadomy dobór materiałów o uzupełniających się właściwościach. Kolejnym etapem była wielokryterialna ocena dziewięciu rodzajów włókien naturalnych. Obejmowała ona analizę FT-IR, obserwacje mikro- i makrostrukturalne oraz pomiary parametrów fizycznych. Widma FT-IR wykazały zróżnicowanie składu chemicznego włókien. Część z nich miała wysoki udział celulozy, inne zawierały znaczną ilość ligniny. Obserwacje mikroskopowe i makroskopowe pozwoliły ocenić jednorodność i budowę przestrzenną materiałów. Analiza właściwości fizycznych wykazała wyraźny wpływ formy przetworzenia i stopnia zagęszczenia na gęstość oraz przewodnictwo cieplne. Najlepsze właściwości izolacyjne uzyskały filce oraz wełny poddane kontrolowanemu dociskowi. Na podstawie wyników wybrano filc lniano-konopny i matę kokosową jako materiały izolacyjne. Filc wyróżniał się jednorodną strukturą, umiarkowaną gęstością i dobrą izolacyjnością. Mata kokosowa charakteryzuje się większą sztywnością i trwałością. Dodatkowa analiza FT-IR potwierdziła ich odmienny, ale uzupełniający się charakter chemiczny. Przedstawiono także charakterystykę zbrojenia w postaci prętów z włókna szklanego w żywicy epoksydowej, które zapewniają stabilność kompozytów. Omówiono dobór warunków syntezy matrycy geopolimerowej z użyciem roztworu NaOH o stężeniu 10 M. Przyjęto je jako kompromis między reaktywnością a stabilnością struktury. Oceniono również aspekty środowiskowe materiałów na podstawie energii wbudowanej i emisji CO_2. Analiza potwierdziła zasadność wykorzystania surowców odpadowych, matrycy geopolimerowej i włókien naturalnych. Całość wyników stanowi podstawę do dalszych badań nad technologią wytwarzania oraz właściwościami użytkowymi opracowanych kompozytów warstwowych.

8.2.CZĘŚĆ II – WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA KOMPOZYTÓW PROTOTYPOWYCH

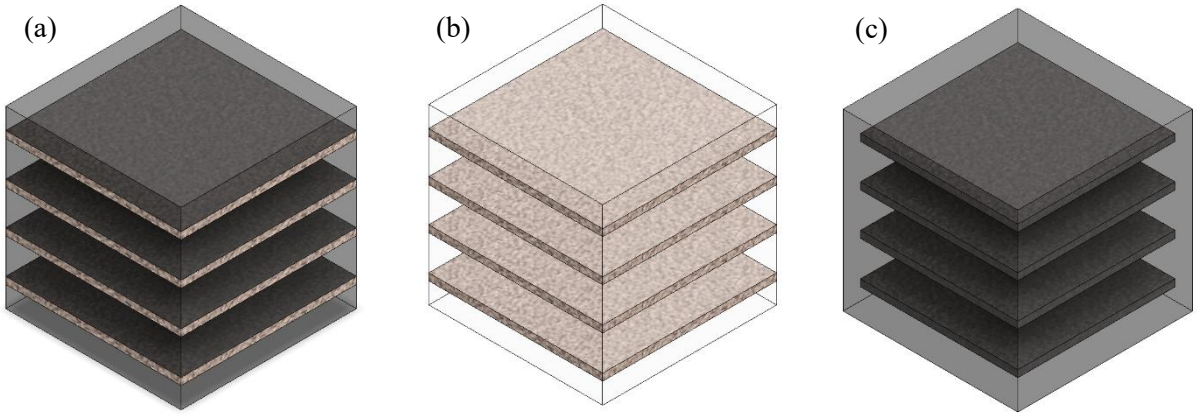
8.2.1. Wytwarzanie kompozytów prototypowych

Do syntezy kompozytów warstwowych użyto popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego oraz piasku kwarcowego jako składników mineralnych matrycy geopolimerowej. Materiały wprowadzano w proporcji wagowej 50/50. Pozwoliło to połączyć reaktywność popiołu ze stabilnością i obojętnością chemiczną piasku. Taki skład ułatwiał kontrolę konsystencji mieszanki. Ograniczał też skurcz i ryzyko pękania podczas wiązania. Aktywację alkaliczną prowadzono z użyciem 10-molowego roztworu wodorotlenku sodu z wodnym krzemianem sodu. Roztwór przygotowano ze szkła wodnego sodowego R-145 o module 2,5 i gęstości około 1,45 g/cm³. Zapewniał on odpowiednie pH do rozpuszczania faz krzemowo-glinowych i rozpoczęcia tworzenia sieci geopolimerowej. Każdy kompozyt zawierał dziewięć prętów z włókna szklanego w żywicy epoksydowej o długości 15 cm i średnicy 4 mm lub 8 mm. Pręty rozmieszczano tak, aby zapewnić stabilność całej próbki. Zastosowanie dwóch średnic pozwoliło ocenić wpływ stopnia zbrojenia na właściwości mechaniczne i izolacyjne. W strukturze umieszczano również cztery warstwy materiału naturalnego pełniącego funkcję materiału izolacyjnego. Próbki wykonywano metodą zalewania przez sekwencyjne układanie warstw w formie. Układ miał charakter przekładkowy. Warstwy rozmieszczano naprzemiennie w sekwencji: matryca geopolimerowa - materiał izolacyjny - matryca geopolimerowa. Zapewniało to dobre zespolenie i ograniczało ryzyko rozwarstwienia. Utwardzanie prowadzono w temperaturze 75°C w suszarce laboratoryjnej SLW 750. Przyspieszało to geopolimeryzację i stabilizację struktury. Wszystkie etapy przygotowania kompozytów przed utwardzeniem wykonywano w warunkach 23°C i wilgotności 40-60%. Wymiary próbek wynosiły 150 × 150 × 150 mm. Po 24 godzinach próbki rozformowywano. Następnie sezonowano je przez 28 dni w celu pełnego rozwinięcia struktury i stabilizacji właściwości. W pierwszym etapie wykonano pięć wariantów. Obejmowały one próbkę referencyjną oraz kompozyty z czterema warstwami maty kokosowej lub filcu lniano-konopnego i zbrojeniem 4 mm lub 8 mm. W kolejnym etapie powtórzono te warianty oraz dodano dwa z ośmioma warstwami izolacji i prętami 4 mm. Wykonano też warianty z maksymalną liczbą warstw. Było to 12 warstw dla filcu lniano-konopnego i 10 warstw dla maty kokosowej z prętami 8 mm. Schemat przygotowania próbek pokazano na rysunku 22.



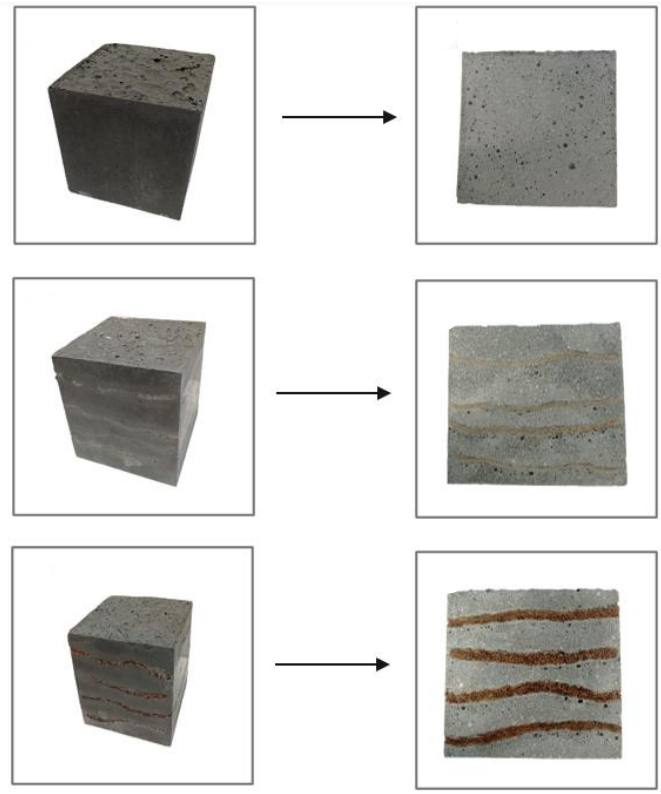
Rysunek 22. *Graficzne ujęcie procedury przygotowania kompozytów w warunkach laboratoryjnych.*

Na rysunku 23 pokazano schemat budowy kompozytu warstwowego w formie struktury przekładkowej. Rysunek przedstawia kolejno: a) cały element kompozytowy, b) warstwę izolacyjną z materiałów naturalnych oraz c) warstwę geopolimerową, która pełni funkcję matrycy wiążącej i nośnej. Taki układ odzwierciedla przyjętą koncepcję konstrukcji. Warstwy izolacyjne odpowiadają za właściwości termoizolacyjne. Warstwy geopolimerowe zapewniają sztywność, ciągłość struktury i przenoszenie obciążeń. Naprzemienne ułożenie obu typów warstw sprzyja równomiernemu rozkładowi naprężeń w całej objętości materiału. Taki układ ogranicza powstawanie lokalnych koncentracji naprężeń i zmniejsza ryzyko rozwarstwienia. Schemat na rysunku 23 uzupełnia opis technologii wytwarzania kompozytu. Pokazuje sposób formowania struktury przekładkowej oraz relacje między poszczególnymi warstwami materiału.



Rysunek 23. *Układ warstw w materiale kompozytowym: a) kompozyt, b) warstwa izolacyjna, c) warstwa geopolimerowa.*

Na rysunku 24 pokazano prototypowe kompozyty wykonane w trakcie badań. Po lewej stronie widoczny jest ogólny widok gotowych elementów. Po prawej stronie przedstawiono przekrój poprzeczny kompozytów warstwowych. Widok ogólny pozwala ocenić kształt próbek, jakość powierzchni i powtarzalność procesu wytwarzania. Potwierdza on zachowanie założonych wymiarów oraz brak widocznych pęknięć i deformacji krawędzi. Przekrój poprzeczny umożliwia ocenę budowy wewnętrznej materiału. Widać w nim naprzemienny układ warstw geopolimerowych i izolacyjnych. Można też ocenić ich ciągłość oraz stopień połączenia między warstwami. Obraz przekroju potwierdza uzyskanie struktury przekładkowej z wyraźnie zaznaczonymi granicami warstw. Nie obserwuje się oznak rozwarstwienia. Wynik ten wskazuje na skuteczność zastosowanej technologii formowania i właściwy dobór warunków syntezy.



Rysunek 24. *Prototypowe materiały kompozytowe - widok ogólny (po lewej) i przekrój poprzeczny (po prawej).*

8.2.2. Charakterystyka parametrów fizycznych kompozytów prototypowych

W tabeli 15 zestawiono parametry fizyczne kompozytów prototypowych. Dane te pozwalają ocenić wpływ rodzaju materiału izolacyjnego, liczby warstw oraz zastosowanego zbrojenia na właściwości materiału. Tabela obejmuje podstawowe cechy fizyczne, w tym gęstość objętościową. Parametr ten stanowi podstawę do dalszej analizy właściwości mechanicznych i termoizolacyjnych. Zestawienie umożliwia porównanie poszczególnych

wariantów kompozytów. Pozwala także ocenić skuteczność przyjętych rozwiązań materiałowych i technologicznych.

Tabela 15. *Parametry fizyczne kompozytów prototypowych.*

Materiał	**Średnia gęstość [kg/m^3]**
referencyjna	1777,33
4 filce lniano-konopne (pręty 4 mm)	1694,51
4 maty kokosowe (pręty 4 mm)	1448,23
4 filce lniano-konopne (pręty 8 mm)	1546,14
4 maty kokosowe (pręty 8 mm)	1382,71

Wartości średniej gęstości podane w tabeli 15 pokazują, że rodzaj materiału izolacyjnego i średnica prętów zbrojeniowych wyraźnie wpływają na masę objętościową kompozytów. Próbka referencyjna bez warstw izolacyjnych ma najwyższą gęstość, która wynosi 1777,33 kg/m³. Wynika to z jednorodnej i zwartej struktury matrycy geopolimerowej, w której nie ma materiałów porowatych. Otrzymana wartość mieści się w typowym zakresie dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych i drobnych kruszyw. W literaturze dla takich materiałów podaje się gęstości w przedziale 1700-2000 kg/m³ [4,113]. Zastosowanie czterech warstw filcu lniano-konopnego obniża gęstość kompozytu do 1694.51 kg/m³ przy zbrojeniu o średnicy 4 mm oraz do 1546,14 kg/m³ przy prętach o średnicy 8 mm. Spadek gęstości wynika z częściowego zastąpienia matrycy geopolimerowej materiałem włóknistym o znacznie mniejszej gęstości. W strukturze przekładkowej rośnie też udział porów powietrznych. Podobną zależność opisano w pracach dotyczących kompozytów mineralnych z dodatkiem naturalnych włókien roślinnych. W badaniach tych również obserwowano spadek gęstości przy zachowaniu ciągłości i spójności struktury materiału [39,185]. Jeszcze większy spadek gęstości odnotowano w kompozytach z czterema warstwami maty kokosowej. Wartości wynoszą 1448,23 kg/m³ dla prętów o średnicy 4 mm oraz 1382,71 kg/m³ dla prętów o średnicy 8 mm. Mata kokosowa ma grubsze włókna i bardziej otwartą, nieregularną strukturę. Do kompozytu wprowadza więc więcej powietrza niż filc lniano-konopny. Skutkiem jest wyraźne zmniejszenie masy objętościowej. Podobne wyniki opisano w literaturze dla kompozytów cementowych i geopolimerowych z dodatkiem włókien kokosowych. W pracach tych wskazuje się zarówno na spadek gęstości, jak i na poprawę właściwości izolacyjnych [186,187]. Zastosowanie prętów o średnicy 8 mm we wszystkich wariantach powoduje większe obniżenie gęstości niż w układach z prętami 4 mm. Wynika to z mniejszego udziału objętościowego matrycy geopolimerowej w przekroju próbki. Taki układ sprzyja też

lepszemu rozmieszczeniu warstw izolacyjnych w strukturze przekładkowej. Podobne zależności opisano w pracach dotyczących lekkich kompozytów warstwowych. Wskazuje się tam, że odpowiednia konfiguracja zbrojenia pozwala zmniejszyć masę elementów bez wyraźnej utraty sztywności i wytrzymałości [188]. Otrzymane wyniki pokazują, że zastosowanie naturalnych materiałów izolacyjnych, zwłaszcza maty kokosowej, pozwala wyraźnie obniżyć gęstość kompozytów w porównaniu z próbką referencyjną. Jednocześnie uzyskane wartości mieszczą się w zakresie typowym dla lekkich kompozytów mineralno-włóknistych. Wyniki te są zgodne z danymi podawanymi w literaturze. Potwierdzają też, że przyjęta koncepcja materiałowa jest uzasadniona przy projektowaniu elementów budowlanych o mniejszej masie i lepszych właściwościach termoizolacyjnych.

W tabeli 16 zestawiono parametry termoizolacyjne kompozytów prototypowych w różnych temperaturach. Dane te pozwalają ocenić efektywność cieplną wytworzonych materiałów warstwowych. W tabeli podano wartości opisujące przewodzenie ciepła w funkcji temperatury. Umożliwia to analizę, czy właściwości termoizolacyjne pozostają stabilne w warunkach zbliżonych do rzeczywistej eksploatacji. Analiza w szerokim zakresie temperatur pozwala ocenić przydatność kompozytów do zastosowań budowlanych. Ma to znaczenie w warunkach zmiennych obciążeń klimatycznych. Zestawienie ułatwia też wskazanie rozwiązań, które zapewniają najbardziej stabilne i korzystne właściwości izolacyjne.

Tabela 16. *Parametry termoizolacyjne kompozytów prototypowych w różnych warunkach temperaturowych.*

Materiał	**λ w 0-20°C [W/(m·K)]**	**λ w 20-40°C [W/(m·K)]**	**λ w 30-50°C [W/(m·K)]**
referencyjna	1,365 ± 0,001	1,364 ± 0,001	1,388 ± 0,001
4 filce lniano-konopne (pręty 4 mm)	1,142 ± 0,001	1,161 ± 0,001	1,177 ± 0,001
4 maty kokosowe (pręty 4 mm)	0,878 ± 0,001	0,887 ± 0,001	0,899 ± 0,001
4 filce lniano-konopne (pręty 8 mm)	0,867 ± 0,001	0,883 ± 0,001	0,901 ± 0,001
4 maty kokosowe (pręty 8 mm)	0,805 ± 0,001	0,818 ± 0,001	0,824 ± 0,001

Wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ podane w tabeli 16 pokazują, że rodzaj materiału izolacyjnego, konfiguracja zbrojenia i temperatura wyraźnie wpływają na właściwości termoizolacyjne kompozytów. Próbka referencyjna bez warstw izolacyjnych ma najwyższe wartości λ. W całym badanym zakresie temperatur mieszczą się one w przedziale 1,36-1,39 W/(m·K). Wartości te są charakterystyczne dla materiałów geopolimerowych

o zwartej strukturze oraz dla drobnoziarnistych materiałów mineralnych. Dane te są zgodne z literaturą, w której dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych i drobnych kruszyw podaje się zakres 1,2-1,8 W/(m·K) [4,113]. Zastosowanie czterech warstw filcu lniano-konopnego obniża współczynnik λ do poziomu 1,14-1,18 W/(m·K) przy zbrojeniu o średnicy 4 mm oraz do 0,87-0,90 W/(m·K) przy prętach o średnicy 8 mm. Poprawa właściwości cieplnych wynika z obecności warstw włóknistych o dużej porowatości. W strukturze kompozytu rośnie też udział powietrza, które ogranicza przepływ ciepła. W literaturze dotyczącej naturalnych materiałów izolacyjnych wskazuje się, że włókna lniane i konopne dzięki budowie kapilarnej i niskiej gęstości skutecznie zmniejszają przewodzenie ciepła w kompozytach mineralnych [172,189]. Najlepsze właściwości termoizolacyjne uzyskano w kompozytach z czterema warstwami maty kokosowej. Współczynnik λ mieści się tu w zakresie 0,80-0,90 W/(m·K). Najniższe wartości, na poziomie 0,81-0,82 W/(m·K), odnotowano w wariancie z prętami o średnicy 8 mm. Tak duże obniżenie przewodzenia ciepła wynika z budowy maty kokosowej. Materiał ten ma grube włókna, wysoką porowatość i nieregularną strukturę, która sprzyja zatrzymywaniu powietrza. Podobne wyniki opisano w badaniach kompozytów z dodatkiem włókien kokosowych. W pracach tych wykazano wyraźne zmniejszenie przewodnictwa cieplnego w porównaniu z materiałami o zwartej strukturze mineralnej [186,187]. Analiza wpływu temperatury pokazuje, że we wszystkich wariantach współczynnik λ nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Jest to zależność typowa dla materiałów budowlanych. Wynika ze zwiększenia intensywności transportu ciepła w fazie stałej i gazowej. Zmiany te są jednak umiarkowane. Oznacza to, że właściwości termoizolacyjne kompozytów pozostają stabilne w badanym zakresie temperatur. W literaturze dotyczącej naturalnych materiałów izolacyjnych podkreśla się, że struktury włókniste zachowują względnie stałe parametry cieplne w typowych warunkach użytkowania [190]. Zastosowanie prętów o średnicy 8 mm we wszystkich wariantach powoduje większe obniżenie współczynnika λ w porównaniu z układami z prętami 4 mm. Wynika to ze zmniejszenia udziału ciągłej fazy geopolimerowej, która ma wyższą przewodność cieplną. Warstwy izolacyjne przerywają też ciągłe ścieżki przewodzenia ciepła w materiale. Podobne zależności opisano w literaturze dotyczącej kompozytów warstwowych i konstrukcji typu sandwich. Wskazuje się tam, że odpowiednia konfiguracja warstw izolacyjnych i zbrojenia poprawia efektywność termoizolacyjną całego układu [188]. Wyniki pokazują, że zastosowanie naturalnych materiałów izolacyjnych, zwłaszcza maty kokosowej, w połączeniu z odpowiednio dobranym zbrojeniem pozwala wyraźnie obniżyć współczynnik przewodzenia ciepła w porównaniu z próbką referencyjną. Osiągnięte wartości λ sytuują te kompozyty między typowymi

materiałami konstrukcyjnymi a lekkimi materiałami izolacyjnymi. Wskazuje to na ich przydatność w budownictwie jako elementów, które jednocześnie przenoszą obciążenia i ograniczają straty ciepła.

W tabeli 17 przedstawiono system oznaczeń kompozytów prototypowych wraz z ich składem materiałowym. Skrócone symbole pozwalają szybko rozpoznać poszczególne warianty. Oznaczenia uwzględniają rodzaj materiału izolacyjnego, liczbę warstw oraz średnicę zbrojenia kompozytowego. Przyjęty sposób nazewnictwa odnosi się bezpośrednio do najważniejszych cech konstrukcyjnych próbek. Ułatwia to analizę wyników i ich jednoznaczne powiązanie z konkretną konfiguracją materiałową w dalszej części pracy.

Tabela 17. *System oznaczeń opracowanych kompozytów prototypowych.*

Oznaczenie próbki	**Kompozycja materiałowa kompozytu prototypowego**
RKP	referencyjny kompozyt prototypowy
4L-K_Z4	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
4K_Z4	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
4L-K_Z8	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
4K_Z8	kompozyt zawierający 4 warstwy izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
8L-K_Z4	kompozyt zawierający 8 warstw izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
8K_Z4	kompozyt zawierający 8 warstw izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 4 mm
10K_Z8	kompozyt zawierający 10 warstw izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 8 mm
12L-K_Z8	kompozyt zawierający 12 warstw izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 8 mm

W tabeli 18 zestawiono wybrane parametry fizyczne prototypowych kompozytów warstwowych. Dane te pozwalają ocenić wpływ rodzaju materiału izolacyjnego, liczby warstw oraz konfiguracji zbrojenia na właściwości gotowych elementów. W tabeli podano podstawowe

cechy opisujące strukturę materiału, w tym gęstość objętościową. Parametr ten stanowi wartość odniesienia do dalszej analizy właściwości mechanicznych, termoizolacyjnych i użytkowych.

Tabela 18. *Charakterystyka wybranych parametrów fizycznych prototypowych kompozytów.*

ID	3 pomiary [kg/m^3]	Średnia gęstość [kg/m^3]	Odchylenie stand. [kg/m^3]	Spadek gęstości [%]
RKP	1710,09; 1733,00; 1706,09	1716,39	14,52	-
4L-K_Z4	1641,09; 1637,86; 1654,82	1644,59	9,01	↓4
4K_Z4	1448,23; 1406,61; 1381,50	1412,11	33,70	↓18
4L-K_Z8	1550,30; 1524,21; 1523,58	1532,70	15,25	↓11
4K_Z8	1393,32; 1396,73; 1402,53	1397,53	4,66	↓19
8L-K_Z4	1413,16; 1316,76; 1319,69	1349,87	54,83	↓21
8K_Z4	1163,89; 1070,37; 1111,89	1115,38	46,86	↓35
10K_Z8	1074,78; 943,66; 1034,59	1017,68	67,18	↓41
12L-K_Z8	982,70; 980,41; 1066,81	1009,97	49,24	↓41

Wartości gęstości objętościowej podane w tabeli 18 pokazują, że rodzaj materiału izolacyjnego, liczba warstw izolacyjnych i konfiguracja zbrojenia wyraźnie wpływają na właściwości fizyczne kompozytów. Kompozyt referencyjny (RKP) bez warstw izolacyjnych ma najwyższą średnią gęstość, która wynosi 1716,39 kg/m³. Odpowiada to wartościom typowym dla zwartych geopolimerów na bazie popiołów lotnych i drobnych kruszyw. Wynik ten mieści się w zakresie 1700-2000 kg/m³ podawanym w literaturze dla geopolimerów konstrukcyjnych [4,113]. Zastosowanie czterech warstw filcu lniano-konopnego obniża gęstość do 1644,59 kg/m³ w wariancie 4L-K_Z4 oraz do 1532,70 kg/m³ w wariancie 4L-K_Z8. Oznacza to spadek odpowiednio o 4% i 11% w stosunku do próbki referencyjnej. Spadek wynika z częściowego zastąpienia matrycy geopolimerowej lżejszym materiałem włóknistym. W strukturze pojawia się też dodatkowa porowatość. Podobne zmniejszenie gęstości opisano w badaniach kompozytów mineralnych z dodatkiem włókien lnianych i konopnych. W pracach tych naturalne filce pełniły rolę lekkiego materiału izolacyjnego [172,185]. Znacznie większy spadek gęstości odnotowano w kompozytach z matą kokosową. Wariant 4K_Z4 ma średnią gęstość 1412,11 kg/m³, a wariant 4K_Z8 1397,53 kg/m³. Oznacza to redukcję o około 18-19% w porównaniu z kompozytem referencyjnym. Przy zbliżonej gęstości objętościowej obu materiałów wynoszącej około 120 kg/m³ całkowita porowatość obu materiałów jest porównywalna, jednak mata kokosowa może charakteryzować się większym udziałem makroporów wynikających z większej średnicy i sztywności włókien. W literaturze dotyczącej

kompozytów cementowych i geopolimerowych z dodatkiem włókien kokosowych potwierdza się ich skuteczność w obniżaniu gęstości przy zachowaniu spójności materiału [186,187]. Zwiększanie liczby warstw izolacyjnych powoduje dalszy spadek gęstości kompozytów. Wariant 8L-K_Z4 osiąga średnią gęstość 1349,87 kg/m³, co oznacza spadek o 21%. Wariant 8K_Z4 ma gęstość 1115,38 kg/m³, czyli o 35% mniejszą niż próbka referencyjna. Najniższe wartości uzyskano przy maksymalnej liczbie warstw izolacyjnych. Dla 10K_Z8 średnia gęstość wynosi 1017,68 kg/m³, a dla 12L-K_Z8 1009,97 kg/m³. Oznacza to redukcję o około 41% w stosunku do kompozytu referencyjnego. Tak niska gęstość pozwala zaliczyć te materiały do lekkich kompozytów mineralno-włóknistych. Pod względem masy objętościowej są one zbliżone do lekkich betonów izolacyjnych i paneli warstwowych typu sandwich [67,188]. Analiza odchylenia standardowego wskazuje na dobrą powtarzalność wyników w większości wariantów. Większy rozrzut wartości pojawia się w kompozytach z największym udziałem warstw izolacyjnych. Jest to typowe dla materiałów o wysokiej porowatości i bardziej niejednorodnej strukturze. Podobne obserwacje opisano w literaturze dotyczącej kompozytów z dodatkiem naturalnych włókien [185,187]. Wyniki potwierdzają, że zastosowanie naturalnych materiałów izolacyjnych oraz zwiększenie liczby warstw izolacyjnych wyraźnie obniża gęstość objętościową kompozytów. Największą skuteczność wykazała mata kokosowa. Pozwala ona uzyskać materiały o gęstości zbliżonej do lekkich materiałów izolacyjno-konstrukcyjnych. Otrzymane rezultaty są zgodne z danymi podawanymi w literaturze. Potwierdzają też zasadność przyjętej koncepcji projektowej przy opracowywaniu lekkich i ekologicznych kompozytów warstwowych do zastosowań budowlanych.

W tabeli 19 zestawiono wybrane parametry termoizolacyjne prototypowych kompozytów warstwowych. Dane te odnoszą się do właściwości cieplnych istotnych przy ocenie efektywności izolacyjnej materiału. Zestawienie pozwala porównać wpływ rodzaju materiału izolacyjnego, liczby warstw oraz konfiguracji zbrojenia na ograniczenie przepływu ciepła. Parametry z tabeli 19 uzupełniają wcześniejszą analizę właściwości fizycznych. Umożliwiają też ocenę zachowania cieplnego kompozytów w warunkach zbliżonych do rzeczywistego użytkowania.

Tabela 19. *Charakterystyka wybranych parametrów termoizolacyjnych prototypowych kompozytów.*

ID	3 pomiary [W/(m·K)]	Średnia λ w 0-20°C [W/(m·K)]	Odchylenie stand. [W/(m·K)]	Spadek λ [%]
RKP	1,248; 1,041; 1,085	1,125	0,109	-
4L-K_Z4	1,107; 1,172; 1,084	1,121	0,046	↓0,3
4K_Z4	0,995; 0,790; 0,827	0,871	0,109	↓23
4L-K_Z8	0,909; 0,997; 1,140	1,015	0,117	↓10
4K_Z8	0,987; 1,010; 0,958	0,985	0,026	↓12
8L-K_Z4	1,024; 0,808; 0,911	0,914	0,108	↓19
8K_Z4	0,732; 0,501; 0,712	0,648	0,128	↓42
10K_Z8	0,484; 0,326; 0,391	0,400	0,079	↓64
12L-K_Z8	0,417; 0,449; 0,574	0,480	0,083	↓57

Średnie wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ w zakresie 0-20°C, przedstawione w tabeli 19, pokazują wyraźny wpływ budowy warstwowej, rodzaju materiału izolacyjnego i liczby warstw izolacyjnych na właściwości cieplne kompozytów. Kompozyt referencyjny (RKP) bez warstw izolacyjnych ma najwyższą średnią wartość λ, która wynosi 1,125 W/(m·K). Wynik ten jest typowy dla zwartych materiałów geopolimerowych oraz drobnoziarnistych kompozytów mineralnych. W literaturze dla takich materiałów podaje się zakres 1,0-1,6 W/(m·K) [4,113]. Zastosowanie czterech warstw filcu lniano-konopnego przy zbrojeniu o średnicy 4 mm (4L-K_Z4) nie zmienia wyraźnie wartości λ w porównaniu z próbką referencyjną. Spadek wynosi jedynie około 0,3%. Oznacza to, że przy małej liczbie warstw izolacyjnych i dużym udziale fazy geopolimerowej efekt izolacyjny jest niewielki. Podobne wnioski przedstawiono w literaturze. Wskazuje się tam, że włókniste materiały izolacyjne działają skuteczniej dopiero przy większej grubości materiału izolacyjnego lub większej liczbie warstw [172,189]. Znacznie większy spadek współczynnika λ odnotowano w kompozycie z czterema warstwami maty kokosowej (4K_Z4). Średnia wartość λ wynosi tu 0,871 W/(m·K), co oznacza redukcję o 23% w porównaniu z próbką referencyjną. Mata kokosowa ma bardziej porowatą strukturę i grubsze włókna niż filc lniano-konopny. Dzięki temu skuteczniej ogranicza transport ciepła przy tej samej liczbie warstw. Podobne właściwości termoizolacyjne włókien kokosowych opisano w literaturze dotyczącej lekkich kompozytów cementowych i geopolimerowych [186,187]. Zastosowanie prętów o większej średnicy w wariantach Z8 poprawia właściwości termoizolacyjne. Wariant 4L-K_Z8 wykazuje spadek λ o 10%, a 4K_Z8 o 12%. Wynika to ze zmniejszenia udziału ciągłej fazy

geopolimerowej w przekroju materiału. Ograniczone zostają też ciągłe ścieżki przewodzenia ciepła. Podobne zależności opisano w literaturze dotyczącej kompozytów warstwowych i konstrukcji typu sandwich [188]. Wyraźną poprawę właściwości termoizolacyjnych widać po zwiększeniu liczby warstw do ośmiu i więcej. Wariant 8L-K_Z4 wykazuje spadek λ o 19%, a 8K_Z4 o 42%. Szczególnie dobre wyniki uzyskano w kompozytach z matą kokosową. Najniższe wartości odnotowano w wariantach 10K_Z8 oraz 12L-K_Z8. Średnia λ wynosi tam odpowiednio 0,400 W/(m·K), co oznacza spadek o 64%, oraz 0,480 W/(m·K), czyli spadek o 57%. Takie wartości są zbliżone do poziomów typowych dla lekkich materiałów izolacyjno konstrukcyjnych i paneli warstwowych stosowanych w budownictwie energooszczędnym [172,184]. Analiza odchyleń standardowych wskazuje na dobrą powtarzalność wyników. Większy rozrzut pojawia się w wariantach z bardzo dużym udziałem warstw izolacyjnych. Jest to typowe dla materiałów o wysokiej porowatości i bardziej niejednorodnej strukturze. Podobne obserwacje opisano w literaturze dotyczącej naturalnych materiałów włóknistych [187,189]. Wyniki z tabeli 18 pokazują, że zwiększenie liczby warstw izolacyjnych oraz zastosowanie maty kokosowej jako materiału izolacyjnego wyraźnie poprawia właściwości termoizolacyjne kompozytów. Otrzymane wartości współczynnika λ potwierdzają, że właściwości cieplne można kształtować w szerokim zakresie. Materiał może osiągać parametry typowe dla elementów konstrukcyjnych lub zbliżone do lekkich materiałów izolacyjnych. Wskazuje to na duży potencjał zastosowania tych kompozytów w budownictwie.

8.2.3. Charakterystyka właściwości mechanicznych kompozytów prototypowych

W tabeli 20 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie prototypowych kompozytów warstwowych. W próbkach zastosowano kompozytowy pręt zbrojeniowy prowadzony wzdłuż centralnej osi. Zestawienie obejmuje parametry mechaniczne uzyskane w próbie zginania. Pozwala ono ocenić wpływ rodzaju materiału izolacyjnego, liczby warstw oraz średnicy zbrojenia na nośność i sposób pracy materiału pod obciążeniem. Wyniki umożliwiają porównanie prototypów z klasycznymi materiałami mineralnymi. Pozwalają też ocenić, jak redukcja masy i poprawa izolacyjności cieplnej wpływają na zachowanie wymaganej wytrzymałości mechanicznej.

Tabela 20. *Wytrzymałość na zginanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci pręta przebiegającego przez środek próbki.*

zbrojenie jednym prętem wzdłuż próbki			
ID	**R_f [MPa]**	**Średnia R_f [MPa]**	**Zdjęcie**
RKP	7,686; 11,015; 8,861	9,187	
4L-K_Z4	6,152; 6,761; 6,893	6,602	
4K_Z4	5,565; 6,022; 6,749	6,112	
4L-K_Z8	5,421; 7,442; 8,698	7,187	
4K_Z8	7,458; 6,723; 6,152	6,778	
8L-K_Z4	3,905; 3,802; 4,807	4,171	
8K_Z4	2,627; 2,401; 3,326	2,785	
10K_Z8	4,569; 4,047; 5,402	4,673	
12L-K_Z8	4,032; 4,129; 4,374	4,178	

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie pokazują, że budowa warstwowa, rodzaj materiału izolacyjnego oraz średnica pręta mają wyraźny wpływ na zachowanie kompozytów pod obciążeniem. W próbkach zastosowano pojedynczy pręt kompozytowy prowadzony wzdłuż osi elementu. Kompozyt referencyjny (RKP) bez warstw izolacyjnych osiągnął najwyższą średnią wytrzymałość na zginanie równą 9,19 MPa. Wartość ta jest typowa dla zwartych geopolimerów na bazie popiołów lotnych i drobnych kruszyw badanych w podobnych warunkach [4,113]. Zastosowanie czterech warstw izolacyjnych obniża wytrzymałość na zginanie. Wynika to z przerwania ciągłości fazy geopolimerowej oraz zwiększenia udziału

warstwy miękkiej i porowatej. Wariant 4L-K_Z4 osiąga średnio 6,60 MPa, a 4K_Z4 6,11 MPa. Oznacza to spadek o około 28-33% w porównaniu z próbką referencyjną. Takie obniżenie nośności jest zgodne z danymi literaturowymi dla kompozytów mineralnych z izolacjami włóknistymi. W materiałach tych warstwa izolacyjna pełni głównie funkcję separującą, a nie nośną [172,185]. Zastosowanie prętów o większej średnicy w wariantach Z8 częściowo ogranicza spadek wytrzymałości. Wariant 4L-K_Z8 osiąga średnio 7,19 MPa, a 4K_Z8 6,78 MPa. Oznacza to, że większy przekrój pręta poprawia zdolność elementu do przenoszenia momentów zginających. Jest to zgodne z klasyczną teorią zginania elementów zbrojonych. Podobne zależności opisano w badaniach geopolimerów wzmacnianych prętami kompozytowymi GFRP, gdzie zwiększenie średnicy zbrojenia prowadzi do wzrostu nośności [35,191]. Zwiększenie liczby warstw izolacyjnych do ośmiu powoduje wyraźny spadek wytrzymałości na zginanie. Wariant 8L-K_Z4 osiąga średnio 4,17 MPa, a 8K_Z4 2,79 MPa. Przy tak dużym udziale warstwy izolacyjnej pojedynczy pręt zbrojeniowy nie jest w stanie skutecznie przejmować naprężeń zginających. Podobną zależność opisano w badaniach paneli warstwowych typu sandwich. Wskazuje się tam, że zbyt miękki lub zbyt gruby materiał izolacyjny prowadzi do lokalnych odkształceń i spadku sztywności całego elementu [188]. Warianty z maksymalną liczbą warstw izolacyjnych, 10K_Z8 oraz 12L-K_Z8, osiągają średnią wytrzymałość na zginanie odpowiednio 4,67 MPa i 4,18 MPa. Mimo dużego udziału warstwy izolacyjnej zastosowanie pręta o większej średnicy pozwala utrzymać nośność na stabilnym poziomie. Otrzymane wartości są porównywalne z lekkimi betonami izolacyjno-konstrukcyjnymi oraz kompozytami mineralno-włóknistymi opisywanymi w literaturze [67,185]. Analiza wyników pokazuje, że pojedynczy pręt zbrojeniowy prowadzony w osi próbki stabilizuje strukturę kompozytów warstwowych. Jego skuteczność maleje jednak wraz ze wzrostem liczby warstw izolacyjnych. Najlepszy kompromis między wytrzymałością, redukcją masy i poprawą izolacyjności cieplnej uzyskano w kompozytach z czterema warstwami izolacji oraz prętem o większej średnicy. Wyniki te potwierdzają zasadność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych przy projektowaniu lekkich kompozytów warstwowych do zastosowań budowlanych.

W tabeli 21 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie kompozytów warstwowych ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów kompozytowych. Pręty rozmieszczono równomiernie na długości próbki. Dane z tabeli 21 pozwalają porównać skuteczność takiego rozproszonego zbrojenia z wariantem, w którym zastosowano jeden pręt prowadzony przez środek próbki.

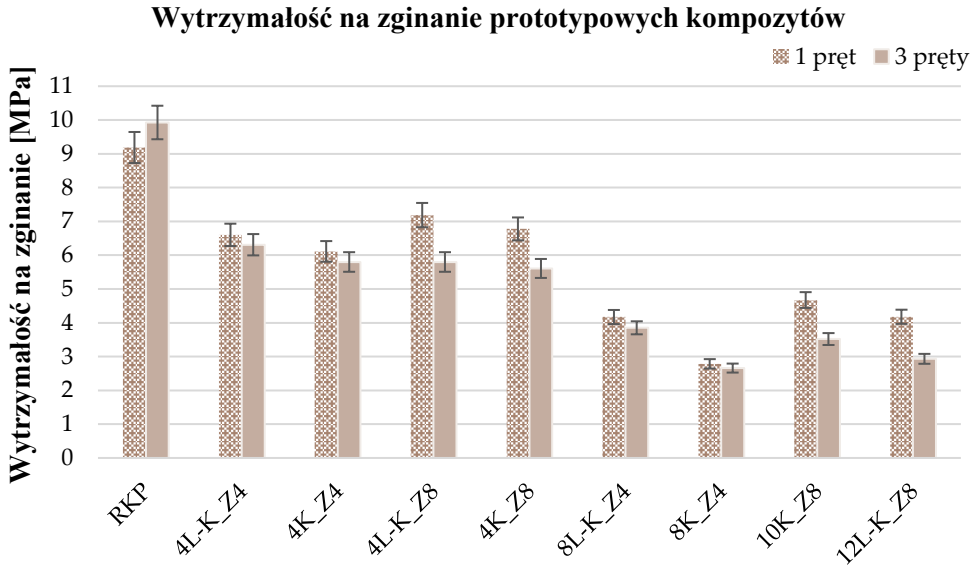
Tabela 21. *Wytrzymałość na zginanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów równomiernie rozmieszczonych na jej długości próbki.*

zbrojenie trzema krótkimi prętami rozmieszczonymi równomiernie			
ID	**R_f [MPa]**	**Średnia R_f [MPa]**	**Zdjęcie**
RKP	9,139; 9,726; 10,917	9,927	
4L-K_Z4	5,043; 6,462; 7,425	6,310	
4K_Z4	4,618; 5,141; 7,637	5,799	
4L-K_Z8	4,374; 6,609; 6,413	5,799	
4K_Z8	5,287; 5,369; 6,169	5,608	
8L-K_Z4	3,737; 4,553; 3,264	3,851	
8K_Z4	2,281; 2,383; 3,317	2,660	
10K_Z8	3,394; 2,742; 4,422	3,519	
12L-K_Z8	4,308; 2,383; 2,109	2,933	

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie pokazują, że sposób rozmieszczenia zbrojenia oraz budowa warstwowa wyraźnie wpływają na zachowanie kompozytów pod obciążeniem. W wariancie z trzema krótkimi prętami równomiernie rozmieszczonymi na długości próbki kompozyt referencyjny (RKP) osiąga średnią wytrzymałość 9,93 MPa. Jest to wartość porównywalna, a nawet nieco wyższa niż w układzie z pojedynczym prętem. Oznacza to, że zbrojenie rozproszone sprzyja bardziej równomiernemu rozkładowi naprężeń w strefie poddanej rozciąganiu [4,113]. Zastosowanie czterech warstw izolacyjnych obniża wytrzymałość na zginanie, podobnie jak w wariancie z jednym prętem. Wariant 4L-K_Z4 osiąga średnio 6,31 MPa, a 4K_Z4 5,80 MPa. Oznacza to spadek o około 36% i 42%

w porównaniu z próbką referencyjną. Spadek nośności wynika z przerwania ciągłości fazy geopolimerowej przez warstwę izolacyjną. Mniejszy jest też udział sztywnej części mineralnej w przenoszeniu obciążeń. Podobne tendencje opisano w badaniach paneli warstwowych i kompozytów z miękką izolacją włóknistą [185,188]. Zastosowanie prętów o większej średnicy w wariantach Z8 nie powoduje wyraźnego wzrostu wytrzymałości w porównaniu z wariantami Z4. Dla próbek 4L-K_Z8 i 4K_Z8 uzyskano średnio 5,80 MPa oraz 5,61 MPa. Oznacza to, że przy zbrojeniu krótkimi prętami kluczowe jest ich rozmieszczenie i zespolenie w matrycy. Samo zwiększenie przekroju pręta nie daje istotnej poprawy nośności. Podobną zależność opisano w badaniach geopolimerów i betonów zbrojonych krótkimi prętami GFRP [35,191]. Zwiększenie liczby warstw izolacyjnych do ośmiu powoduje wyraźny spadek wytrzymałości na zginanie. Wariant 8L-K_Z4 osiąga średnio 3,85 MPa, a 8K_Z4 2,66 MPa. Wyniki te pokazują, że przy dużym udziale warstwy izolacyjnej skuteczność zbrojenia krótkimi prętami jest ograniczona. Podobne wartości podawano dla lekkich paneli warstwowych z grubym materiałem izolacyjnym. W takich układach często dochodzi do odkształceń izolacji oraz rozwarstwienia [192]. Warianty z maksymalną liczbą warstw izolacyjnych, 10K_Z8 oraz 12L-K_Z8, osiągają średnią wytrzymałość na zginanie odpowiednio 3,52 MPa i 2,93 MPa. W porównaniu z wariantami z pojedynczym prętem wartości te są zbliżone lub nieco niższe. Oznacza to, że przy bardzo lekkiej strukturze większe znaczenie ma sztywność materiału izolacyjnego niż sama liczba prętów zbrojeniowych. Zależność ta jest zgodna z klasycznymi opisami zachowania kompozytów typu sandwich. W takich układach nadmierne zmniejszenie udziału ciągłej fazy geopolimerowej prowadzi do spadku nośności całego elementu [67,188]. Porównanie obu wariantów pokazuje, że zbrojenie trzema krótkimi prętami daje lepszy rozkład naprężeń i wyższą wytrzymałość w kompozycie referencyjnym. Jego skuteczność wyraźnie maleje wraz ze wzrostem liczby warstw izolacyjnych. W kompozytach z dużym udziałem izolacji włóknistej lepiej sprawdza się zbrojenie ciągłe prowadzone przez całą długość próbki. Wyniki te pokazują, że sposób zbrojenia należy dobierać do budowy i funkcji projektowanego kompozytu warstwowego.

Na rysunku 25 pokazano porównanie wytrzymałości na zginanie kompozytów warstwowych z różnym układem zbrojenia. Uwzględniono wariant z pojedynczym prętem prowadzonym wzdłuż osi próbki oraz wariant z trzema krótkimi prętami rozmieszczonymi równomiernie na jej długości. Zestawienie graficzne pozwala bezpośrednio ocenić wpływ sposobu zbrojenia na nośność przy zginaniu. Umożliwia też wskazanie różnic w zachowaniu mechanicznym kompozytów o podobnej strukturze materiałowej. Przedstawiono dwa różne układy zbrojenia w celu oceny wpływu sposobu ułożenia warstw w docelowej ścianie.



Rysunek 25. *Porównanie wytrzymałości na zginanie prototypowych kompozytów z różnym układem zbrojenia.*

Dane z rysunku 25 pokazują porównanie wytrzymałości na zginanie kompozytów w zależności od sposobu zbrojenia. Zestawiono wariant z jednym prętem prowadzonym w osi próbki oraz wariant z trzema krótkimi prętami rozmieszczonymi na jej długości. Wykres wskazuje, że układ zbrojenia wyraźnie wpływa na nośność elementów. Skala tego wpływu zależy od budowy warstwowej i udziału materiału izolacyjnego. W kompozycie referencyjnym (RKP) bez warstw izolacyjnych trzy krótkie pręty zapewniają wyższą wytrzymałość niż pojedynczy pręt. Oznacza to, że zbrojenie rozproszone sprzyja bardziej równomiernemu rozkładowi naprężeń w przekroju. Ogranicza też inicjację i rozwój rys w zwartej matrycy geopolimerowej [4,113]. W kompozytach z czterema warstwami izolacyjnymi, czyli 4L-K_Z4, 4K_Z4, 4L-K_Z8 i 4K_Z8, wytrzymałość na zginanie jest zbliżona dla obu sposobów zbrojenia. W większości przypadków nieco wyższe wartości uzyskano dla wariantu z pojedynczym prętem. Oznacza to, że po wprowadzeniu warstwy izolacyjnej większe znaczenie ma ciągłość pręta i jego dobre zespolenie w części pracującej na rozciąganie. Sama liczba prętów przestaje być czynnikiem decydującym. Podobne zależności opisano w literaturze dotyczącej kompozytów typu sandwich, gdzie skuteczność zbrojenia rozproszonego maleje wraz ze wzrostem podatności izolacji [188,192]. Wyraźne różnice między układami zbrojenia widać w kompozytach z dużym udziałem warstwy izolacyjnej, czyli 8L-K_Z4, 8K_Z4, 10K_Z8 oraz 12L-K_Z8. W tych wariantach wyższe wartości wytrzymałości na zginanie osiągają próbki z pojedynczym prętem prowadzonym przez całą długość elementu. Warianty z trzema krótkimi prętami wypadają słabiej. Można to tłumaczyć

mniejszą ciągłością przekroju nośnego przy zbrojeniu krótkim. Znaczenie ma też ograniczona długość osadzenia prętów w materiale o wysokiej porowatości. W literaturze dotyczącej geopolimerów i betonów zbrojonych prętami GFRP wskazuje się, że przy miękkim lub grubym materiale izolacyjnym skuteczniejsze jest zbrojenie ciągłe, które lepiej przenosi momenty zginające [35,191]. Najniższe wartości wytrzymałości na zginanie dla wariantów 8K_Z4 i 12L-K_Z8 ze zbrojeniem trzema prętami pokazują, że przy bardzo dużym udziale warstwy izolacyjnej o zachowaniu elementu decyduje izolacja. Zniszczenie jest wtedy związane głównie z jego odkształceniem oraz lokalną utratą przyczepności między warstwami. Jest to typowe dla lekkich paneli warstwowych o małej sztywności izolacji [67,188]. Analiza danych z rysunku 25 pokazuje, że zbrojenie trzema krótkimi prętami sprawdza się w kompozytach o zwartej lub umiarkowanie warstwowej budowie. W materiałach z dużym udziałem warstwy izolacyjnej lepsze wyniki daje zbrojenie ciągłe pojedynczym prętem. Otrzymane rezultaty są zgodne z danymi podawanymi w literaturze. Potwierdzają one, że sposób zbrojenia powinien być dopasowany do budowy i przeznaczenia projektowanego kompozytu warstwowego.

W tabeli 22 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów warstwowych ze zbrojeniem w postaci pojedynczego pręta prowadzonego w osi próbki. Przy wyznaczaniu wartości średniej pominięto dwa wyniki skrajne. Dane pozwalają ocenić wpływ budowy warstwowej, rodzaju materiału izolacyjnego oraz średnicy pręta na zdolność materiału do przenoszenia obciążeń ściskających. Zestawienie umożliwia ocenę skuteczności przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego przy obciążeniu osiowym.

Tabela 22. *Wytrzymałość na ściskanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci pręta przebiegającego przez środek próbki.*

zbrojenie jednym prętem wzdłuż próbki			
ID	**R_c [MPa]**	**Średnia R_c [MPa]**	**Zdjęcie**
RKP	34,477; 31,470; ~~40,764~~; ~~23,357~~; 38,270; 39,467	35,921	
4L-K_Z4	35,616; ~~38,609~~; ~~29,895~~; 37,342; 31,334; 31,462	33,939	
4K_Z4	28,056; ~~18,945~~; 22,704; ~~30,840~~; 28,745; 25,550	26,264	
4L-K_Z8	29,598; ~~16,844~~; 31,378; 22,241; 36,528; ~~37,638~~	29,936	
4K_Z8	34,448; ~~10,180~~; 32,294; 24,844; 21,585; ~~35,781~~	28,293	
8L-K_Z4	~~18,675~~; 10,633; 14,905; ~~6,966~~; 10,560; 17,260	13,340	
8K_Z4	9,048; ~~21,264~~; 13,406; ~~8,062~~; 9,070; 12,480	11,001	
10K_Z8	~~27,426~~; ~~4,519~~; 21,450; 22,916; 10,966; 8,395	15,932	
12L-K_Z8	~~32,792~~; 8,986; 25,730; ~~7,141~~; 14,310; 11,536	15,141	

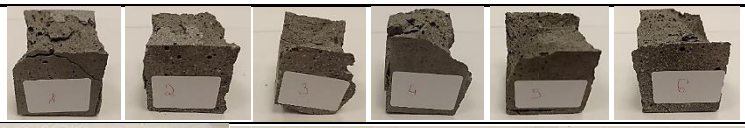
Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie pokazują, że budowa warstwowa i udział materiału izolacyjnego wyraźnie wpływają na przenoszenie obciążeń osiowych. Kompozyt referencyjny (RKP) bez warstw izolacyjnych osiąga najwyższą średnią wytrzymałość równą 35,92 MPa. Wartość ta mieści się w typowym zakresie dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych stosowanych jako materiały konstrukcyjne. W literaturze dla takich geopolimerów podaje się zwykle przedział 25-45 MPa, zależnie od składu i warunków syntezy [4,113]. Zastosowanie czterech warstw filcu lniano-konopnego w wariancie 4L-K_Z4 obniża średnią wytrzymałość na ściskanie do 33,94 MPa. Spadek jest niewielki, co oznacza, że przy małej liczbie warstw izolacyjnych ciągłość fazy geopolimerowej w dużym stopniu się utrzymuje. Podobne wyniki opisano w badaniach kompozytów geopolimerowych z dodatkiem naturalnych

wkładek włóknistych. W pracach tych umiarkowany udział materiału izolacyjnego nie powodował wyraźnej zmiany wytrzymałości na ściskanie [172,185]. Znacznie większy spadek wytrzymałości na ściskanie występuje w wariantach z matą kokosową. Dla próbek 4K_Z4 i 4K_Z8 średnie wartości wynoszą odpowiednio 26,26 MPa oraz 28,29 MPa. Spadek ten wynika z wysokiej porowatości maty kokosowej i jej większej odkształcalności pod obciążeniem osiowym. Taka struktura sprzyja lokalnemu zniszczeniu materiału izolacyjnego. W literaturze dotyczącej kompozytów cementowych i geopolimerowych z włóknami kokosowymi podkreśla się, że materiały te mają dobre właściwości izolacyjne. Wskazuje się jednak na ich ograniczoną wytrzymałość na ściskanie przy dużym udziale fazy organicznej [186,187]. Zwiększenie liczby warstw izolacyjnych do ośmiu wyraźnie obniża wytrzymałość na ściskanie. Wariant 8L-K_Z4 osiąga średnio 13,34 MPa, a 8K_Z4 11,00 MPa. Oznacza to spadek o około 60-70% w porównaniu z próbką referencyjną. Tak duża redukcja jest typowa dla kompozytów z dużym udziałem miękkiego materiału izolacyjnego. Przy ściskaniu dochodzi wtedy do lokalnego zgniatania materiału izolacyjnego i utraty stabilności warstw nośnych [188,192]. Warianty z maksymalną liczbą warstw izolacyjnych, 10K_Z8 oraz 12L-K_Z8, osiągają średnią wytrzymałość na ściskanie odpowiednio 15,93 MPa i 15,14 MPa. Mimo bardzo dużego udziału materiału izolacyjnego wartości te są zbliżone do parametrów lekkich betonów izolacyjno-konstrukcyjnych oraz paneli warstwowych stosowanych w budownictwie niskoenergetycznym. W literaturze podaje się, że dla takich materiałów zakres 5-20 MPa jest wystarczający w zastosowaniach nienośnych lub półnośnych [172,188]. Analiza rozrzutu wyników, w tym pojedynczych bardzo niskich wartości Rc w niektórych seriach, wskazuje na rosnącą niejednorodność struktury wraz ze wzrostem liczby warstw izolacyjnych. Zależność ta jest typowa dla materiałów o wysokiej porowatości i złożonej budowie warstwowej. Podobne obserwacje opisano w literaturze dotyczącej kompozytów typu sandwich [192]. Wyniki z tabeli 22 pokazują, że zastosowanie naturalnych materiałów izolacyjnych stopniowo obniża wytrzymałość na ściskanie. Skala spadku zależy od rodzaju izolacji i jej udziału objętościowego. Filc lniano-konopny pozwala utrzymać stosunkowo wysoką wytrzymałość na ściskanie przy niewielkiej liczbie warstw. Mata kokosowa powoduje większą redukcję wytrzymałości na ściskanie. Otrzymane wartości są zgodne z danymi podawanymi w literaturze. Potwierdzają one, że właściwości mechaniczne kompozytów warstwowych można kształtować w szerokim zakresie w zależności od planowanej funkcji materiału.

W tabeli 23 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów warstwowych ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów rozmieszczonych równomiernie

na długości próbki. Z analizy wartości średniej wykluczono dwa wyniki skrajne. Zestawienie pozwala ocenić wpływ takiego układu zbrojenia na wytrzymałość na ściskanie. Umożliwia też porównanie skuteczności zbrojenia rozproszonego z wariantem opartym na pojedynczym pręcie prowadzonym w osi elementu. Wyniki pozwalają ocenić przydatność tego rozwiązania w elementach kompozytowych pracujących pod ściskaniem, typowych dla zastosowań budowlanych.

Tabela 23. *Wytrzymałość na ściskanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów równomiernie rozmieszczonych na jej długości próbki.*

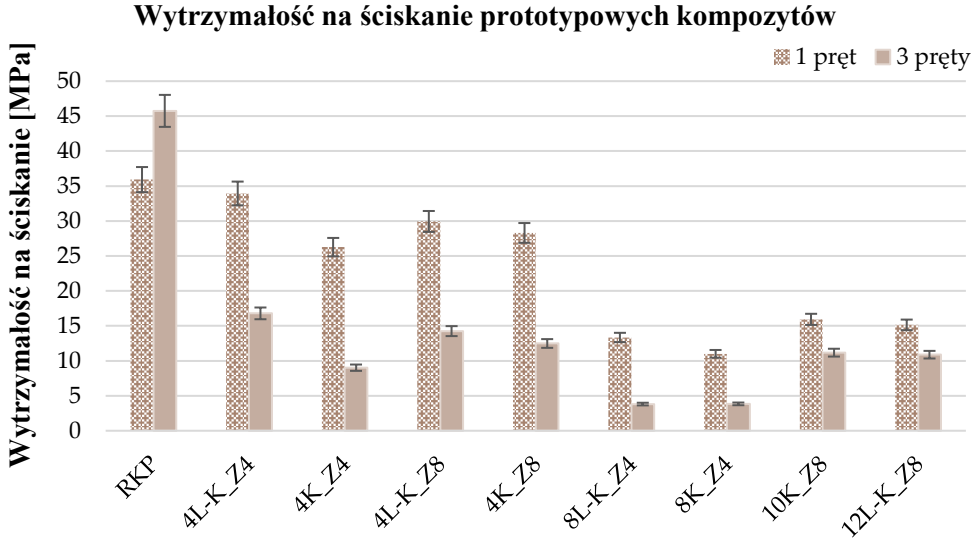
zbrojenie trzema krótkimi prętami rozmieszczonymi równomiernie			
ID	**R_c [MPa]**	**Średnia R_c [MPa]**	**Zdjęcie**
RKP	48,847; 37,496; ~~63,791~~; 58,665; ~~25,592~~; 37,986	45,749	
4L-K_R4	~~5,015~~; 5,019; 24,464; 6,626; ~~32,944~~; 31,043	16,788	
4K_R4	3,347; ~~2,792~~; 5,204; 4,352; 23,167; ~~30,014~~	9,018	
4L-K_R8	13,690; 10,506; 7,275; ~~6,161~~; ~~28,517~~; 25,532	14,251	
4K_R8	~~9,237~~; 9,567; ~~15,215~~; 14,164; 13,895; 12,305	12,483	
8L-K_R4	4,627; ~~5,335~~; 4,384; 3,583; 2,669; ~~2,386~~	3,816	
8K_R4	3,507; 4,243; 3,949; ~~2,140~~; ~~4,312~~; 3,674	3,843	
10K_R8	~~2,763~~; 11,014; ~~16,480~~; 13,012; 7,851; 12,801	11,170	
12L-K_R8	14,580; ~~27,444~~; 9,356; 14,066; ~~4,149~~; 5,509	10,878	

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie pokazują, że budowa warstwowa i udział materiału izolacyjnego bardzo silnie wpływają na przenoszenie obciążeń osiowych. W wariancie z trzema krótkimi prętami kompozytowymi kompozyt referencyjny (RKP) osiąga

średnią wytrzymałość 45,75 MPa. Wartość ta mieści się w górnym zakresie podawanym w literaturze dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych o zwartej mikrostrukturze [4,113]. Wyższe wartości R_c w porównaniu z wariantem z jednym prętem potwierdzają, że zbrojenie rozproszone lepiej stabilizuje strukturę przy ściskaniu. Ogranicza ono lokalne koncentracje naprężeń. Wprowadzenie czterech warstw filcu lniano-konopnego w wariancie 4L-K_R4 obniża średnią wytrzymałość do 16,79 MPa. Jednocześnie pojawia się duży rozrzut wyników. Wskazuje to na większą niejednorodność struktury i zmienny mechanizm zniszczenia. Decyduje o nim lokalne ułożenie warstw oraz sposób rozmieszczenia prętów. Podobne zjawiska opisano w badaniach kompozytów geopolimerowych z naturalnymi izolacjami włóknistymi. Obecność miękkiej fazy izolacyjnej sprzyja tam lokalnemu zgniataniu i utracie stabilności [172,185]. Kompozyty z matą kokosową, czyli 4K_R4 i 4K_R8, osiągają jeszcze niższe wartości wytrzymałości na ściskanie, odpowiednio 9,02 MPa i 12,48 MPa. Wyniki te potwierdzają, że wysoka porowatość oraz większa odkształcalność włókien kokosowych sprzyjają wcześniejszemu zniszczeniu przy obciążeniu osiowym. W literaturze dotyczącej kompozytów cementowych i geopolimerowych z włóknami kokosowymi wskazuje się na ich ograniczoną przydatność w zastosowaniach wymagających dużej wytrzymałości na ściskanie. Podkreśla się jednocześnie ich bardzo dobre właściwości izolacyjne [186,187]. Zwiększenie liczby warstw izolacyjnych do ośmiu powoduje dalszy i bardzo wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie. Wariant 8L-K_R4 osiąga średnio 3,2 MPa, a 8K_R4 3,84 MPa. Oznacza to redukcję nośności o ponad 90% w porównaniu z próbką referencyjną. Tak niskie wartości są typowe dla lekkich paneli warstwowych z grubym i podatnym materiałem izolacyjnym. Przy ściskaniu dominuje wtedy lokalne zgniatanie izolacji oraz utrata stabilności kształtu warstw nośnych [188,192]. Warianty z maksymalną liczbą warstw izolacyjnych, 10K_R8 oraz 12L-K_R8, osiągają średnią wytrzymałość na ściskanie odpowiednio 11,17 MPa i 10,88 MPa. Mimo dużego udziału materiału izolacyjnego wartości te są zbliżone do parametrów lekkich materiałów izolacyjno-konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie niskoenergetycznym. W literaturze wskazuje się, że dla paneli warstwowych i kompozytów izolacyjnych zakres 5-15 MPa jest wystarczający w elementach nienośnych lub półnośnych [172,188]. Analiza wyników pokazuje, że zbrojenie trzema krótkimi prętami zwiększa wytrzymałość na ściskanie w kompozytach o zwartej budowie. Jego skuteczność szybko maleje wraz ze wzrostem udziału warstwy izolacyjnej. W materiałach z dużym udziałem warstw izolacyjnych o zachowaniu elementu decydują głównie właściwości tej warstwy, a nie sam układ zbrojenia. Otrzymane wyniki są zgodne z danymi podawanymi

w literaturze. Potwierdzają one, że strukturę kompozytu należy dobierać w sposób kompromisowy, zależnie od planowanej funkcji materiału.

Na rysunku 26 pokazano porównanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów warstwowych w zależności od sposobu zbrojenia. Zestawiono wariant z pojedynczym prętem prowadzonym przez środek próbki oraz wariant z trzema krótkimi prętami rozmieszczonymi na jej długości. Wykres pozwala bezpośrednio ocenić wpływ konfiguracji zbrojenia na przenoszenie obciążeń ściskających. Umożliwia też wskazanie różnic w zachowaniu materiałów o podobnej budowie warstwowej. Analiza pokazuje, że skuteczność danego układu zbrojenia zależy przede wszystkim od udziału warstwy izolacyjnej oraz od ciągłości fazy geopolimerowej.



Rysunek 26. *Porównanie wytrzymałości na ściskanie prototypowych kompozytów z różnym układem zbrojenia.*

Wyniki pokazane na rysunku 26 wyraźnie wskazują, że sposób zbrojenia oraz udział warstw izolacyjnych wpływają na nośność kompozytów przy ściskaniu. W kompozycie referencyjnym (RKP) najwyższą wytrzymałość uzyskano w wariancie z trzema krótkimi prętami. Oznacza to lepszy rozkład naprężeń i skuteczniejsze przenoszenie obciążeń osiowych niż w przypadku jednego pręta centralnego. Taki efekt jest zgodny z danymi literaturowymi. Wskazuje się w nich, że zbrojenie rozmieszczone w kilku punktach ogranicza lokalne koncentracje naprężeń i opóźnia powstawanie pęknięć [113,193]. W kompozytach z czterema warstwami izolacji, zarówno z filcem lniano-konopnym, jak i z matą kokosową, wytrzymałość na ściskanie jest niższa niż w próbce referencyjnej. Spadek ten jest mniejszy w wariantach z pojedynczym prętem. Ciągła struktura fazy geopolimerowej umożliwia lepsze przenoszenie obciążeń ściskających. Warianty z trzema krótkimi prętami wykazują wyraźnie niższą

wytrzymałość. Można to tłumaczyć częściowym odciążeniem ciągłej fazy geopolimerowej oraz zaburzeniem jej ciągłości przez warstwy izolacyjne o małej sztywności [194]. Najniższe wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano w kompozytach z dużą liczbą warstw izolacyjnych, czyli 8, 10 i 12, niezależnie od rodzaju włókna. Taki trend jest zgodny z danymi literaturowymi. Wskazuje się w nich, że wzrost udziału fazy porowatej lub włóknistej zmniejsza rzeczywistą powierzchnię nośną materiału. W rezultacie przy ściskaniu dominuje mechanizm zgniatania oraz lokalnego wyboczenia warstw izolacyjnych [2,182]. W tych wariantach trzy krótkie pręty nie kompensują osłabienia struktury. Mogą nawet dodatkowo obniżać nośność przez podział stref, które przenoszą obciążenie. Porównanie z danymi literaturowymi pokazuje, że wytrzymałość na ściskanie w zakresie 30-45 MPa dla materiałów o zwartej strukturze jest typowa dla geopolimerów niskowapniowych [4,113]. Wartości wytrzymałości poniżej 15 MPa, obserwowane w kompozytach z dużym udziałem warstw izolacyjnych, są typowe dla materiałów o dominującej funkcji termoizolacyjnej. W takich rozwiązaniach zdolność przenoszenia obciążeń mechanicznych ma znaczenie drugorzędne [182]. Analiza rysunku 26 pokazuje, że wytrzymałość na ściskanie zależy przede wszystkim od ciągłości matrycy geopolimerowej oraz od sposobu rozmieszczenia zbrojenia. Zwiększanie liczby warstw izolacyjnych prowadzi do przewidywalnego spadku nośności. Wynik ten jest zgodny z aktualnym stanem wiedzy opisanym w literaturze.

8.2.4. Podsumowanie części II – kompozyty prototypowe

W tej części pracy przeprowadzono ocenę właściwości prototypowych kompozytów warstwowych wykonanych na bazie matrycy geopolimerowej z popiołu lotnego i piasku kwarcowego, z dodatkiem naturalnych materiałów izolacyjnych oraz zbrojenia kompozytowego. Analiza objęła właściwości fizyczne, termoizolacyjne i mechaniczne, co pozwoliło na ocenę materiałów według kilku kryteriów. Wprowadzenie warstw izolacyjnych w postaci filcu lniano-konopnego i maty kokosowej wyraźnie obniżyło gęstość kompozytów w porównaniu z próbką referencyjną. Skala spadku zależała od liczby warstw i ich budowy, a największe obniżenie uzyskano przy najwyższym udziale materiałów izolacyjnych. Zwiększenie średnicy pręta zbrojeniowego częściowo ograniczało spadek gęstości, co wskazuje na jego wpływ na kształtowanie struktury przestrzennej kompozytu. Badania właściwości cieplnych potwierdziły, że naturalne warstwy izolacyjne skutecznie poprawiają parametry termoizolacyjne. Najniższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła uzyskano w kompozytach z matą kokosową oraz w wariantach z największą liczbą warstw izolacyjnych. Spadek przewodności cieplnej był wyraźnie powiązany z obniżeniem gęstości i wzrostem

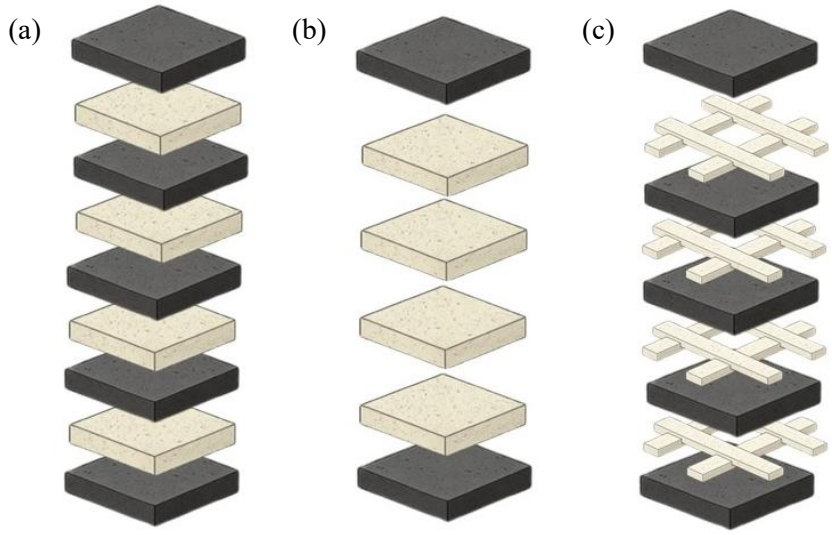
porowatości materiału. Parametry cieplne pozostawały stabilne w badanym zakresie temperatur, co wskazuje na możliwość pracy materiału w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Właściwości mechaniczne zależały od budowy warstwowej i sposobu zbrojenia. Wszystkie warianty z warstwami izolacyjnymi miały niższą wytrzymałość na zginanie i ściskanie niż kompozyt referencyjny, a skala spadku rosła wraz z udziałem izolacji. Lepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu pojedynczego pręta prowadzonego przez środek próbki niż przy trzech krótkich prętach, co potwierdza znaczenie ciągłości zbrojenia i spójności matrycy. Z tego względu w dalszej części pracy zdecydowano się na wyłącznie taki rodzaj zbrojenia. Zwiększenie liczby warstw izolacyjnych zmniejsza udział ciągłej fazy geopolimerowej w przenoszeniu obciążeń. Kompozyty o najwyższej izolacyjności cieplnej mają więc charakter materiałów o dominującej funkcji termoizolacyjnej. Warianty z umiarkowaną liczbą warstw stanowią kompromis między poprawą właściwości cieplnych a zachowaniem akceptowalnej wytrzymałości. Badania potwierdziły, że przez dobór rodzaju i liczby warstw izolacyjnych oraz konfiguracji zbrojenia można kształtować właściwości kompozytów w szerokim zakresie. Opracowane materiały mają potencjał zastosowania w przegrodach budowlanych i elementach o podwyższonych wymaganiach termoizolacyjnych, gdzie ważna jest redukcja masy i przewodności cieplnej przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości i stabilności elementu.

8.3. CZĘŚĆ III – WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA OPRACOWANYCH KOMPOZYTÓW

8.3.1. Wytwarzanie opracowanych kompozytów

Proces syntezy opracowanych kompozytów warstwowych przeprowadzono w sposób analogiczny do etapu badań prototypowych. Zachowano te same założenia dotyczące składu matrycy geopolimerowej, przygotowania mieszaniny oraz warunków formowania i dojrzewania. Matrycę stanowił geopolimer otrzymany z popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego i piasku kwarcowego, aktywowany roztworem alkalicznym. Zmiany dotyczyły głównie rodzaju izolacji, liczby warstw i ich układu przestrzennego. W tej serii badań zrezygnowano z maty kokosowej i skupiono się na surowcach lokalnie dostępnych. Jako izolację zastosowano filc lniano-konopny, który wcześniej wykazał dobre właściwości cieplne i kompatybilność z matrycą. Takie podejście pozwoliło ograniczyć ślad węglowy i zwiększyć potencjał wdrożeniowy materiału. Aby uniknąć zgniatania izolacji podczas formowania, wprowadzono elementy dystansujące. Zastosowano przekładki kompozytowe na bazie cementu oraz podkładki dystansowe w postaci tulei umieszczane w obrębie warstw naturalnych.

Rozwiązanie to pozwoliło zachować projektowaną grubość izolacji i kontrolować porowatość kompozytu. Ograniczono też niekontrolowane zagęszczanie filcu. Przygotowano trzy warianty układu warstwowego przy tej samej całkowitej ilości izolacji. W pierwszym wariancie zastosowano klasyczny układ naprzemienny geopolimer-izolacja. Drugi wariant zakładał skupienie izolacji w środkowej części próbki, z warstwami geopolimeru po obu stronach. Taki układ odpowiada typowej budowie przegrody budowlanej i stanowił punkt odniesienia. Trzeci wariant obejmował układ naprzemienny, w którym warstwy filcu pocięto na pasy i ułożono krzyżowo. Celem było zwiększenie liczby styków między warstwami i potencjalne zwiększenie oporu dla przepływu ciepła. W próbkach sześciennych o wymiarach 150 × 150 × 150 mm zastosowano cztery warianty liczby warstw izolacyjnych, czyli 4, 3, 2 i 1 warstwę filcu, przy stałych wymiarach próbek. Łącznie przygotowano 15 wariantów. Pozwoliło to ocenić wpływ podziału izolacji na właściwości cieplne i mechaniczne przy zachowaniu porównywalnej geometrii. Dodatkowo wykonano próbki o wymiarach 300 × 300 × 102 mm do badań przewodności cieplnej aparatem GHP 900. W tych próbkach zastosowano 2 lub 3 warstwy izolacyjne w dwóch układach, czyli jako warstwę centralną oraz w układzie naprzemiennym. Każdy wariant wykonano w dwóch egzemplarzach, co pozwoliło ocenić powtarzalność wyników. Łącznie przygotowano cztery warianty materiałowe do badań GHP 900. We wszystkich kompozytach zastosowano wyłącznie pręty kompozytowe o średnicy 4 mm. Pozwoliło to ograniczyć liczbę zmiennych i skupić się na wpływie układu warstwowego oraz struktury izolacji. Na rysunku 27 przedstawiono schemat układu warstw w opracowanych kompozytach.



Rysunek 27. *Schemat układu warstw w opracowanych kompozytach warstwowych: a) układ naprzemienny geopolimer-izolacja, b) układ z warstwą izolacyjną skoncentrowaną w środkowej części próbki, c) układ naprzemienny z warstwami izolacyjnymi ułożonymi krzyżowo.*

W tabeli 24 przedstawiono system oznaczeń opracowanych kompozytów geopolimerowych. Uwzględnia on najważniejsze parametry różnicujące poszczególne warianty. System kodowania opracowano tak, aby umożliwić jednoznaczną identyfikację próbek i ułatwić analizę porównawczą wyników. Oznaczenia odzwierciedlają rodzaj materiału izolacyjnego, liczbę warstw oraz konfigurację przestrzenną układu. Pozwalają szybko odróżnić warianty o układzie naprzemiennym, warianty z izolacją skupioną w środkowej części próbki oraz kompozyty z warstwami filcu ułożonymi krzyżowo. Przyjęty system jest czytelny i umożliwia zwięzłe przedstawienie złożonej budowy badanych materiałów w dalszej części pracy.

Tabela 24. *System oznaczeń opracowanych kompozytów geopolimerowych.*

Oznaczenie próbki	**Kompozycja materiałowa kompozytu**
RKG	referencyjny kompozyt geopolimerowy
K4M-8P-R	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K4MP-8P-R	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K3M-6P-R	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K3MP-6P-R	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2M-4P-R	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2MP-4P-R	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne pocięte na paski, każda mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K1M-2P-R	kompozyt zawierający 1 matę lniano-konopną, mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K1MP-2P-R	kompozyt zawierający 1 matę lniano-konopną pociętą na paski, mata obłożona jest płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone
K2MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K2M-2P-Ś	kompozyt zawierający 2 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K3MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu

K3M-2P-Ś	kompozyt zawierający 3 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K4MP-2P-Ś	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne pocięte na paski, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu
K4M-2P-Ś	kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne, izolacja obłożona jest 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu

*K – kompozyt, M – mata, MP – mata pocięta na paski, P – płyta, R – rozłożone warstwowo, Ś – izolacja na środku

W tabeli 24 przedstawiono system oznaczeń opracowanych kompozytów geopolimerowych wraz z ich składem. Oznaczenia mają formę alfanumeryczną i pozwalają jednoznacznie określić najważniejsze cechy strukturalne danego wariantu. Symbol RKG oznacza referencyjny kompozyt geopolimerowy bez warstw izolacyjnych i stanowi punkt odniesienia do dalszych analiz. W przypadku kompozytów warstwowych oznaczenie rozpoczyna się literą K, która wskazuje na kompozytowy charakter materiału. Kolejna cyfra określa liczbę warstw izolacyjnych z filcu lniano-konopnego. Symbol M oznacza pełne maty, a MP maty pocięte na paski i ułożone w sposób krzyżowy. Liczba poprzedzająca literę P określa liczbę zastosowanych płyt budowlanych pełniących funkcję elementów dystansowych. Ostatni człon oznaczenia informuje o układzie warstw. Symbol R oznacza układ naprzemienny, w którym warstwy geopolimeru i izolacji występują sekwencyjnie w całej objętości próbki. Symbol Ś oznacza wariant z izolacją skupioną w środkowej części kompozytu i otoczoną warstwami geopolimeru. Taki system pozwala szybko rozpoznać liczbę i formę warstw izolacyjnych oraz sposób ich rozmieszczenia. W tabeli podano również objaśnienia skrótów: K - kompozyt, M - mata, MP - mata pocięta na paski, P - płyta budowlana, R - układ warstwowy naprzemienny, Ś - izolacja umieszczona centralnie. W przeciwieństwie do wcześniejszego etapu badań, we wszystkich wariantach zastosowano zbrojenie w postaci prętów kompozytowych. Dotyczy to zarówno kompozytów warstwowych, jak i próbki referencyjnej RKG. Ponieważ zbrojenie było stałym elementem we wszystkich próbkach, nie uwzględniono go w systemie oznaczeń. Pozwoliło to uprościć zapis i skupić się na parametrach rzeczywiście różnicujących badane materiały, czyli liczbie i formie warstw izolacyjnych oraz ich układzie przestrzennym.

Na rysunku 28 pokazano makrofotografie opracowanych kompozytów warstwowych, obejmujące próbkę referencyjną oraz wszystkie warianty z izolacją z filcu lniano-konopnego. Obrazy pozwalają porównać budowę makrostrukturalną próbek, w tym jednorodność warstw, jakość połączeń między nimi oraz zachowanie projektowanej geometrii izolacji. Fotografia

oznaczona jako a) przedstawia kompozyt referencyjny RKG o zwartej i jednorodnej strukturze bez warstw izolacyjnych. Obrazy b-i) pokazują warianty o układzie naprzemiennym R, w których warstwy geopolimeru i izolacji rozmieszczono sekwencyjnie w całej objętości próbki. W tej grupie znajdują się kompozyty z jedną do czterech warstw izolacyjnych, zarówno w postaci pełnych mat, jak i mat pociętych na paski. Zestawienie to pozwala ocenić wpływ podziału izolacji na ciągłość warstw i charakter granic międzyfazowych. Fotografie j-o) przedstawiają warianty z izolacją skupioną w środkowej części próbki, oznaczone symbolem Ś, z warstwami geopolimeru u góry i u dołu. Obejmują one kompozyty z dwiema, trzema i czterema warstwami izolacyjnymi w obu formach materiału. Analiza zdjęć potwierdza prawidłowość przyjętej technologii formowania oraz skuteczność zastosowanych elementów dystansujących. Pozwoliły one zachować projektowaną grubość warstw i ograniczyć ich niekontrolowane zagęszczanie. Obserwacje te uzupełniają wyniki badań mechanicznych i cieplnych przedstawione w dalszej części rozdziału.



Rysunek 28. *Makrofotografie warstwowych kompozytów geopolimerowych: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś.*

8.3.2. Charakterystyka właściwości mechanicznych opracowanych kompozytów

W tabeli 25 zestawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych. Uwzględniono zarówno kompozyt referencyjny, jak i wszystkie warianty warstwowe różniące się liczbą warstw izolacyjnych, formą izolacji oraz układem przestrzennym warstw. Zestawienie pozwala porównać wpływ modyfikacji struktury na zdolność materiałów do przenoszenia obciążeń. W tabeli podano średnie wartości wytrzymałości na ściskanie wyznaczone na próbkach sześciennych o wymiarach 150 × 150 × 150 mm, zgodnie z obowiązującą procedurą badawczą, oraz odpowiadające im maksymalne siły. Analiza tych danych umożliwia ocenę wpływu liczby warstw izolacyjnych na poziom wytrzymałości przy niezmienionej geometrii próbek. Porównanie wariantów z pełnymi matami filcu lniano-konopnego i matami pociętymi na paski pozwala określić znaczenie formy izolacji dla rozkładu naprężeń i mechanizmu zniszczenia. Ujęcie zarówno układów naprzemiennych, jak i wariantów z izolacją skupioną w części centralnej umożliwia ocenę wpływu konfiguracji warstwowej na właściwości mechaniczne kompozytów.

Tabela 25. *Charakterystyka wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych.*

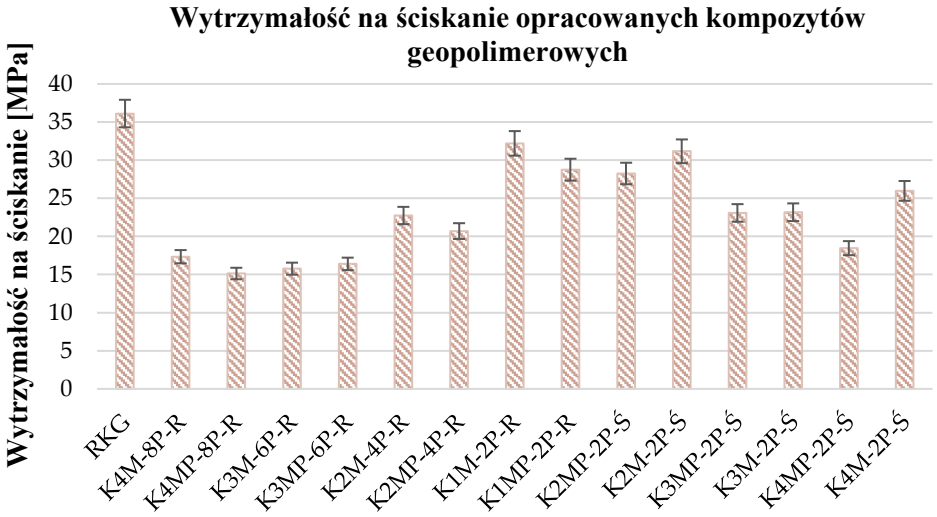
Badana próbka	**Siła [kN]**	**R_c [MPa]**
RKG	812,678	36,119
K4M-8P-R	390,172	17,341
K4MP-8P-R	340,470	15,132
K3M-6P-R	354,865	15,772
K3MP-6P-R	368,902	16,396
K2M-4P-R	511,633	22,739
K2MP-4P-R	465,799	20,702
K1M-2P-R	724,628	32,206
K1MP-2P-R	646,903	28,751
K2MP-2P-Ś	635,717	28,254
K2M-2P-Ś	701,252	31,167
K3MP-2P-Ś	519,295	23,080
K3M-2P-Ś	521,444	23,175
K4MP-2P-Ś	415,380	18,461
K4M-2P-Ś	584,395	25,973

Na podstawie danych z tabeli 25 stwierdzono, że wprowadzenie warstw izolacyjnych z filcu lniano-konopnego wyraźnie obniża wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z materiałem referencyjnym. Kompozyt referencyjny RKG osiągnął najwyższą wartość równą 36,1 MPa. Jest to poziom typowy dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych aktywowanych alkalicznie. Wartość ta jest zgodna z danymi podawanymi w literaturze [1–3]. W kompozytach o układzie naprzemiennym R widać wyraźną zależność między liczbą warstw izolacyjnych

a spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Najniższe wartości R_c uzyskano w wariantach z czterema warstwami izolacji, czyli K4M-8P-R i K4MP-8P-R. Wytrzymałość wyniosła tam odpowiednio 17,3 MPa i 15,1 MPa. Spadek ten wynika ze wzrostu udziału fazy o małej sztywności oraz ze zwiększenia liczby granic między warstwami. Granice te stanowią miejsca koncentracji naprężeń i mogą inicjować zniszczenie. Podobne zjawiska opisano w literaturze dotyczącej kompozytów geopolimerowych z dodatkiem materiałów naturalnych [195–197]. Zmniejszenie liczby warstw izolacyjnych do dwóch i jednej powodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie. Wariant K2M-4P-R osiągnął 22,7 MPa, a K1M-2P-R 32,2 MPa. Oznacza to, że przy mniejszym udziale izolacji można zachować stosunkowo wysoką nośność kompozytu. Wynik ten potwierdza opisywany w literaturze kompromis między właściwościami cieplnymi a mechanicznymi materiałów warstwowych [198,199]. Porównanie wariantów z pełnymi matami i matami pociętymi na paski pokazuje, że w większości przypadków kompozyty z izolacją w formie pasków MP miały nieco niższą wytrzymałość na ściskanie. Można to tłumaczyć większą liczbą granic między warstwami oraz większą niejednorodnością rozkładu naprężeń. Taka struktura sprzyja wcześniejszej inicjacji uszkodzeń. Podobne obserwacje opisano w literaturze dotyczącej kompozytów geopolimerowych z dodatkiem włókien lignocelulozowych [197,200]. Warianty z izolacją skupioną w środkowej części próbki, oznaczone symbolem Ś, osiągały wyraźnie wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie niż kompozyty o układzie naprzemiennym przy tej samej liczbie warstw. Przykładowo kompozyt K2M-2P-Ś uzyskał 31,2 MPa. Wartość ta jest zbliżona do wyniku dla wariantu z jedną warstwą izolacji w układzie naprzemiennym. Można to wyjaśnić bardziej efektywnym przenoszeniem obciążeń przez ciągłe warstwy geopolimerowe położone przy powierzchni próbki. Takie rozwiązanie jest zgodne z zasadami projektowania przegród warstwowych i zostało szeroko opisane w literaturze [188,192]. Uzyskane wyniki pokazują, że układ przestrzenny warstw ma kluczowe znaczenie dla właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych. Odpowiedni dobór liczby i rozmieszczenia warstw izolacyjnych pozwala świadomie kształtować relację między nośnością a właściwościami funkcjonalnymi materiału.

Na rysunku 29 przedstawiono graficzne zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych. Uwzględniono kompozyt referencyjny oraz wszystkie warianty warstwowe różniące się liczbą warstw izolacyjnych, formą materiału izolacyjnego i układem przestrzennym warstw. Wykres pozwala w przejrzysty sposób ocenić wpływ modyfikacji struktury na zdolność materiałów do przenoszenia obciążeń

ściskających. Zestawienie graficzne stanowi uzupełnienie danych tabelarycznych i ułatwia ich interpretację.

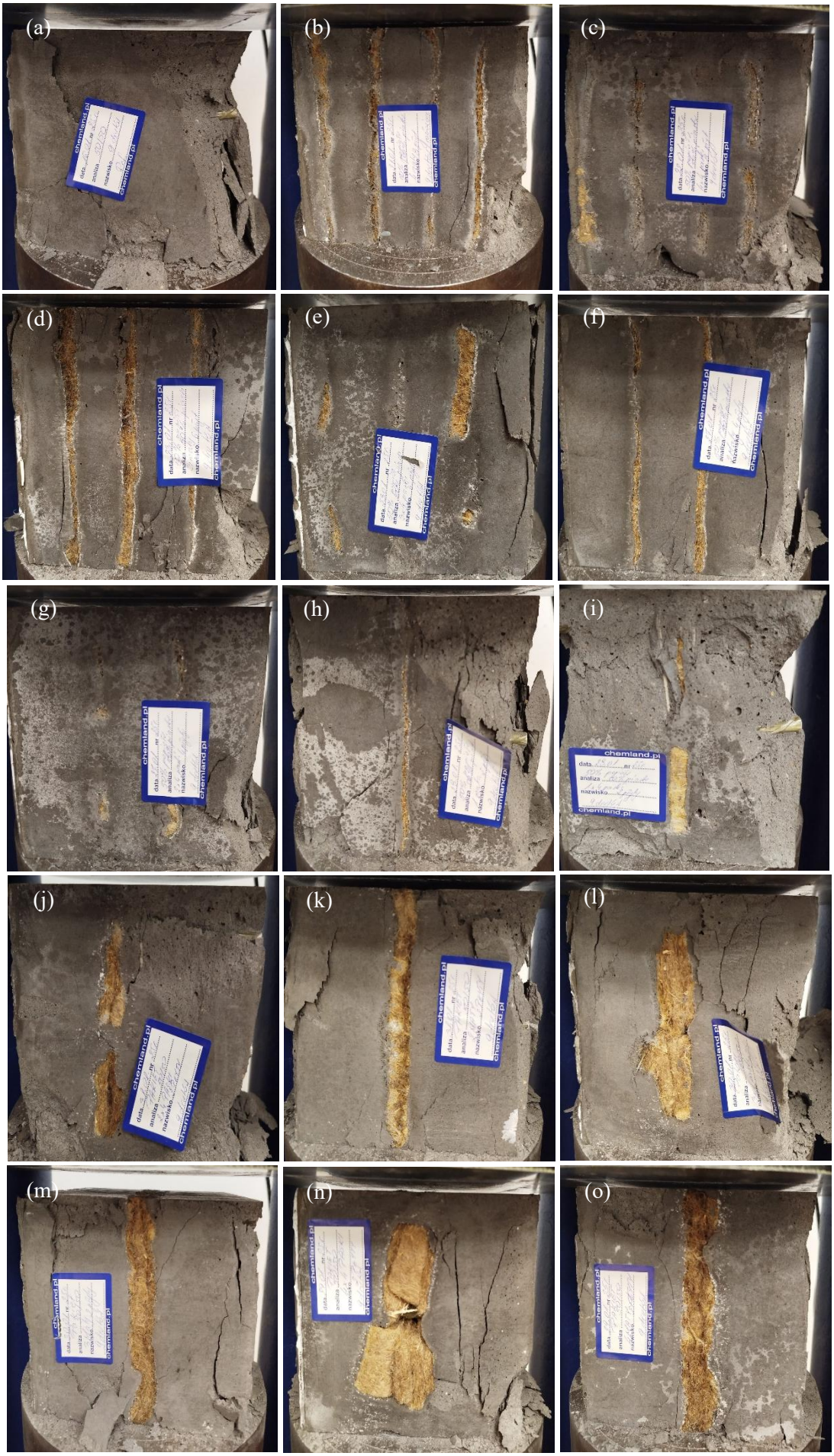


Rysunek 29. *Wytrzymałość na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych.*

Dane z rysunku 29 potwierdzają, że zmiany w budowie warstwowej wyraźnie wpływają na wytrzymałość na ściskanie kompozytów geopolimerowych. Najwyższą wartość uzyskano dla kompozytu referencyjnego RKG. Jego wytrzymałość R_c wynosi około 36 MPa. Jest to poziom typowy dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych bez dodatków organicznych i zgodny z danymi podawanymi w literaturze [1–3]. Wprowadzenie warstw izolacyjnych z filcu lniano-konopnego powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie. Skala tego spadku zależy od liczby warstw oraz ich układu w przekroju. W wariantach o układzie naprzemiennym R widać wyraźny trend malejący wraz ze wzrostem liczby warstw. Dla jednej warstwy, w przypadku K1M-2P-R, wartość R_c wynosi około 32 MPa. Dla czterech warstw, w wariantach K4M-8P-R i K4MP-8P-R, spada do poziomu 15-17 MPa. Tendencja ta jest zgodna z wynikami badań nad geopolimerami modyfikowanymi włóknami i materiałami lignocelulozowymi. Wskazuje się w nich, że większy udział fazy organicznej oraz większa liczba granic między warstwami pogarszają zdolność materiału do przenoszenia obciążeń ściskających [195,201,202]. Porównanie wariantów z pełnymi matami M i matami pociętymi na paski MP pokazuje, że w większości przypadków kompozyty z izolacją w formie pasków mają nieco niższą wytrzymałość na ściskanie. Można to tłumaczyć większą niejednorodnością struktury oraz większą liczbą granic między warstwami, które sprzyjają koncentracji naprężeń. Podobne zjawiska obserwowano w badaniach geopolimerów zbrojonych włóknami naturalnymi rozmieszczonymi w sposób nieregularny [201,203]. Na tle wariantów naprzemiennych wyraźnie wyróżniają się kompozyty z izolacją skupioną w środkowej części próbki, oznaczone

symbolem Ś. Przy tej samej liczbie warstw izolacyjnych uzyskano w nich wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie. Dla przykładu K2M-2P-Ś osiągnął około 31 MPa, podczas gdy K2M-4P-R około 23 MPa. Różnicę tę można wyjaśnić korzystniejszym rozkładem naprężeń. Ciągłe warstwy geopolimerowe przy powierzchni próbki przejmują większość obciążeń ściskających. Taki mechanizm jest zgodny z zasadami projektowania materiałów warstwowych i jest opisywany w literaturze dotyczącej paneli sandwichowych oraz kompozytów geopolimerowych [188,192,199]. Uzyskane wyniki pokazują, że układ warstw ma kluczowe znaczenie dla właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych. Odpowiednie rozmieszczenie izolacji pozwala w dużym stopniu ograniczyć jej negatywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Widać wyraźny kompromis między nośnością a funkcją termoizolacyjną materiału. Taka zależność jest zgodna z aktualnym stanem wiedzy opisanym w literaturze [188,195,201,202].

Na rysunku 30 pokazano makrofotografie kompozytów po badaniu wytrzymałości na ściskanie. Obejmują one próbkę referencyjną oraz wszystkie warianty warstwowe różniące się liczbą i formą izolacji oraz układem warstw. Zdjęcie a) przedstawia kompozyt referencyjny RKG. Widać w nim typowy dla materiałów kruchych mechanizm zniszczenia z pionowymi i ukośnymi rysami ścinającymi. Rysy rozwijają się w strefach maksymalnych naprężeń, co wskazuje na jednorodny rozkład naprężeń w próbce. Obrazy b-i) pokazują warianty o układzie naprzemiennym R. W tych kompozytach zniszczenie ma bardziej złożony przebieg i zależy od liczby oraz formy warstw izolacyjnych. Przy większej liczbie warstw pęknięcia inicjują się na granicy geopolimer-izolacja. Prowadzi to do lokalnych rozwarstwień i deformacji filcu. W wariantach z matami pociętymi na paski zarysowania są bardziej rozproszone. Kompozyty z jedną lub dwiema warstwami izolacji wykazują bardziej zwarty charakter zniszczenia i mniejszy rozwój pęknięć między warstwami. Odpowiada to ich wyższej wytrzymałości na ściskanie. Fotografie j-o) przedstawiają warianty z izolacją skupioną w części centralnej Ś. W tych próbkach mechanizm zniszczenia jest bardziej symetryczny i kontrolowany. Pęknięcia rozwijają się głównie w strefach geopolimerowych, a warstwa izolacyjna ulega przede wszystkim deformacji i częściowo absorbuje energię. Analiza zdjęć potwierdza, że układ warstw wpływa nie tylko na poziom wytrzymałości, lecz także na sposób zniszczenia kompozytu. Obserwowane mechanizmy są zgodne z opisami w literaturze dotyczącej materiałów typu sandwich oraz kompozytów geopolimerowych modyfikowanych włóknami naturalnymi [192,195,201]. Obserwowane mechanizmy pękania uzupełniają wyniki ilościowe i pozwalają lepiej zrozumieć zależność między budową materiału a jego zachowaniem pod obciążeniem.



Rysunek 30. *Makrofotografie kompozytów geopolimerowych po ściskaniu: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś.*

8.3.3. Parametry fizyczne opracowanych kompozytów

W tabeli 26 przedstawiono gęstość objętościową, opór cieplny oraz współczynnik przenikania ciepła U dla opracowanych kompozytów geopolimerowych. Zestawienie tych danych pozwala ocenić, jak budowa warstwowa oraz liczba i rodzaj warstw izolacyjnych wpływają na właściwości fizyczne materiału. Ujęcie zarówno gęstości, jak i parametrów cieplnych umożliwia analizę zależności między stopniem zagęszczenia struktury a transportem ciepła. Porównanie wartości oporu cieplnego pozwala określić, które warianty kompozytów lepiej sprawdzają się jako elementy przegród budowlanych. Współczynnik przenikania ciepła U obliczono zgodnie z obowiązującą normą, co umożliwia odniesienie wyników do aktualnych wymagań technicznych w budownictwie. Opór cieplny oraz współczynnik U wyznaczono teoretycznie na podstawie znanych wartości współczynnika przewodności cieplnej λ oraz grubości poszczególnych warstw przegrody.

Tabela 26. *Parametry fizyczne opracowanych kompozytów geopolimerowych.*

Badana próbka	**Gęstość [kg/m^3]**	**Opór cieplny [(m^2·K)/W]**	**Współczynnik U [W/(m^2·K)]**
RKG	1744	0,32	3,16
K4M-8P-R	1175	1,58	0,63
K4MP-8P-R	1176	1,58	0,63
K3M-6P-R	1325	1,26	0,79
K3MP-6P-R	1324	1,26	0,79
K2M-4P-R	1540	0,95	1,05
K2MP-4P-R	1486	0,95	1,05
K1M-2P-R	1639	0,63	1,58
K1MP-2P-R	1622	0,63	1,58
K2MP-2P-Ś	1495	0,76	1,31
K2M-2P-Ś	1489	0,76	1,31
K3MP-2P-Ś	1064	0,89	1,12
K3M-2P-Ś	1493	0,89	1,12
K4MP-2P-Ś	1324	1,02	0,98
K4M-2P-Ś	1321	1,02	0,98

Uzyskane wartości oporu cieplnego oraz współczynnika przenikania ciepła U pokazują, że układ warstw i udział fazy izolacyjnej wyraźnie wpływają na właściwości cieplne

kompozytów geopolimerowych. Próbka referencyjna RKG, która nie zawiera warstwy izolacyjnej, ma niski opór cieplny na poziomie R równym 0,32 (m²·K)/W. W tej samej próbce odnotowano wysoki współczynnik przenikania ciepła U równy 3,16 W/(m²·K). Takie wartości są typowe dla jednorodnych materiałów mineralnych o stosunkowo dużej przewodności cieplnej. Wyniki te są zgodne z danymi literaturowymi dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych [4,11,113]. Zastosowanie warstw izolacyjnych z filcu lniano-konopnego wyraźnie poprawia parametry cieplne przegrody. Najlepsze wyniki uzyskano dla kompozytów z czterema warstwami izolacyjnymi ułożonymi naprzemiennie, czyli K4M-8P-R i K4MP-8P-R. W tych wariantach opór cieplny wynosi 1,58 (m²·K)/W. Współczynnik przenikania ciepła U spada w tym przypadku do 0,63 W/(m²·K). Zmniejszenie liczby warstw izolacyjnych powoduje stopniowy spadek oporu cieplnego. Jednocześnie rośnie wartość współczynnika U. Wyniki te pokazują, że udział objętościowy materiału izolacyjnego ma kluczowe znaczenie dla transportu ciepła przez przegrodę. Porównanie wariantów z matami ciągłymi oraz matami pociętymi na paski wskazuje na niewielkie różnice w wartościach R i U. Oznacza to, że decydująca jest całkowita grubość i ciągłość warstwy izolacyjnej. Sposób podziału maty ma mniejsze znaczenie dla przewodzenia ciepła. Taka zależność jest opisywana w literaturze dotyczącej przegród warstwowych i materiałów typu sandwich, gdzie główną rolę odgrywa opór cieplny materiału izolacyjnego [61,169,192]. Warianty z izolacją skupioną w środkowej części przegrody osiągają pośrednie wartości oporu cieplnego na poziomie 0,76-1,02 (m²·K)/W. W tych samych układach współczynnik przenikania ciepła U mieści się w zakresie 0,98-1,31 W/(m²·K). Wynika to z obecności ciągłych warstw geopolimerowych po obu stronach materiału izolacyjnego. Warstwy te zwiększają całkowity opór cieplny przegrody poprzez sumowanie oporów poszczególnych warstw. Taka zależność jest opisywana w badaniach dotyczących przegród warstwowych oraz paneli kompozytowych [192,204]. Na podstawie obliczeń teoretycznych określono, że aby uzyskać współczynnik przenikania ciepła na poziomie 0,19 W/m²·K, odpowiadający wymaganiom dla ścian zewnętrznych w aktualnych przepisach budowlanych, konieczne jest zwiększenie całkowitej grubości przegrody. Taki parametr można osiągnąć przy układzie warstwowym o łącznej grubości 25 cm. W analizowanym rozwiązaniu 10 cm stanowi warstwa geopolimerowa. Pozostałe 15 cm to warstwa izolacyjna z filcu lniano-konopnego wraz z płytami dystansującymi. Otrzymany wynik jest zbliżony do wartości podawanych dla przegród wykonanych z tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych z izolacją z wełny mineralnej lub naturalnych materiałów włóknistych [169,172].

W tabeli 27 przedstawiono wartości współczynnika przewodności cieplnej λ dla opracowanych kompozytów geopolimerowych. Pomiary wykonano dla czterech wariantów materiałowych przeznaczonych do badań w aparacie płytowym GHP 900. Dla każdego wariantu przygotowano dwie kopie próbek. Pozwoliło to ocenić powtarzalność wyników oraz wpływ budowy warstwowej na efektywną przewodność cieplną. Badania przeprowadzono na próbkach o zwiększonych wymiarach zgodnie z metodyką GHP 900 stosowaną w Akredytowanym Laboratorium Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Metoda ta umożliwia wyznaczenie współczynnika λ w warunkach ustalonego przepływu ciepła. Wykonanie dwóch kopii dla każdego wariantu pozwoliło także sprawdzić, czy występują różnice związane z oporem kontaktowym na granicach między warstwami. Ma to szczególne znaczenie w kompozytach o złożonej strukturze wielowarstwowej. Otrzymane wartości λ stanowią podstawę do analizy wpływu układu warstw oraz liczby granic fazowych na transport ciepła w badanych kompozytach geopolimerowych.

Tabela 27. *Współczynnik przewodności cieplnej opracowanych kompozytów geopolimerowych.*

Badana próbka	**Przewodność cieplna [W/(m·K)]**
K3M-6P-R_1	0,2059 ±0,0001
K3M-6P-R_2	0,2174 ±0,0001
K2M-4P-R_1	0,2484 ±0,0001
K2M-4P-R_2	0,2668 ±0,0001
K3M-6P-Ś_1	0,1128 ±0,0001
K3M-6P-Ś_2	0,1171 ±0,0001
K2M-4P-Ś_1	0,1569 ±0,0001
K2M-4P-Ś_2	0,1668 ±0,0001

Dane z tabeli 27 pokazują wyraźny wpływ układu warstw oraz liczby granic międzyfazowych na efektywną przewodność cieplną kompozytów geopolimerowych. Najwyższe wartości współczynnika λ uzyskano dla wariantów o układzie naprzemiennym. Niższe wartości λ odnotowano w próbkach z koncentracją materiału izolacyjnego w środkowej części przekroju. Dla próbek K3M-6P-R współczynnik λ wynosił 0,206 W/(m·K) oraz 0,217 W/(m·K). Dla wariantu K2M-4P-R wartości te były wyższe i osiągnęły 0,248 W/(m·K) oraz 0,267 W/(m·K). Wzrost przewodności cieplnej przy mniejszej liczbie warstw izolacyjnych w układzie naprzemiennym wynika z większego udziału ciągłych warstw

geopolimerowych. Geopolimer ma wyższą przewodność cieplną niż materiał izolacyjny. Taka zależność jest opisywana w literaturze dotyczącej kompozytów mineralnych modyfikowanych materiałami naturalnymi [2,201]. Znacznie niższe wartości współczynnika λ uzyskano dla kompozytów z izolacją skupioną w centralnej części przekroju. Dla próbek K3M-6P-Ś współczynnik λ wynosił 0,113 W/(m·K) oraz 0,117 W/(m·K). Dla wariantu K2M-4P-Ś wartości te wynosiły odpowiednio 0,157 W/(m·K) i 0,167 W/(m·K). Oznacza to spadek przewodności cieplnej o około 45-50% w porównaniu z analogicznymi układami naprzemiennymi. Tak wyraźna poprawa właściwości termoizolacyjnych wynika z obecności ciągłej warstwy materiału o niskiej przewodności cieplnej. Ciągła warstwa izolacyjna przerywa bezpośredni kontakt między warstwami geopolimeru, które przewodzą ciepło szybciej. Dzięki temu strumień ciepła musi przejść przez materiał o niskiej przewodności cieplnej, co zmniejsza całkowitą wartość współczynnika λ kompozytu [188,192]. Ważnym elementem analizy było porównanie dwóch próbek dla każdego wariantu. Różnice w wartościach λ, mieszczące się w zakresie 5-8%, mogą wynikać z niedoskonałości technologii wytwarzania, takich jak niejednorodności struktury czy różnice w zagęszczeniu materiału. Zależność ta jest typowa dla kompozytów warstwowych i wpływa na efektywną przewodność cieplną materiałów wielofazowych [205–207]. W układach naprzemiennych brak ciągłej warstwy izolacyjnej sprzyja powstawaniu mostków cieplnych wzdłuż warstw geopolimerowych, co ułatwia przepływ ciepła przez fazę o wyższej przewodności. W rezultacie efektywna przewodność cieplna pozostaje wysoka. W wariantach z izolacją centralną ciągłość fazy przewodzącej zostaje przerwana, co prowadzi do wyraźnego obniżenia wartości λ kompozytu. Uzyskane wartości λ dla tych wariantów są zbliżone do wartości podawanych dla lekkich materiałów izolacyjnych stosowanych w budownictwie. Są one także porównywalne z danymi dla kompozytów geopolimerowych modyfikowanych materiałami lignocelulozowymi. Wyniki te potwierdzają potencjał opracowanych kompozytów jako elementów przegród o podwyższonej efektywności termoizolacyjnej [192,201,208].

Dla podstawowych warstw kompozytu, czyli matrycy geopolimerowej i maty lniano-konopnej, wykonano badania właściwości termicznych materiałów jednorodnych na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku. Oznaczono współczynnik przewodności cieplnej λ, objętościową pojemność cieplną C_v oraz dyfuzyjność cieplną a. Parametry te pozwalają ocenić zdolność materiału do przewodzenia, magazynowania i rozprzestrzeniania ciepła. Wyniki opracowano z wykorzystaniem pełnej analizy statystycznej. Wyznaczono wartości średnie oraz odchylenia standardowe. Przeanalizowano także rozrzut wyników. Dane dla próbek geopolimerowych przedstawiono w tabelach 28 i 29. Wyniki dla

maty lniano-konopnej zestawiono w tabelach 30 i 31. Dodatkowo określono przedziały ufności, co pozwala ocenić wiarygodność parametrów i porównać je z danymi literaturowymi. W przypadku prętów kompozytowych stosowanych jako zbrojenie przyjęto wartość λ równą 0,35 W/(m·K) na podstawie danych z rozdziału 8.1.3. Dla płyty kompozytowej na bazie cementu, stosowanej jako element dystansujący, przyjęto wartość λ równą 0,042689 W/(m·K). Takie podejście pozwoliło uwzględnić właściwości cieplne wszystkich istotnych składników w dalszej analizie transportu ciepła w kompozytach warstwowych.

Tabela 28. *Uzyskane wartości parametrów cieplnych badanego geopolimeru.*

Parametry statystyczne	**Właściwości termiczne próbki**		
	λ [W/(m·K)]	C_v [MJ/(m^3·K)]	a [mm^2/s]
Kwartyl, *Q1*	0,9851	1,67	0,5895
Mediana, *M*	1,0362	1,69	0,6058
Kwartyl, *Q3*	1,0389	1,71	0,6110
Przedział międzykwartylowy, *IQR*	0,0539	0,04	0,0216
Górna wartość odstająca, *HO*	1,1198	1,77	0,6434
Dolna wartość odstająca, *LO*	0,9042	1,61	0,5571
Średnia wartość, $\bar{X}$	1,0225	1,69	0,6045
Odchylenie standardowe, *s*	0,0290	0,02	0,0127
Współczynnik zmienności, *CV* [%]	2,83	1,13	2,10
Górna wartość krytyczna, *UCV*	1,0369	1,70	0,6108
Niższa wartość krytyczna, *LCV*	1,0081	1,68	0,5982

Gdy odchylenie standardowe populacji X nie jest znane, rozkład średniej arytmetycznej wyznaczonej z próby $\bar{X}$ można z dobrą dokładnością opisać rozkładem t-Studenta. Dotyczy to sytuacji, w której analizowana zmienna losowa ma rozkład normalny N(μ, σ). W takim przypadku przedział ufności dla średniej wyznacza się z wykorzystaniem rozkładu t-Studenta zamiast rozkładu normalnego. Gęstość prawdopodobieństwa tego rozkładu opisuje równanie (24). W zapisie tym symbol Γ(x) oznacza funkcję gamma Eulera.

$$f(t,n) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\sqrt{n\pi}}\left(1+\frac{t^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}} \tag{24}$$

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń matematycznych otrzymuje się końcową postać zależności, którą przedstawiono w równaniu (25):

$$P\left(\bar{X} - t_{n-1;\,\alpha/2}\frac{s}{\sqrt{n}} \le \mu \le \bar{X} + t_{n-1;\,\alpha/2}\frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1-\alpha \tag{25}$$

W zapisie tym α oznacza przyjęty poziom istotności, natomiast 1 - α jest poziomem ufności wyznaczanego przedziału.

Na podstawie *n* wykonanych pomiarów wyznaczono średnią arytmetyczną $\overline{X}$ oraz odchylenie standardowe *s* z próby. Parametry te stanowiły podstawę dalszej analizy statystycznej. Następnie oszacowano przedziały, w których z określonym prawdopodobieństwem mieszczą się rzeczywiste wartości badanych parametrów cieplnych. Analiza dotyczyła współczynnika przewodności cieplnej λ, objętościowej pojemności cieplnej C_v oraz dyfuzyjności cieplnej *a*. Dla wszystkich wyników zastosowano ocenę niepewności opartą na rozkładzie t-Studenta. Takie podejście jest właściwe przy ograniczonej liczbie pomiarów i nieznanym odchyleniu standardowym populacji. Przy poziomie ufności równym 95% wyznaczono przedziały ufności dla analizowanych właściwości cieplnych. Można przyjąć z wysokim prawdopodobieństwem, że rzeczywiste wartości parametrów λ, C_v oraz *a* dla geopolimeru mieszczą się w zakresach podanych w tabeli 29.

Tabela 29. *Obliczone przedziały ufności zmierzonych właściwości cieplnych geopolimeru.*

Badana próbka	**Wyznaczone przedziały ufności**
Geopolimer	$P(1{,}0081 \leq \lambda \leq 1{,}0369) = 0{,}95$ $P(1{,}68 \leq C_v \leq 1{,}70) = 0{,}95$ $P(0{,}5982 \leq a \leq 0{,}6108) = 0{,}95$

Dane z tabel 28-29 wskazują na wysoką jednorodność i stabilność właściwości termicznych matrycy geopolimerowej. Potwierdzają to zarówno wartości średnie, jak i niskie współczynniki zmienności. Średni współczynnik przewodności cieplnej wynosi 1,0225 W/(m·K). Odchylenie standardowe dla λ jest równe 0,0290 W/(m·K). Współczynnik zmienności na poziomie 2,83% świadczy o dobrej powtarzalności pomiarów. Dla objętościowej pojemności cieplnej uzyskano współczynnik zmienności równy 1,13%. Dla dyfuzyjności cieplnej współczynnik zmienności wynosi 2,10%. Tak niskie wartości potwierdzają stabilne właściwości cieplne badanego materiału. Niewielka rozpiętość międzykwartylowa dla wszystkich parametrów wskazuje na mały rozrzut wyników. Dla λ wartość IQR wynosi 0,0539 W/(m·K). Dla C_v rozpiętość międzykwartylowa wynosi 0,04 MJ/(m³·K). Dla dyfuzyjności cieplnej IQR jest równy 0,0216 mm²/s. Zidentyfikowane

wartości skrajne mieszczą się w fizycznie uzasadnionym zakresie. Nie wskazują na niestabilność materiału. Wynikają z naturalnej zmienności mikrostruktury, która jest typowa dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych [1,3]. Wyznaczone przedziały ufności przy poziomie 95% są wąskie. Świadczy to o dużej wiarygodności uzyskanych wyników. Z prawdopodobieństwem 0,95 rzeczywiste wartości parametrów cieplnych geopolimeru mieszczą się w określonych zakresach. Dla współczynnika przewodności cieplnej jest to 1,0081-1,0369 W/(m·K). Dla objętościowej pojemności cieplnej zakres wynosi 1,68-1,70 MJ/(m³·K). Dla dyfuzyjności cieplnej przedział mieści się w granicach 0,5982-0,6108 mm²/s. Otrzymane wartości λ są zgodne z danymi literaturowymi dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych. W literaturze współczynnik ten najczęściej mieści się w zakresie 0,9-1,3 W/(m·K). Na jego wartość wpływa skład surowcowy, porowatość oraz stopień zagęszczenia mikrostruktury [2,209,210]. Wartości objętościowej pojemności cieplnej na poziomie 1,6-1,8 MJ/(m³·K) są zbliżone do danych podawanych dla innych geopolimerów. Podobnie dyfuzyjność cieplna w zakresie 0,55-0,65 mm²/s mieści się w typowych wartościach dla materiałów geopolimerowych. Parametry te są także porównywalne z wynikami uzyskiwanymi dla innych mineralnych materiałów wiążących [198,209]. Niewielki rozrzut parametrów cieplnych oraz wąskie przedziały ufności wskazują na dużą jednorodność matrycy geopolimerowej. Świadczy to także o prawidłowo dobranej technologii syntezy. Ma to istotne znaczenie przy interpretacji wyników badań kompozytów warstwowych. Stabilne właściwości termiczne warstwy geopolimerowej pozwalają wiązać zmiany efektywnej przewodności cieplnej przede wszystkim z obecnością materiału izolacyjnego. Umożliwia to również ocenę wpływu oporu kontaktowego na granicach warstw. Ogranicza to ryzyko, że obserwowane różnice wynikają ze zmienności samej matrycy. W podobny sposób wyznaczono parametry statystyczne właściwości termicznych maty lniano-konopnej, która pełni funkcję warstwy izolacyjnej w kompozytach. Analiza objęła współczynnik przewodności cieplnej λ, objętościową pojemność cieplną C_v oraz dyfuzyjność cieplną *a*. Wykorzystano serię pomiarów poddaną pełnej analizie statystycznej. Opracowanie tych danych jest ważne dla oceny całego układu warstwowego. Pozwala oddzielić wpływ właściwości samego materiału izolacyjnego od wpływu konfiguracji warstw na efektywne parametry cieplne kompozytu. Zestawienie wyników dla maty z danymi dla matrycy geopolimerowej umożliwia lepsze zrozumienie mechanizmów transportu ciepła w badanych układach. Ułatwia to także ocenę znaczenia oporu kontaktowego na granicach między warstwami.

Tabela 30. *Uzyskane wartości parametrów cieplnych badanej izolacji naturalnej.*

Parametry statystyczne	**Właściwości termiczne próbki**		
	λ [W/(m·K)]	C_v [MJ/(m^3·K)]	a [mm^2/s]
Kwartyl, *Q1*	0,0463	0,1325	0,3376
Mediana, *M*	0,0464	0,1341	0,3464
Kwartyl, *Q3*	0,0475	0,1405	0,3486
Przedział międzykwartylowy, *IQR*	0,0012	0,0081	0,,0110
Górna wartość odstająca, *HO*	0,0493	0,1526	0,3650
Dolna wartość odstająca, *LO*	0,0445	0,1204	0,3212
Średnia wartość, $\bar{X}$	0,0467	0,1357	0,3448
Odchylenie standardowe, *s*	0,0006	0,0036	0,0054
Współczynnik zmienności, *CV* [%]	1,20	2,65	1,57
Górna wartość krytyczna, *UCV*	0,0470	0,1375	0,3475
Niższa wartość krytyczna, *LCV*	0,0464	0,1339	0,3421

Tabela 31. *Obliczone przedziały ufności zmierzonych właściwości cieplnych izolacji naturalnej.*

Badana próbka	**Wyznaczone przedziały ufności**
Mata lniano-konopna	P (0,0464 ≤ λ ≤ 0,0470) = 0,95
	P (0,1339 ≤ C_v ≤ 0,1375) = 0,95
	P (0,3421 ≤ a ≤ 0,3475) = 0,95

Dane z tabel 30-31 wskazują na wysoką jednorodność właściwości termicznych maty lniano-konopnej. Potwierdzają to niskie wartości odchylenia standardowego oraz współczynników zmienności. Średni współczynnik przewodności cieplnej wynosi 0,0467 W/(m·K). Współczynnik zmienności dla λ jest równy 1,20%, co świadczy o dobrej powtarzalności pomiarów i stabilnej strukturze materiału przy zastosowanym sposobie przygotowania próbek. Dla objętościowej pojemności cieplnej współczynnik zmienności wynosi 2,65%. Dla dyfuzyjności cieplnej wartość CV jest równa 1,57%. Wyniki te potwierdzają stabilne właściwości cieplne materiału. Niewielkie wartości przedziału międzykwartylowego potwierdzają mały rozrzut danych i brak istotnych odchyleń pomiarowych. Przedziały ufności wyznaczone przy poziomie 95% są wąskie. Dla λ zakres wynosi 0,0464-0,0470 W/(m·K). Takie wartości są typowe dla naturalnych materiałów włóknistych o wysokiej porowatości. W tego typu materiałach transport ciepła zachodzi głównie przez przewodzenie w powietrzu wypełniającym pory oraz w strukturze włókien. Udział promieniowania w całkowitym bilansie cieplnym jest ograniczony [172,211,212].

Uzyskane wartości przewodności cieplnej są zgodne z danymi literaturowymi dla izolacji z włókien roślinnych, takich jak len, konopie czy słoma. Dla tych materiałów współczynnik λ najczęściej mieści się w zakresie 0,040-0,055 W/(m·K). Na jego wartość wpływa stopień sprasowania, wilgotność oraz orientacja włókien [213–215]. Wartości objętościowej pojemności cieplnej oraz dyfuzyjności cieplnej mieszczą się w zakresach podawanych dla lekkich materiałów bioizolacyjnych. Materiały te mogą w krótkim czasie akumulować ciepło. Jednocześnie ograniczają jego szybkie przenikanie przez przegrodę [189,214]. Analiza właściwości termicznych poszczególnych składników kompozytu pokazuje, że pręty kompozytowe oraz płyty cementowe typu botamentowego nie decydowały bezpośrednio o wartości efektywnej przewodności cieplnej całego układu. Ich rola była jednak istotna przy interpretacji mechanizmów transportu ciepła oraz zjawiska oporu kontaktowego. Pręty kompozytowe o przewodności cieplnej 0,35 W/(m·K) stanowiły lokalne obszary o wyższej przewodności. Ze względu na mały udział objętościowy nie tworzyły jednak ciągłych mostków cieplnych w skali całej próbki. Płyty kompozytowe na bazie cementu o przewodności 0,042689 W/(m·K) pełniły funkcję dystansującą i jednocześnie wpływały na warunki cieplne układu. Zapewniały stabilne rozdzielenie warstw izolacyjnych. Ograniczały niekontrolowane zagęszczanie maty lniano-konopnej. Stabilizowały również geometrię całego układu warstwowego. Dzięki temu możliwa była bardziej jednoznaczna ocena zjawiska paradoksu oporu kontaktowego na granicach geopolimer-izolacja. W badaniach GHP 900 obecność dodatkowych granic między warstwami prowadziła do obniżenia efektywnej przewodności cieplnej kompozytu, mimo zwiększenia liczby interfejsów. Wyniki potwierdzają, że w kompozytach warstwowych kluczowe znaczenie ma zarówno opór cieplny na granicach między warstwami, jak i obecność ciągłej warstwy izolacyjnej o bardzo niskiej przewodności cieplnej. Taki mechanizm ograniczania przepływu ciepła jest zgodny z klasycznymi modelami przewodzenia w materiałach wielofazowych oraz z danymi podawanymi w literaturze dotyczącej barier termicznych na granicach faz [205–207].

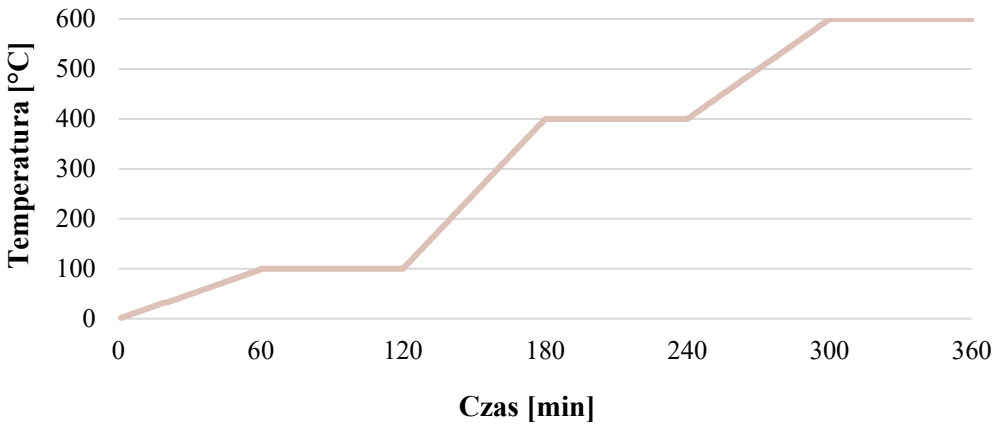
8.3.4. Badania zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach

Na rysunku 31 pokazano stanowisko do badań materiałów w podwyższonych temperaturach. Układ ten służy do oceny stabilności termicznej oraz zmian właściwości fizycznych i strukturalnych próbek. Stanowisko umożliwia kontrolowane nagrzewanie w zadanym zakresie temperatur. W trakcie badań monitorowana jest temperatura, czas oddziaływania oraz warunki otoczenia. Taka konfiguracja pozwala prowadzić eksperymenty

w sposób powtarzalny. Zapewnia to porównywalność uzyskanych wyników. Na rysunku 32 przedstawiono profil temperaturowy zastosowany w badaniach. Profil określa przebieg temperatury w funkcji czasu. Profil ten składa się z etapu stopniowego nagrzewania oraz okresów utrzymywania stałej temperatury. Przerwy te umożliwiają wyrównanie temperatury w całej objętości próbki. W pierwszym etapie próbki ogrzewano do około 100°C. Temperaturę tę utrzymywano przez określony czas w celu usunięcia wilgoci i wstępnej stabilizacji materiału. Następnie prowadzono nagrzewanie do 400°C oraz 600°C. Na każdym z tych poziomów utrzymywano stałą temperaturę przez określony czas. Pozwalało to obserwować zmiany zachodzące w strukturze materiału pod wpływem wysokiej temperatury. Przyjęty profil umożliwia analizę zarówno efektów związanych z samym nagrzewaniem, jak i skutków dłuższego oddziaływania temperatury. Ma to znaczenie przy ocenie zachowania materiału w warunkach podwyższonej temperatury.

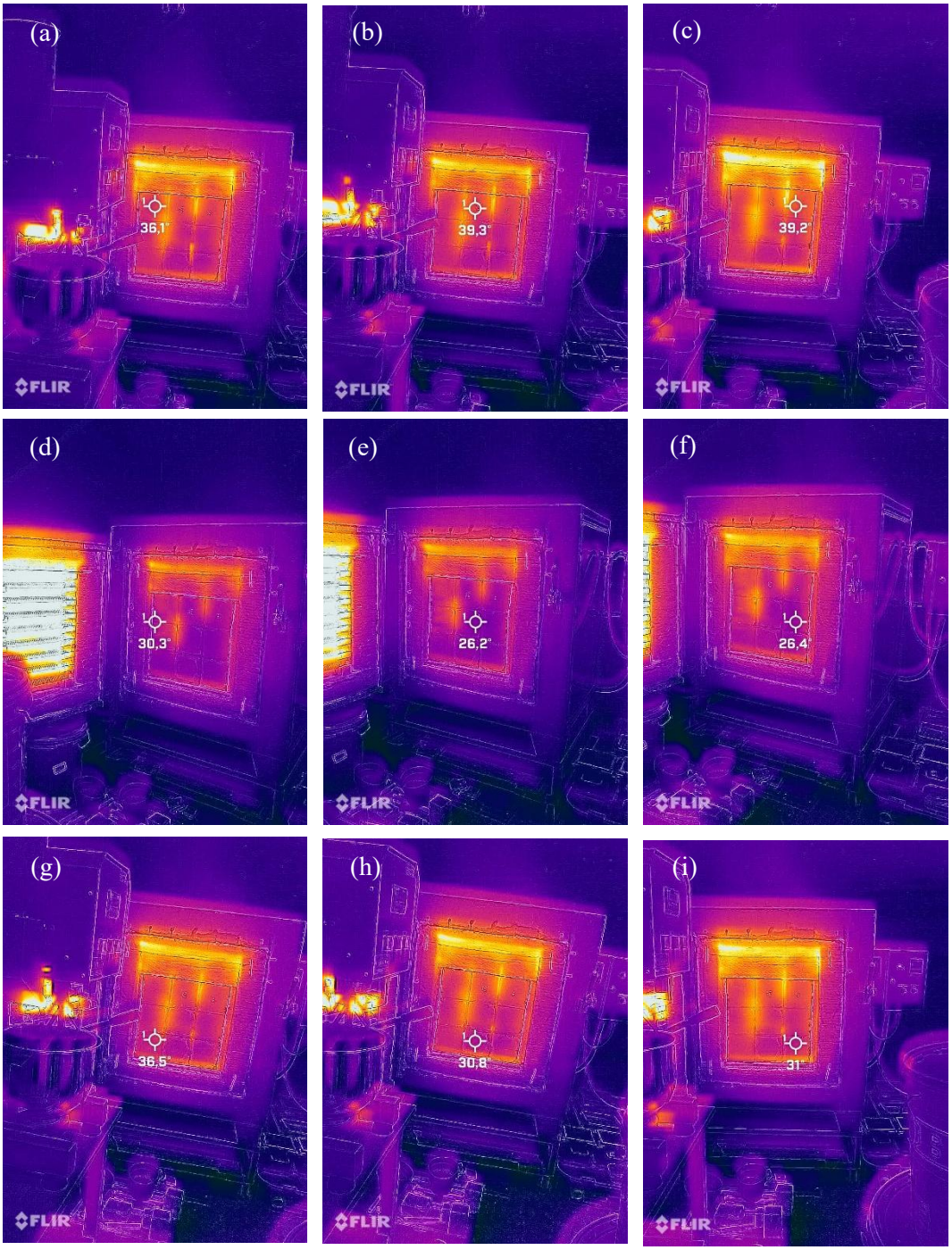


Rysunek 31. *Stanowisko badawcze do analizy zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach.*

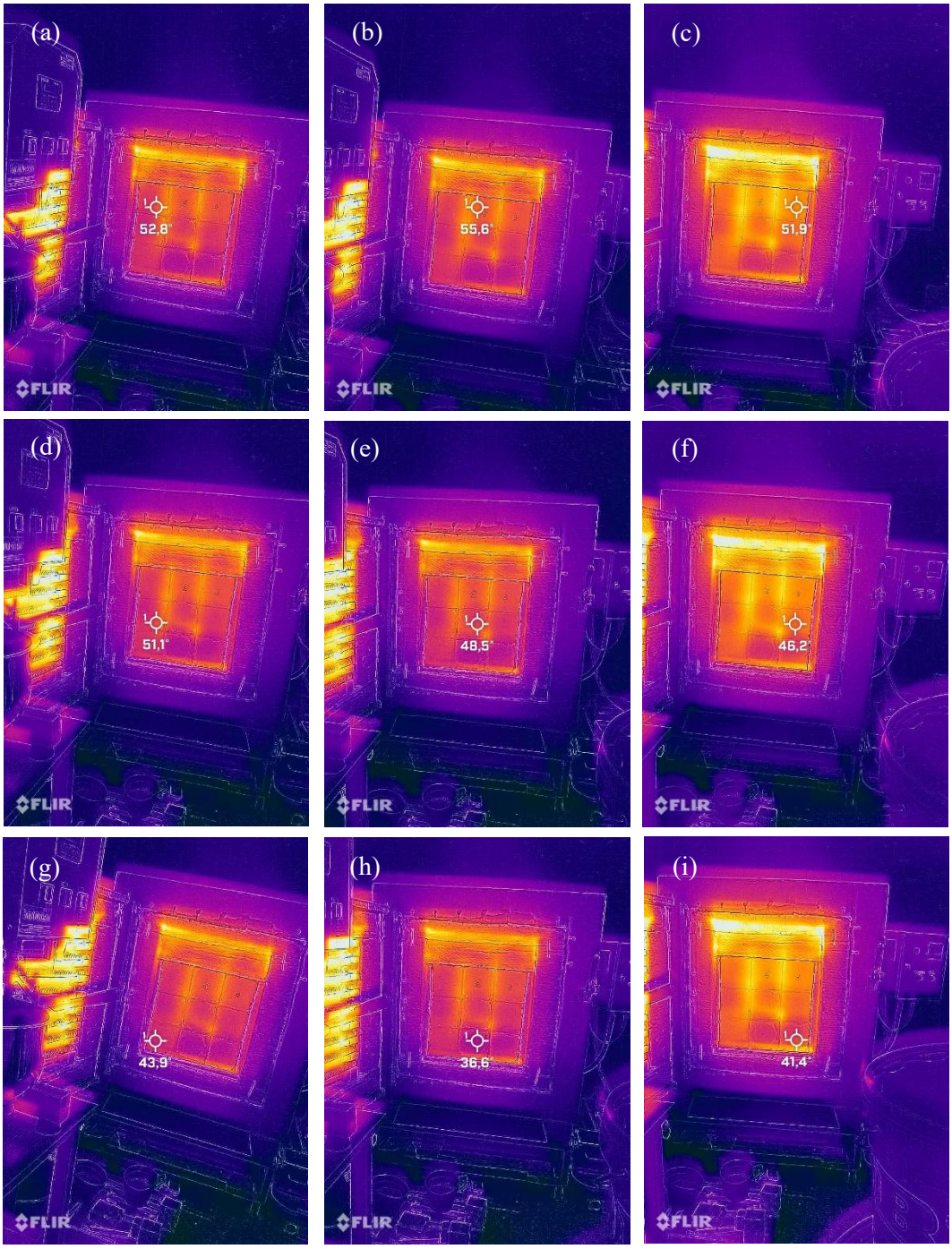


Rysunek 32. *Profil temperaturowy stosowany w badaniach zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach.*

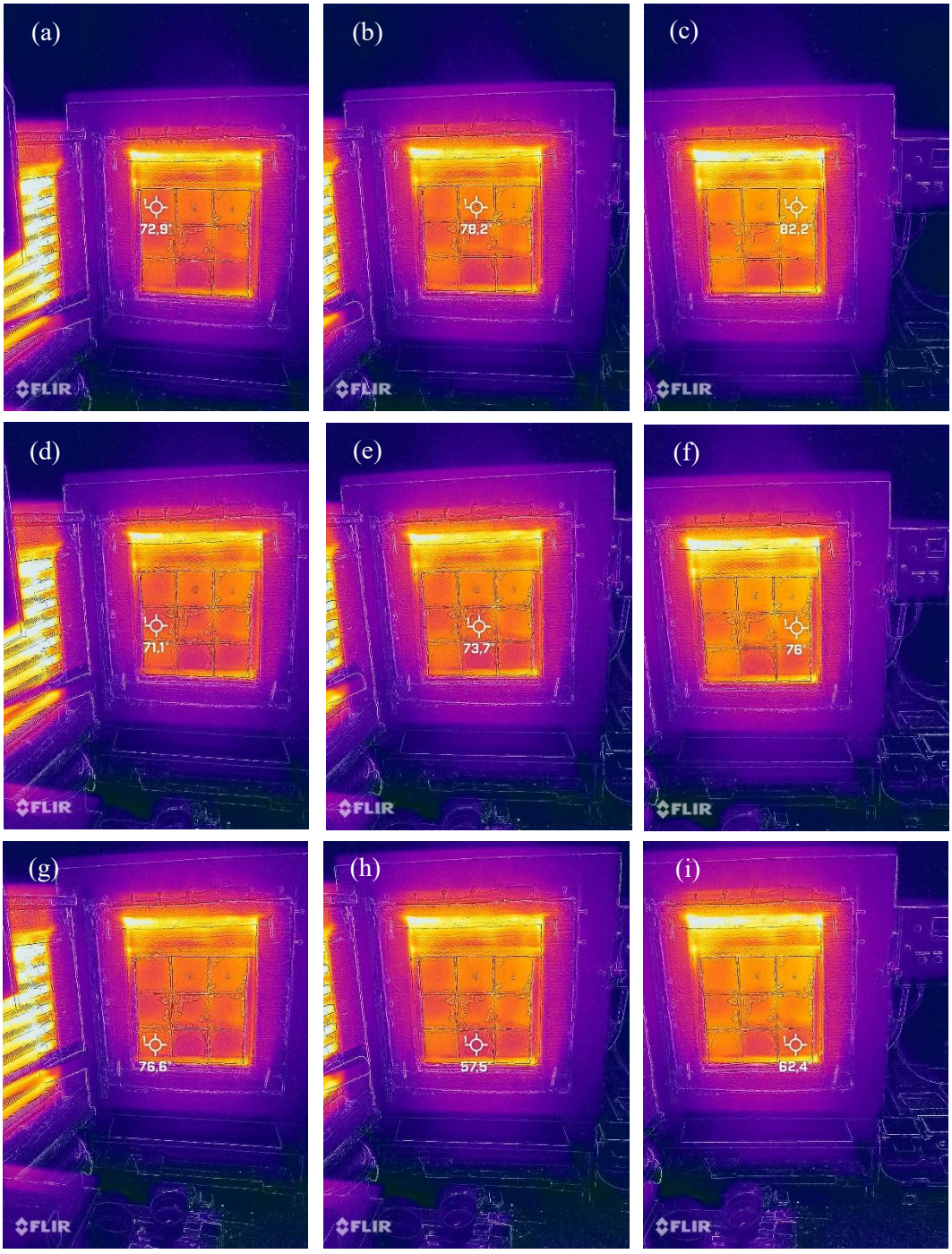
Na rysunkach 33-35 przedstawiono zachowanie opracowanych kompozytów geopolimerowych oraz próbki referencyjnej w temperaturach 100°C, 400°C i 600°C. Zestawienie obejmuje kompozyt referencyjny RKG oraz warianty warstwowe o układzie naprzemiennym. Poszczególne warianty różnią się liczbą warstw izolacyjnych oraz formą materiału izolacyjnego. Rysunek 33 pokazuje stan materiałów po oddziaływaniu temperatury 100°C. Rysunek 34 dotyczy temperatury 400°C. Rysunek 35 przedstawia próbki po nagrzewaniu do 600°C. Analiza trzech poziomów temperatury pozwala określić zakres stabilności termicznej kompozytów. Umożliwia także ocenę wpływu udziału i formy materiału izolacyjnego na przebieg degradacji cieplnej. Obserwacje te uzupełniają wyniki badań mechanicznych i cieplnych. Pozwalają również ocenić przydatność kompozytów w warunkach podwyższonej temperatury. Rozkład temperatury rejestrowano przy użyciu kamery termowizyjnej FLIR. Urządzenie to umożliwia bezkontaktowy pomiar temperatury powierzchni. Pomiary wykonywano osobno dla każdej próbki po osiągnięciu zadanej temperatury. Pozwoliło to ocenić jednorodność nagrzewania. Umożliwiło także identyfikację różnic temperaturowych wynikających ze struktury i składu kompozytów. Zastosowanie kamery termowizyjnej rozszerzyło analizę o ocenę zachowania materiału w podwyższonych temperaturach poszczególnych wariantów kompozytów.



Rysunek 33. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 100°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*



Rysunek 34. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 400°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*

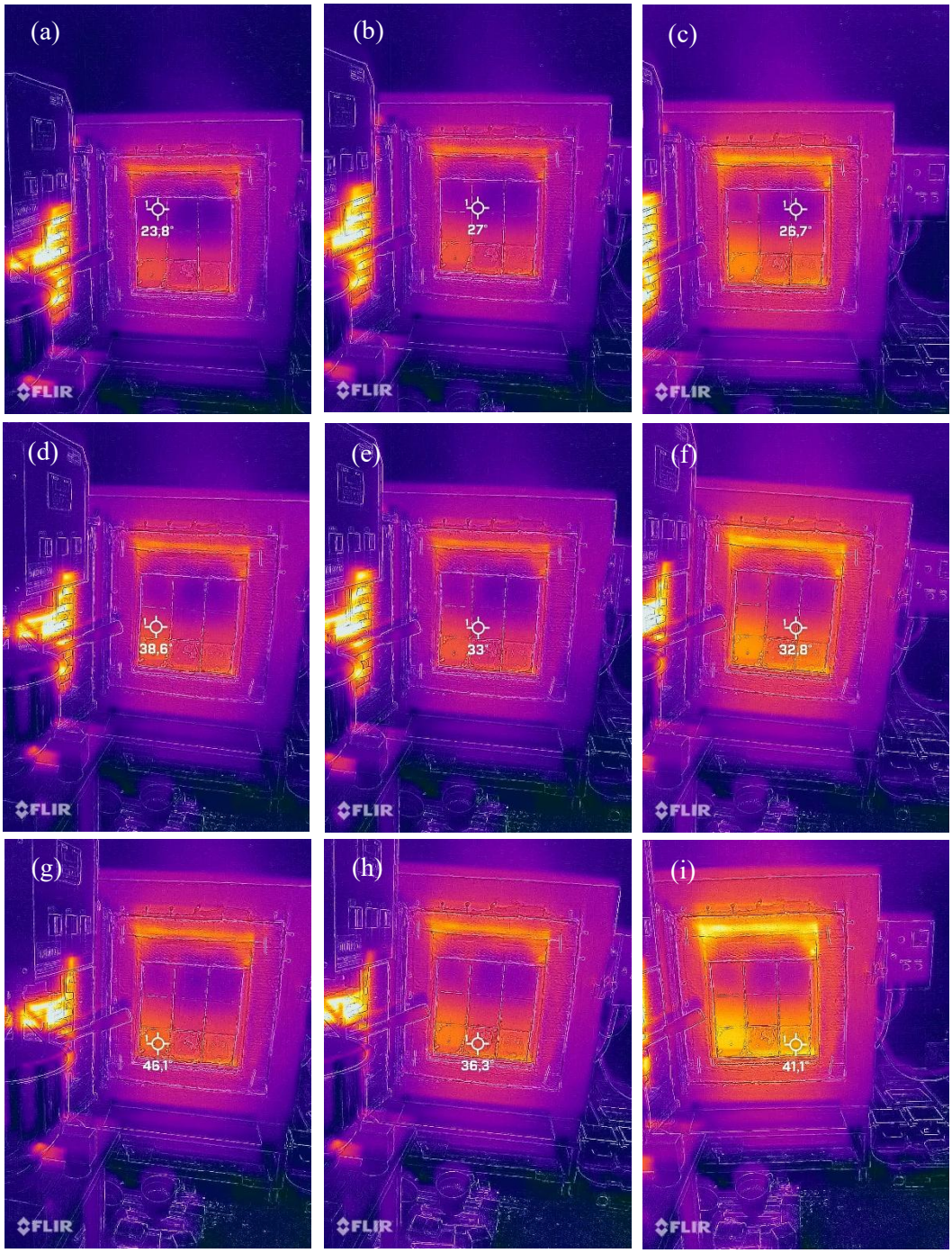


Rysunek 35. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 600°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*

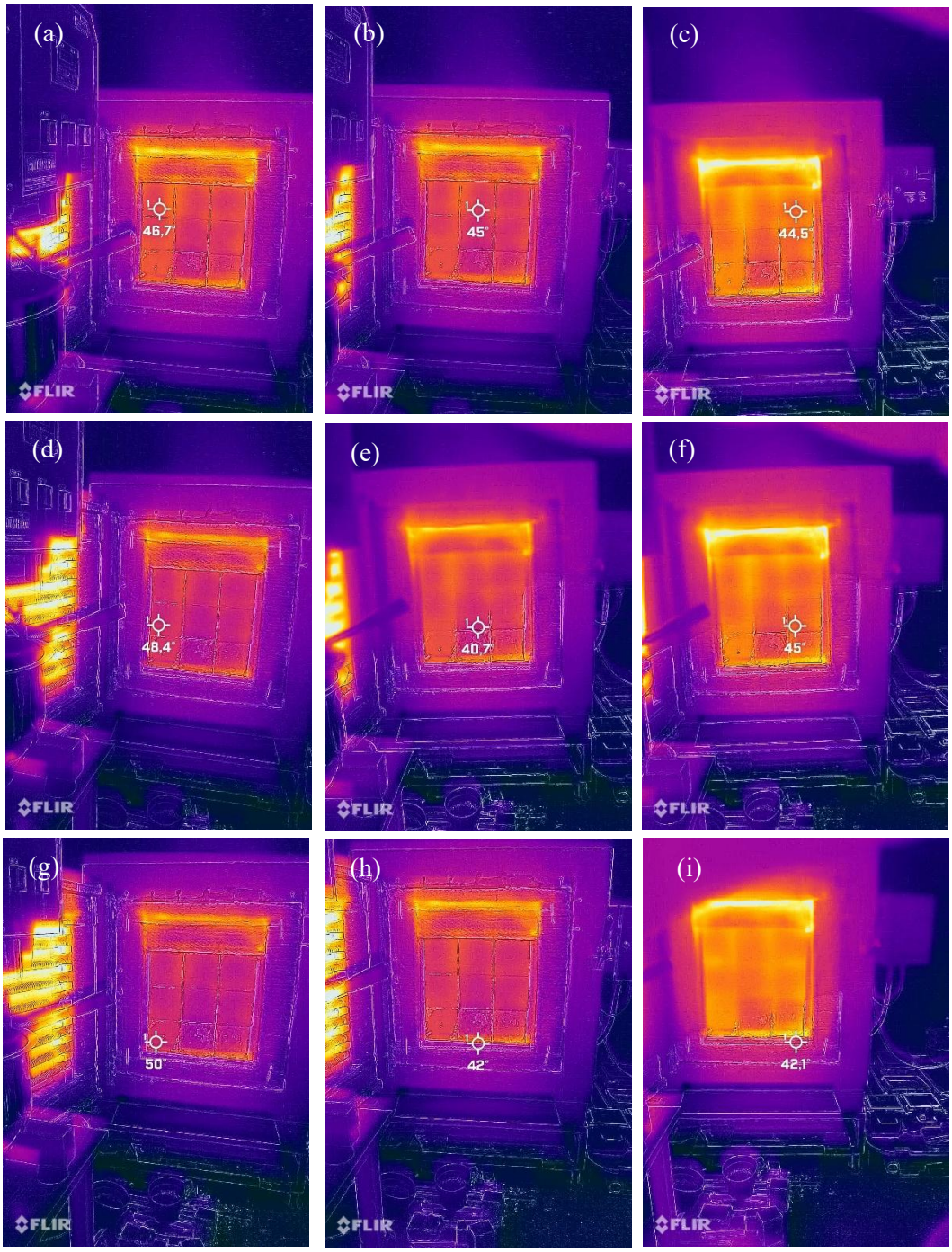
Wyniki pomiarów temperatury powierzchni próbek, pokazane na rysunkach 33-35, wskazują na wyraźne różnice w zachowaniu kompozytów w podwyższonych temperaturach. Różnice te zależą od liczby warstw izolacyjnych, formy materiału izolacyjnego oraz układu warstw. Przy oddziaływaniu temperatury 100°C temperatura powierzchni próbek mieściła się w zakresie od 26,2°C do 39,3°C. Najniższe wartości odnotowano dla wariantów z większą liczbą warstw izolacyjnych, takich jak K3MP-6P-R i K2M-4P-R. Najwyższe temperatury wystąpiły w próbkach z jedną warstwą izolacyjną, czyli K1M-2P-R i K1MP-2P-R. Wysoką temperaturę powierzchni odnotowano także dla próbki referencyjnej RKG. Wyniki te pokazują, że nawet przy stosunkowo niskiej temperaturze zewnętrznej udział warstwy izolacyjnej wyraźnie ogranicza przepływ ciepła. Taka zależność jest zgodna z obserwacjami opisanymi w literaturze dotyczącej materiałów warstwowych [172,212]. Przy temperaturze oddziaływania 400°C różnice między wariantami są wyraźniejsze. Najniższą temperaturę powierzchni zanotowano dla próbek K4M-8P-R oraz K4MP-8P-R. Najwyższe wartości wystąpiły w kompozytach z najmniejszą liczbą warstw izolacyjnych, takich jak K1M-2P-R i K2MP-4P-R. Wyniki te pokazują, że w wyższym zakresie temperatur decydujące znaczenie ma grubość i ciągłość warstwy izolacyjnej. Istotną rolę odgrywa także opór kontaktowy na granicy geopolimer-izolacja. Zjawiska te ograniczają intensywność transportu ciepła przez przegrodę [205–207]. Największe różnice odnotowano po nagrzewaniu do 600°C. Temperatura powierzchni próbek mieściła się w szerokim zakresie od 57,5°C do 82,2°C. Najniższe wartości uzyskano dla wariantów K4M-8P-R oraz K4MP-8P-R. Świadczy to o ich najwyższej skuteczności w ograniczaniu przepływu ciepła przy dużym obciążeniu termicznym. Najwyższą temperaturę powierzchni zanotowano dla próbki K1MP-2P-R. Oznacza to, że próbka ta wykazuje najmniejszą skuteczność w ograniczaniu przepływu ciepła w badanej grupie. Kompozyt referencyjny RKG osiągnął temperaturę zbliżoną do wariantów z małym udziałem izolacji. Potwierdza to kluczową rolę warstwy izolacyjnej w kształtowaniu zachowania cieplnego kompozytów. Obserwowane zależności są zgodne z danymi literaturowymi dla kompozytów geopolimerowych oraz materiałów warstwowych typu sandwich. W takich układach skuteczność izolacyjna rośnie wraz ze wzrostem grubości materiału izolacyjnego oraz liczbą granic między warstwami, które zwiększają całkowity opór cieplny [188,192,213]. Wyniki potwierdzają również wysoką odporność termiczną matrycy geopolimerowej. Nawet w temperaturze 600°C materiał zachowuje integralność strukturalną. Takie zachowanie jest opisywane w licznych badaniach dotyczących geopolimerów [2,3]. Na podstawie przeprowadzonej analizy do dalszych badań wybrano trzy warianty materiałowe: K1MP-2P-R, K4M-8P-R oraz K4MP-8P-R. Dobór ten pozwalał uwzględnić jeden wariant skrajny oraz dwa

warianty o najwyższej skuteczności termoizolacyjnej. Próbka K1MP-2P-R osiągała najwyższe temperatury powierzchni w całym zakresie badań. Została więc uznana za wariant o najsłabszej skuteczności izolacyjnej. Stanowi ona punkt odniesienia do oceny pozostałych rozwiązań. Próbki K4M-8P-R oraz K4MP-8P-R wykazywały najniższe temperatury powierzchni. Reprezentują one warianty o najwyższej skuteczności w ograniczaniu transportu ciepła. Taki wybór umożliwia jednoznaczną ocenę wpływu liczby warstw izolacyjnych oraz formy materiału izolacyjnego na reakcję kompozytów w warunkach wysokiej temperatury.

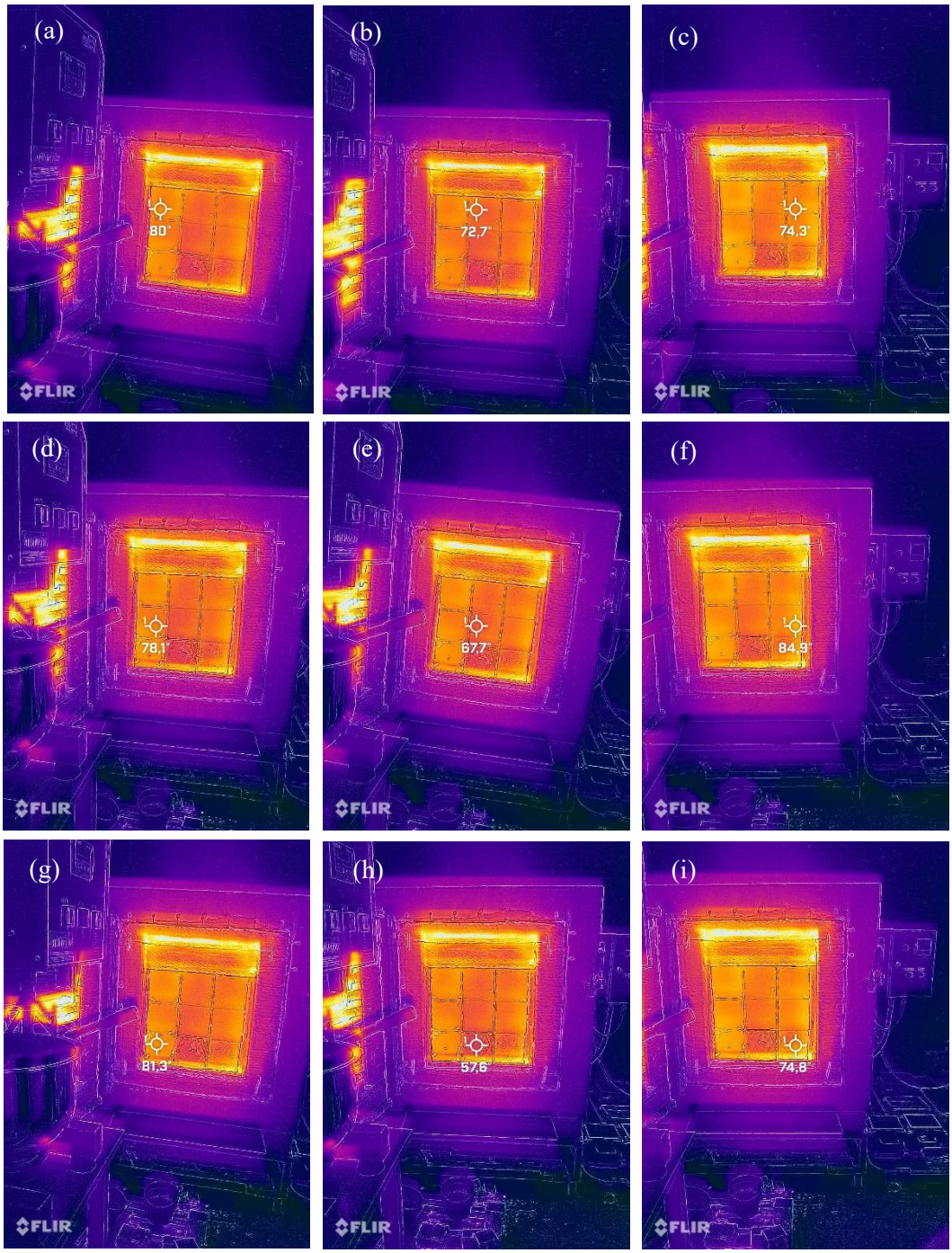
Na rysunkach 36-38 przedstawiono zachowanie wybranych kompozytów geopolimerowych w temperaturach 100°C, 400°C i 600°C. Zestawienie obejmuje warianty z izolacją skupioną w środkowej części próbki oraz wybrane układy naprzemienne stanowiące punkt odniesienia. Pozwala to bezpośrednio porównać wpływ rozmieszczenia warstw na zachowanie materiałów w podwyższonych temperaturach. Rysunek 36 pokazuje próbki po nagrzewaniu do 100°C. Rysunek 37 dotyczy temperatury 400°C. Rysunek 38 przedstawia stan materiałów po nagrzewaniu do temperatury 600°C. Analiza tych wyników wskazuje, że sposób rozmieszczenia materiału izolacyjnego ma wyraźny wpływ na zachowanie kompozytu. Różnice te są szczególnie widoczne w wyższym zakresie temperatur. Podkreślają one znaczenie geometrii układu warstwowego dla efektywności termoizolacyjnej kompozytów.



Rysunek 36. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 100°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*



Rysunek 37. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 400°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*

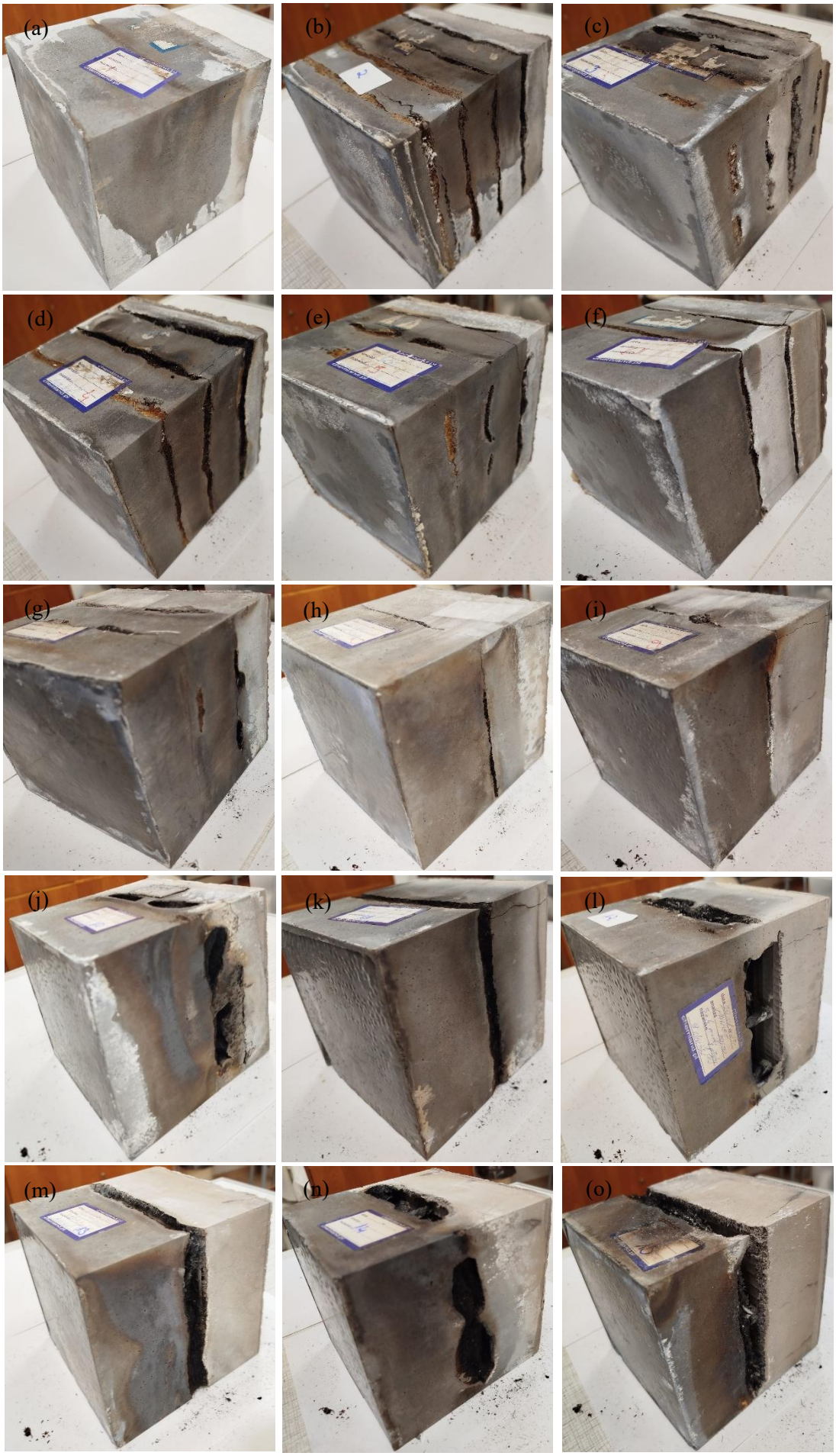


Rysunek 38. *Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 600°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R.*

Dane z rysunków 36-38 pokazują, że zachowanie kompozytów w podywższonych temperaturach zależy od układu warstw, liczby warstw izolacyjnych oraz formy materiału izolacyjnego. Analizę przeprowadzono dla temperatur 100°C, 400°C i 600°C. Uwzględniono warianty z izolacją w części centralnej oraz wybrane układy naprzemienne. Część próbek oznaczonych jako g), h), i) zbadano ponownie w celu potwierdzenia wcześniejszych wyników. Przy temperaturze 100°C temperatura powierzchni próbek mieściła się w zakresie od 23,8°C do 46,1°C. Najniższe wartości uzyskano dla wariantów z izolacją centralną i większą liczbą warstw izolacyjnych, takich jak K3M-2P-Ś. Najwyższe temperatury odnotowano w próbkach z małym udziałem izolacji lub w układzie naprzemiennym, takich jak K1MP-2P-R. Wyniki te pokazują, że nawet przy umiarkowanym obciążeniu cieplnym sposób rozmieszczenia izolacji wpływa na ograniczanie przepływu ciepła. Zależność ta jest zgodna z obserwacjami dla materiałów warstwowych typu sandwich [188,192]. Przy temperaturze 400°C różnice między wariantami częściowo się zmniejszają. Temperatura powierzchni próbek mieści się w zakresie 40,7-50,0°C. W tym przedziale zaczynają mieć znaczenie procesy związane z degradacją składników organicznych. Istotne są także różnice w przewodności cieplnej poszczególnych warstw. Warianty z izolacją centralną nadal wykazują zróżnicowane zachowanie. Próbki o układzie naprzemiennym osiągają natomiast zbliżone temperatury powierzchni. Może to wskazywać na częściowe wyrównanie efektów izolacyjnych. Zależność tą można wiązać ze zmianami mikrostruktury materiału izolacyjnego pod wpływem wysokiej temperatury [172,189,212]. Największe różnice pojawiają się po nagrzewaniu do 600°C. Temperatura powierzchni próbek mieści się wtedy w zakresie od 57,6°C do 84,9°C. W tym etapie widoczne są skutki zaawansowanej degradacji materiałów lignocelulozowych. Jednocześnie matryca geopolimerowa zachowuje swoją integralność. Część wariantów z izolacją centralną osiąga temperatury zbliżone do próbek odniesienia lub nawet wyższe. Oznacza to, że przy bardzo wysokiej temperaturze większe znaczenie ma stabilność termiczna poszczególnych faz niż sama geometria układu warstw. Taką zależność opisano w literaturze dotyczącej geopolimerów i kompozytów z dodatkami organicznymi. Wskazuje się tam, że powyżej 500-600°C dochodzi do wyraźnej degradacji fazy lignocelulozowej [3,200,210]. Ważnym elementem analizy jest to, że próbki g), h) oraz i) zbadano ponownie. Uzyskane temperatury powierzchni były zbliżone do wcześniejszych wyników. Potwierdza to powtarzalność obserwowanych trendów. Wskazuje także na stabilność metodyki opartej na pomiarach termowizyjnych. Ponowne badanie tych samych wariantów pozwoliło ocenić wpływ wcześniejszego nagrzewania na dalsze zachowanie materiału. Ma to znaczenie przy analizie odporności na wielokrotne oddziaływanie wysokiej temperatury. Otrzymane wyniki są

zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi kompozytów geopolimerowych i materiałów warstwowych. W niskich i umiarkowanych temperaturach skuteczność izolacyjna zależy głównie od geometrii układu warstw. W wysokich temperaturach większe znaczenie ma odporność termiczna poszczególnych składników oraz degradacja faz organicznych [2,3,188].

Na rysunku 39 pokazano makrofotografie kompozytów po działaniu wysokiej temperatury. Zdjęcia przedstawiają zmiany w makrostrukturze materiału po intensywnym nagrzewaniu. Obserwacje wizualne pozwalają ocenić stopień degradacji poszczególnych składników. Dotyczy to przede wszystkim warstw izolacyjnych wykonanych z materiałów lignocelulozowych. Umożliwia to także ocenę ciągłości i stabilności matrycy geopolimerowej. W kompozytach z matą lniano-konopną widoczne są ślady degradacji termicznej składników organicznych. Objawia się to zmianą barwy oraz częściową utratą struktury włóknistej. Zjawiska te nasilają się w zakresie 400-600°C. W tym przedziale dochodzi do rozkładu fazy organicznej i powstawania zwęglonej pozostałości. Matryca geopolimerowa zachowuje natomiast wysoką stabilność termiczną. Obserwowane pęknięcia i zmiany powierzchni są skutkiem oddziaływania wysokiej temperatury. Wynikają głównie z różnic w rozszerzalności cieplnej fazy mineralnej i organicznej. Zaobserwowane procesy wypalania i zwęglenia są zgodne z opisami w literaturze dotyczącej kompozytów geopolimerowych z dodatkiem włókien naturalnych [3,200].



Rysunek 39. *Makrofotografie kompozytów po działaniu wysokich temperatur: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś.*

W tabeli 32 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów po działaniu wysokiej temperatury. Dane te pozwalają ocenić wpływ obciążenia termicznego na właściwości mechaniczne materiałów. Zestawienie umożliwia analizę zmian wytrzymałości w zależności od temperatury. Pozwala także porównać stopień degradacji mechanicznej poszczególnych wariantów. Badania próbek po oddziaływaniu wysokiej temperatury umożliwiają określenie zakresu stabilności mechanicznej materiałów. Pozwalają również ocenić wpływ procesów termicznych na zdolność przenoszenia obciążeń ściskających. Wyniki z tabeli 32 uzupełniają dane uzyskane w temperaturze pokojowej. Umożliwia to pełniejszą ocenę odporności kompozytów na jednoczesne działanie obciążeń mechanicznych i wysokiej temperatury. Ma to znaczenie przy rozważaniu ich zastosowania w przegrodach budowlanych oraz elementach konstrukcyjnych narażonych na podwyższoną temperaturę.

Tabela 32. *Charakterystyka wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów po oddziaływaniu wysokich temperatur.*

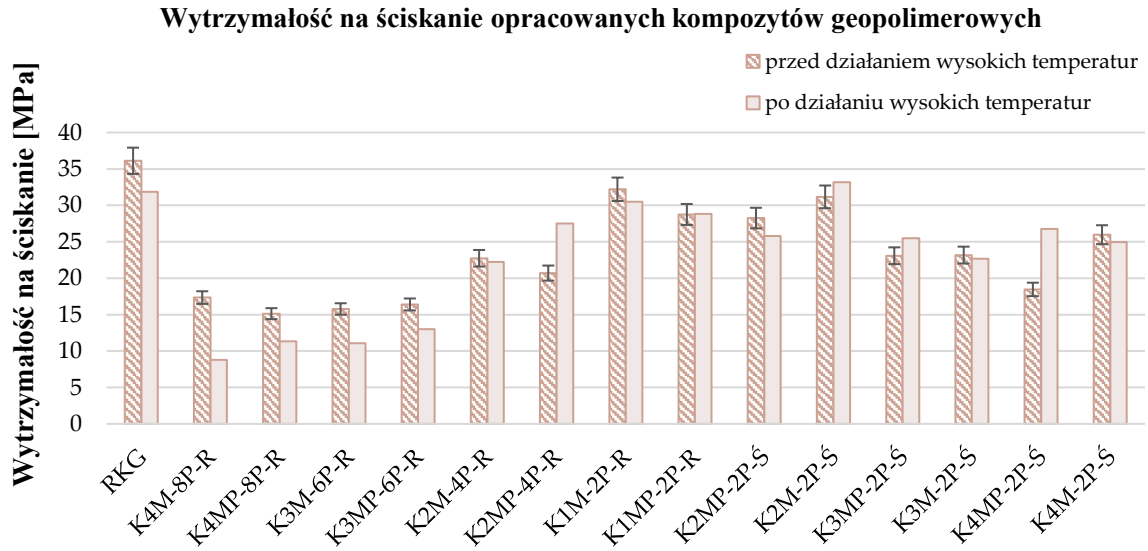
Badana próbka	**Siła [kN]**	**R_c [MPa]**
RKG	716,953	31,865
K4M-8P-R	198,095	8,804
K4MP-8P-R	254,980	11,332
K3M-6P-R	248,691	11,053
K3MP-6P-R	292,855	13,016
K2M-4P-R	500,101	22,227
K2MP-4P-R	619,225	27,521
K1M-2P-R	686,696	30,520
K1MP-2P-R	648,479	28,821
K2MP-2P-Ś	580,097	25,782
K2M-2P-Ś	746,568	33,181
K3MP-2P-Ś	573,079	25,470
K3M-2P-Ś	509,842	22,660
K4MP-2P-Ś	602,520	26,779
K4M-2P-Ś	561,621	24,961

Dane z tabeli 32 pokazują, że wysoka temperatura wyraźnie wpływa na wytrzymałość na ściskanie kompozytów. Skala spadku wytrzymałości zależy od układu warstw oraz udziału materiału izolacyjnego. Kompozyt referencyjny RKG po nagrzewaniu zachował stosunkowo wysoką wytrzymałość na ściskanie. Osiągnięta wartość wynosi 31,9 MPa. Potwierdza to

wysoką odporność termiczną samej matrycy geopolimerowej. Wynik ten jest zgodny z danymi literaturowymi. Wskazuje się w nich, że geopolimery na bazie popiołów lotnych utrzymują dobrą stabilność mechaniczną nawet po oddziaływaniu temperatur rzędu 600°C [1–3]. W kompozytach o układzie naprzemiennym obserwuje się wyraźny spadek wytrzymałości wraz ze wzrostem liczby warstw izolacyjnych. Najniższe wartości R_c uzyskano dla wariantów z czterema warstwami filcu lniano-konopnego. Dla K4M-8P-R wytrzymałość wyniosła 8,8 MPa. Dla K4MP-8P-R wartość ta była nieco wyższa i wyniosła 11,3 MPa. Wyniki te wskazują na znaczną degradację mechaniczną po nagrzewaniu. Spadek wytrzymałości wiąże się z rozkładem fazy organicznej. Istotne znaczenie ma także utrata ciągłości struktury oraz osłabienie stref między warstwami. Podobne zjawiska opisano w literaturze dotyczącej kompozytów mineralno-organicznych. Wskazuje się w niej, że obecność włókien naturalnych obniża odporność mechaniczną materiału po ekspozycji na wysoką temperaturę [195,200,201]. Zmniejszenie liczby warstw izolacyjnych w układzie naprzemiennym poprawia wytrzymałość na ściskanie po wygrzewaniu. Wariant K2M-4P-R osiągnął wytrzymałość 22,2 MPa. Wariant K2MP-4P-R uzyskał 27,5 MPa. Kompozyty z jedną warstwą izolacyjną, czyli K1M-2P-R i K1MP-2P-R, wykazały wytrzymałość zbliżoną do próbki referencyjnej. Oznacza to, że mniejszy udział fazy organicznej sprzyja zachowaniu nośności po obciążeniu termicznym. Taką zależność opisano również w badaniach geopolimerów z dodatkiem włókien naturalnych [195,203]. W porównaniu z układami naprzemiennymi lepsze wyniki uzyskały kompozyty z izolacją umieszczoną w części centralnej. W większości przypadków osiągają one wyższą wytrzymałość na ściskanie po wygrzewaniu. Szczególnie korzystny wynik uzyskano dla próbki K2M-2P-Ś. Wartość R_c wyniosła 33,2 MPa. Jest to wynik nieco wyższy niż dla kompozytu referencyjnego. Oznacza to, że zewnętrzne warstwy geopolimerowe skutecznie chronią część nośną. Świadczy to także o korzystnym rozkładzie naprężeń po degradacji materiału izolacyjnego. Takie zachowanie jest typowe dla materiałów warstwowych typu sandwich. W tego typu układach ciągłe warstwy okładzinowe przejmują główną część obciążeń mechanicznych [188,192]. Pozostałe warianty z izolacją centralną osiągają wytrzymałość R_c w zakresie 22.7-26.8 MPa. Oznacza to, że nawet po częściowej degradacji materiału izolacyjnego układ warstwowy zachowuje dobrą stabilność mechaniczną. Wartości te są wyższe niż w analogicznych kompozytach o układzie naprzemiennym z większym udziałem izolacji. Wyniki potwierdzają znaczenie geometrii warstw oraz ciągłości warstw nośnych. Podobne zależności opisano w literaturze dotyczącej kompozytów geopolimerowych i cementowych poddawanych działaniu wysokiej temperatury [2,192,199]. Uzyskane wyniki pokazują, że wysoka temperatura powoduje wyraźny spadek wytrzymałości w kompozytach

z dużym udziałem materiału organicznego. Skala degradacji zależy jednak od układu warstw. Odpowiednie rozmieszczenie warstw pozwala ograniczyć spadek wytrzymałości na ściskanie. Obserwowane zależności są zgodne z aktualnymi danymi podawanymi w literaturze.

Na rysunku 40 pokazano porównanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów przed i po nagrzewaniu. Zestawienie to pozwala bezpośrednio ocenić wpływ wysokiej temperatury na ich wytrzymałość na ściskanie. Porównanie wartości przed i po oddziaływaniu wysokiej temperatury umożliwia określenie skali degradacji w poszczególnych wariantach. Pozwala także ocenić odporność materiałów na jednoczesne działanie obciążeń mechanicznych i cieplnych. Takie ujęcie ułatwia porównanie skuteczności poszczególnych rozwiązań. Stanowi ono podstawę do sformułowania wniosków dotyczących odporności kompozytów na działanie wysokiej temperatury.



Rysunek 40. *Porównanie wytrzymałości na ściskanie przed i po oddziaływaniu wysokich temperatur.*

Dane z rysunku 40 pokazują zmiany wytrzymałości na ściskanie po działaniu wysokiej temperatury. Zestawienie umożliwia bezpośrednie porównanie wyników przed i po wygrzewaniu. Różnice między wariantami wskazują, że wpływ temperatury zależy od układu warstw oraz udziału materiału izolacyjnego. Kompozyt referencyjny RKG wykazuje umiarkowany spadek wytrzymałości. Mimo to zachowuje wartości R_c powyżej 30 MPa. Potwierdza to wysoką odporność termiczną matrycy geopolimerowej. Taki poziom zachowania nośności jest zgodny z danymi literaturowymi. W literaturze podaje się, że geopolimery na bazie popiołów lotnych zachowują znaczną część wytrzymałości nawet po nagrzewaniu do około 600°C [1–3]. W kompozytach o układzie naprzemiennym obserwuje się wyraźny

spadek wytrzymałości po nagrzewaniu. Skala degradacji rośnie wraz z liczbą warstw izolacyjnych. Największe różnice między wartościami R_c przed i po wygrzewaniu występują w wariantach z trzema i czterema warstwami filcu lniano-konopnego. Zależność ta wiąże się z rozkładem fazy organicznej pod wpływem temperatury. Istotna jest także utrata ciągłości warstwy izolacyjnej oraz osłabienie połączeń między warstwami. Podobne zależności opisano w literaturze dotyczącej kompozytów mineralno-organicznych oraz geopolimerów z dodatkiem włókien naturalnych [195,200,201]. Znacznie lepsze zachowanie po nagrzewaniu wykazują kompozyty z izolacją umieszczoną w części centralnej. W tych wariantach spadek wytrzymałości na ściskanie jest mniejszy. W niektórych przypadkach wartości R_c po wygrzewaniu są zbliżone do wyników z temperatury pokojowej. Oznacza to, że zewnętrzne warstwy geopolimerowe skutecznie pełnią funkcję nośną. Przejmują one główną część obciążeń nawet po degradacji materiału izolacyjnego. Taki mechanizm jest typowy dla materiałów warstwowych typu sandwich. Został on szeroko opisany w literaturze [188,192,210]. Porównanie wyników przed i po nagrzewaniu pokazuje, że odpowiednia geometria układu warstw może wyraźnie ograniczyć spadek wytrzymałości na ściskanie. Dzieje się tak nawet w obecności materiałów organicznych podatnych na degradację cieplną. Oznacza to, że znaczenie ma nie tylko skład kompozytu. Istotne jest także rozmieszczenie poszczególnych warstw w jego strukturze. Wnioski te są zgodne z aktualnymi danymi przedstawianymi w literaturze [2,188,199].

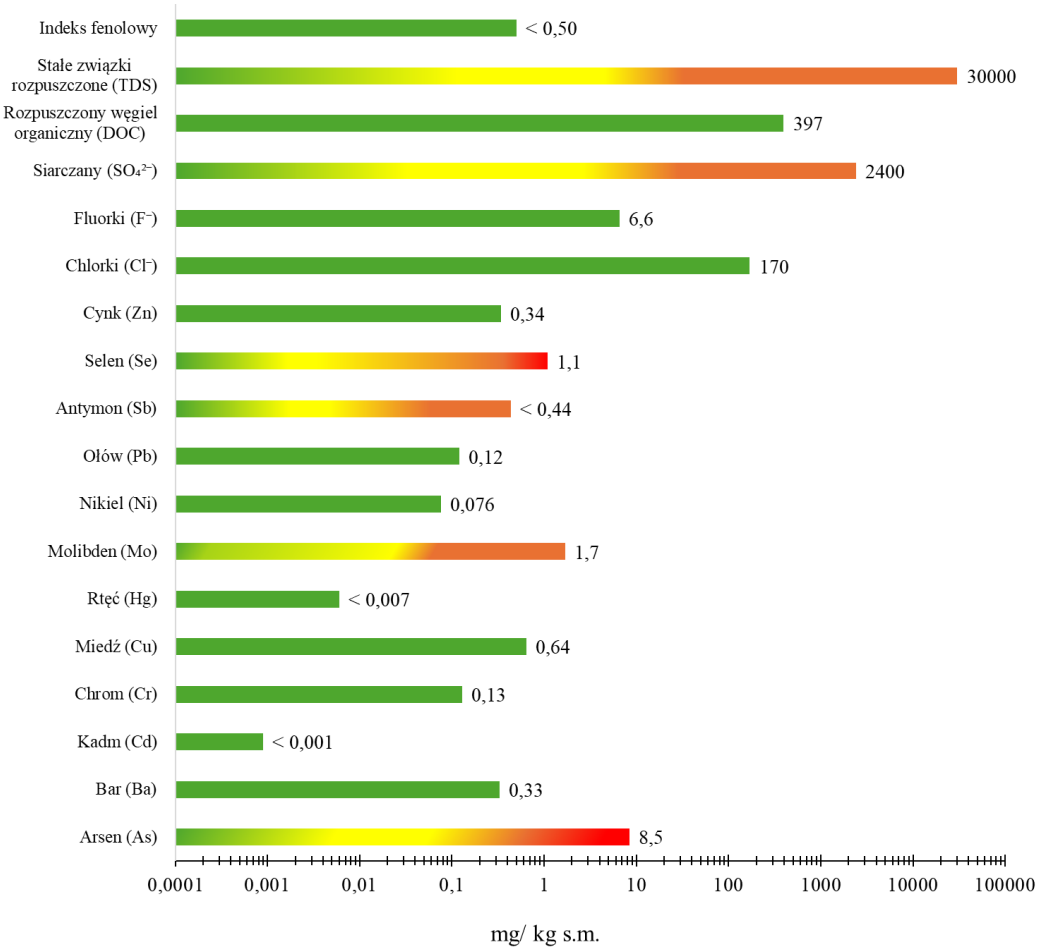
Na rysunku 41 pokazano makrofotografie kompozytów po jednoczesnym działaniu wysokiej temperatury i ściskania. Zestawienie obejmuje próbkę referencyjną RKG oraz wszystkie warianty układów naprzemiennych i z izolacją centralną. Analiza zdjęć wskazuje, że sposób zniszczenia zależy od geometrii układu warstw. W próbce referencyjnej widoczny jest typowy mechanizm kruchego zniszczenia o charakterze ścinającym. Kompozyty o układzie naprzemiennym wykazują bardziej złożony przebieg pękania. Obserwuje się rozwarstwienia na granicy geopolimer-izolacja oraz lokalne odspojenia warstw. Nasilenie tych zjawisk zwiększa się wraz ze wzrostem liczby warstw izolacyjnych. Warianty z izolacją w części centralnej ulegają zniszczeniu w inny sposób. Dochodzi głównie do pękania zewnętrznych warstw geopolimerowych oraz zgniatania materiału izolacyjnego. Taki mechanizm jest typowy dla układów typu sandwich. Sprzyja on zachowaniu częściowej integralności próbki po obciążeniu termiczno-mechanicznym. Obserwowane formy zniszczenia są zgodne z opisami w literaturze dotyczącej kompozytów geopolimerowych i materiałów warstwowych poddawanych wysokiej temperaturze i obciążeniom mechanicznym [3,192,200].



Rysunek 41. *Makrofotografie kompozytów po działaniu temperatury i ściskaniu:a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś.*

8.3.5. Wymywalność i promieniotwórczość w materiale geopolimerowym

Na rysunku 42 przedstawiono wyniki badań wymywalności metali ciężkich oraz wybranych zanieczyszczeń z materiału geopolimerowego. Dane pokazują skład chemiczny roztworu uzyskanego podczas testu wymywalności. Pozwalają ocenić zachowanie pierwiastków potencjalnie niebezpiecznych pochodzących z surowców odpadowych użytych do syntezy. Zestawienie umożliwia porównanie poziomu wymywalności poszczególnych metali i innych zanieczyszczeń. Stanowi także podstawę do analizy wpływu struktury i składu matrycy geopolimerowej na migrację składników w kontakcie z cieczą.

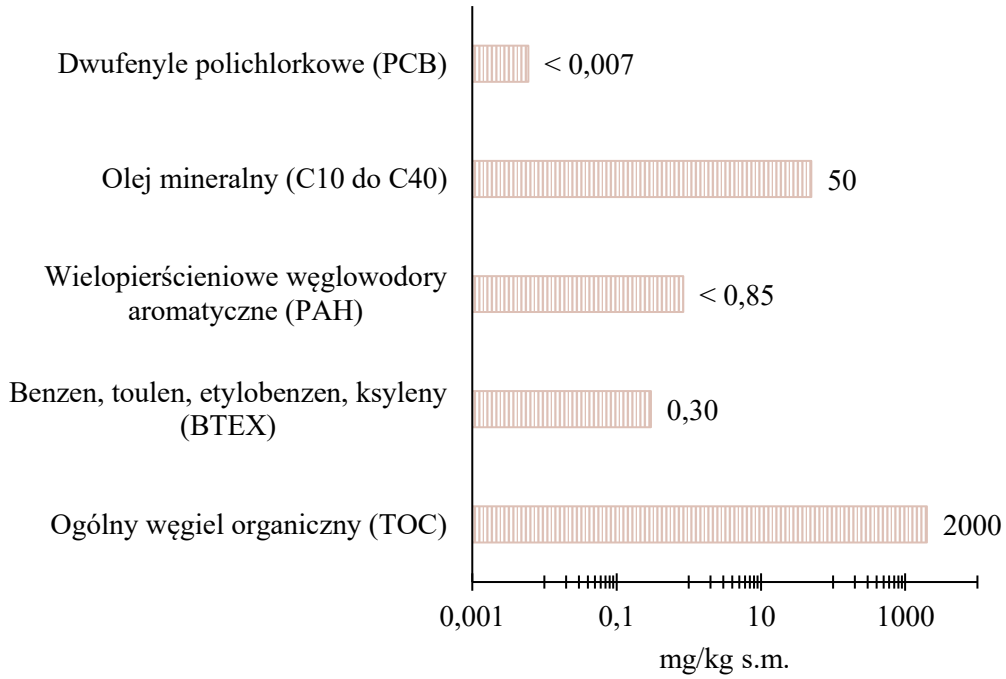


Rysunek 42. *Wymywalność metali ciężkich i zanieczyszczeń w materiale geopolimerowym.*

Dane z rysunku 42 pokazują poziomy wymywalności metali ciężkich oraz wybranych wskaźników zanieczyszczeń w przeliczeniu na suchą masę próbki. Wyniki wskazują na zróżnicowaną mobilność poszczególnych pierwiastków. Takie zachowanie jest typowe dla geopolimerów wytwarzanych z udziałem surowców odpadowych. W badanym materiale

większość metali ciężkich, takich jak Cd, Hg, Ni, Pb, Cr, Cu, Zn oraz Ba, wykazuje niską wymywalność. Otrzymane wartości mieszczą się w zakresach często podawanych w literaturze dla geopolimerów na bazie popiołów lotnych i innych odpadów mineralnych [2,22,216]. Niska wymywalność większości metali wynika ze skutecznego związania jonów w trójwymiarowej sieci glinokrzemianowej. Część z nich jest dodatkowo zamknięta w porach matrycy geopolimerowej. Jednocześnie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych wartości dla odpadów obojętnych w przypadku arsenu, selenu i molibdenu. Podwyższone wartości dotyczą także ogólnych wskaźników, takich jak TDS oraz siarczany. Zależność ta jest często obserwowane w geopolimerach aktywowanych alkalicznie. Wynika ona z anionowego charakteru tych składników. Wysokie pH cieczy obecnej w porach materiału sprzyja zwiększonej rozpuszczalności niektórych składników i ich migracji do roztworu. Struktura glinokrzemianowa wykazuje ograniczoną zdolność trwałego wiązania wybranych oksyanionów [11,209,217]. Wysokie wartości TDS oraz siarczanów wiąże się zwykle z obecnością łatwo rozpuszczalnych soli alkalicznych oraz pozostałości po aktywatorach chemicznych. Podwyższoną mobilność As, Se i Mo wielokrotnie opisywano w badaniach geopolimerów wytwarzanych z popiołów lotnych i żużli [11,218,219]. W literaturze wskazuje się, że pierwiastki te mogą wykazywać podwyższoną wymywalność nawet w materiałach o dobrej stabilności mechanicznej i mikrostrukturalnej. Porównanie wyników z danymi literaturowymi pokazuje, że przekroczenia względem kryteriów dla odpadów obojętnych nie są zjawiskiem wyjątkowym. Mieszczą się one w znanych ograniczeniach technologii geopolimerów aktywowanych alkalicznie z surowców odpadowych. W wielu pracach podkreśla się, że modyfikacja składu matrycy może ograniczyć wymywalność tych składników. Istotne znaczenie ma także obniżenie zasadowości układu. Skuteczne bywa również zastosowanie dodatków o właściwościach sorpcyjnych [209,220].

Na rysunku 43 przedstawiono wyniki badań wymywalności związków organicznych z materiału geopolimerowego. Dane pokazują obecność oraz poziom migracji wybranych składników organicznych do roztworu w warunkach laboratoryjnych. Zestawienie umożliwia porównanie intensywności wymywania poszczególnych grup związków organicznych.



Rysunek 43. *Wymywalność związków organicznych w materiale geopolimerowym.*

Dane z rysunku 43 przedstawiają poziomy wymywalności wybranych grup związków organicznych w przeliczeniu na suchą masę próbki. Analiza obejmuje zarówno wskaźniki sumaryczne, takie jak ogólny węgiel organiczny, jak i wybrane grupy związków potencjalnie niebezpiecznych. Do tej grupy należą BTEX, WWA, PCB oraz oleje mineralne w zakresie C10-C40. Wyniki pokazują, że dla większości oznaczonych związków poziom wymywalności jest niski lub poniżej granicy oznaczalności metody. Dotyczy to zwłaszcza PCB, WWA oraz BTEX. Otrzymane wartości są zgodne z danymi literaturowymi. Wskazuje się w nich, że związki hydrofobowe o dużej masie cząsteczkowej mają ograniczoną mobilność w matrycach geopolimerowych. Wynika to z ich zatrzymania w porach materiału oraz wiązania na powierzchni faz mineralnych [2,22,216]. Wyraźnie wyższe wartości odnotowano dla ogólnego węgla organicznego oraz olejów mineralnych w zakresie C10-C40. Wskaźniki te odnoszą się do szerokiej grupy związków o różnej polarności i mobilności. Podwyższone poziomy TOC w geopolimerach często wiąże się z obecnością resztkowych składników organicznych w surowcach odpadowych. Znaczenie ma także niepełne związanie drobnocząsteczkowych frakcji organicznych w strukturze materiału [209,218,220]. Podobną zależność obserwuje się w przypadku frakcji olejów mineralnych. Mimo ograniczonej rozpuszczalności w wodzie mogą one częściowo przechodzić do roztworu podczas testu wymywalności. Zależność ta nasila się w warunkach wysokiego pH, typowych dla materiałów aktywowanych alkalicznie [220,221]. Porównanie wyników z danymi literaturowymi pokazuje, że uzyskany rozkład poziomów wymywalności związków organicznych jest typowy dla

geopolimerów wytwarzanych z surowców odpadowych. Różnice między poszczególnymi grupami związków wynikają głównie z ich właściwości fizykochemicznych. Decydujące znaczenie ma rozpuszczalność w wodzie, polarność oraz zdolność do sorpcji na fazach mineralnych [2,209,222].

W tabeli 33 przedstawiono wyniki oznaczeń aktywności izotopów promieniotwórczych oraz wartość wskaźnika promieniotwórczości I dla badanego materiału geopolimerowego. Dane obejmują aktywności naturalnych radionuklidów typowych dla surowców mineralnych i odpadów stosowanych w budownictwie. Zestawienie pozwala ocenić poziom naturalnej promieniotwórczości materiału. Umożliwia także sprawdzenie jego zgodności z wymaganiami dotyczącymi wyrobów budowlanych w zakresie promieniowania jonizującego. Wskaźnik I służy do oceny łącznego wpływu aktywności poszczególnych izotopów na potencjalne narażenie użytkowników budynków.

Tabela 33. *Aktywność izotopów promieniotwórczych i wartość wskaźnika I w badanym materiale geopolimerowym.*

	Wartość [Bq/kg]
Potas ^{40}K	351,72 ± 31,63
Rad ^{226}Ra	65,47 ± 6,46
Tor ^{232}Th	54,47 ± 4,29
Wskaźnik stężenia promieniotwórczego I	0,60 ± 0,04

Wyniki z tabeli 33 pokazują, że aktywność naturalnych izotopów promieniotwórczych w badanym materiale wynosi 351,7 ± 31,6 Bq/kg dla C_{K-40}, 65,5 ± 6,5 Bq/kg dla C_{Ra-226} oraz 54,5 ± 4,3 Bq/kg dla C_{Th-232}. Otrzymane wartości mieszczą się w zakresach typowych dla materiałów budowlanych opartych na surowcach mineralnych i odpadach przemysłowych. Dotyczy to zwłaszcza materiałów wytwarzanych z popiołów lotnych i żużli [2,216,223]. Podwyższona aktywność C_{K-40} jest typowa dla materiałów glinokrzemianowych pochodzenia mineralnego. Zależność tą obserwuje się zarówno w tradycyjnych betonach, jak i w materiałach aktywowanych alkalicznie [2,224]. Aktywności C_{Ra-226} i C_{Th-232} są porównywalne z wartościami podawanymi dla cementów portlandzkich, betonów oraz geopolimerów na bazie popiołów lotnych. Oznacza to, że badany materiał nie wykazuje istotnych odchyleń radiologicznych w porównaniu z typowymi wyrobami budowlanymi [223,225]. Wyznaczona wartość wskaźnika promieniotwórczości I wynosi 0,60 ± 0,04. Jest to wartość wyraźnie niższa

od poziomu granicznego I równego 1. Granica ta jest powszechnie przyjmowana jako kryterium dopuszczające stosowanie materiałów budowlanych bez ograniczeń wynikających z ochrony radiologicznej [224,226]. W literaturze podaje się, że geopolimery wytwarzane z surowców odpadowych często osiągają wartości wskaźnika I zbliżone do materiałów konwencjonalnych lub od nich niższe. Warunkiem jest jednak odpowiedni dobór surowców oraz właściwe proporcje składników [8,223,227]. Porównanie wyników z danymi literaturowymi pokazuje, że poziom naturalnej promieniotwórczości badanego materiału jest typowy dla mineralnych materiałów budowlanych. Nie odbiega on od wartości podawanych dla innych materiałów budowlanych stosowanych w praktyce.

8.3.6. Analiza cyklu życia i analiza ekonomiczna

Analizę środowiskową LCA w ujęciu cradle-to-gate (od kołyski do bramy) oraz analizę ekonomiczną przeprowadzono dla prefabrykowanego elementu ściennego o wymiarach 50 × 100 cm i grubości 25 cm. Objętość elementu wynosi 0,125 m³. Przyjęto układ warstwowy, w którym 10 cm stanowi warstwa nośna z geopolimeru, a 15 cm warstwa izolacyjna z filcu lniano-konopnego. Odpowiada to udziałowi objętościowemu 40% dla warstwy nośnej i 60% dla izolacji. Gęstość geopolimeru przyjęto na poziomie 1777,33 kg/m³. Gęstość filcu lniano-konopnego wynosi 116,69 kg/m³. Na tej podstawie oszacowano masę komponentów w jednym elemencie. Masa matrycy geopolimerowej wynosi około 88,9 kg. Masa warstwy izolacyjnej wynosi około 8,75 kg.

Matryca geopolimerowa składała się z popiołu lotnego i piasku kwarcowego w proporcji masowej 50/50. Ilość roztworu aktywującego określono na 0,5 l na 1 kg suchej mieszanki. Aktywator stanowił roztwór wodorotlenku sodu o stężeniu 10 M. Odpowiada to około 300 g NaOH na 1 l wody. Roztwór ten połączono ze szkłem wodnym sodowym w stosunku objętościowym 1:2,5. Zestawienie ilości głównych składników, odniesione do jednego prefabrykowanego elementu, przedstawiono w tabeli 34.

Tabela 34. *Ilości składników użytych do wytworzenia jednego elementu (50 × 100 × 25 cm).*

Składnik	**Ilość (na element)**
Geopolimer (masa całkowita)	88,9 kg
w tym popiół lotny	44,45 kg
w tym piasek kwarcowy	44,45 kg

Składnik	Ilość (na element)
Roztwór aktywatora (objętość)	35,6 l
NaOH (płatki)	10,7 kg
Szkło wodne sodowe	26,7 kg
Filc lniano-konopny	8,75 kg
Pręty kompozytowe Ø4 mm	6,0 m (≈1,3 kg)
Płyta BOTAMENT 6 mm	1 szt, (≈4,0 kg)
Dystanse T 4 mm	12 szt, (≈0,05 kg)
Energia wygrzewania (75°C, 24 h)	1,2-1,5 kWh

W analizie LCA wykorzystano udokumentowane wskaźniki emisji węglowych wyrażone w kg CO_2-eq. Nie dysponowano pełnymi danymi inwentaryzacyjnymi dla wszystkich komponentów z baz takich jak Ecoinvent. Z tego względu zastosowano jednostkowe wskaźniki emisji dobrane na podstawie literatury. Dobór tych wartości został uzasadniony. Przyjęte wskaźniki mieszczą się w typowych zakresach raportowanych dla materiałów geopolimerowych i surowców przemysłowych. W dalszej części przedstawiono wykorzystane wartości jednostkowe wraz z krótkim uzasadnieniem ich wyboru.

Przyjęte współczynniki emisji (EF, kg CO_2-eq / jednostka):

→ NaOH (produkcja): 2,50 kg CO_2/kg - przyjęta wartość odpowiada emisjom związanym z procesem chlorowo-alkalicznym (zachowawcze założenie).

→ Szkło wodne sodowe: 0,80 kg CO_2/kg - emisje związane z topieniem i przetworzeniem krzemianów sodu.

→ Piasek: 0,005 kg CO_2/kg (≈5 kg CO_2/t) - emisja z wydobycia i przygotowania kruszywa.

→ Popiół lotny: 0,00 kg CO_2/kg (przyjęcie „zero allocation” - surowiec odpadowy bez przypisanej emisji produkcyjnej).

→ Filc lniano-konopny: 0,80 kg CO_2/kg - wartość orientacyjna dla naturalnych mat izolacyjnych (uwzględniająca przetworzenie i transport).

→ Pręty kompozytowe: 5,00 kg CO_2/kg - zachowawcze założenie dla kompozytów włóknistych, realne wartości warunkują rodzaj włókien.

→ Płyta BOTAMENT (przyjęto średnią emisyjność): 3,00 kg CO_2/kg (masę płyt przyjęto jako 4,0 kg).

→ Dystanse (plastik): 2,00 kg CO_2/kg (mała masa, znikomy udział).

→ Energia elektryczna do wygrzewania: 0,65 kg CO_2/kWh (mieszanka sieciowa krajowa jako wartość referencyjna).

Transport materiałów uwzględniono jako przewóz drogowy samochodami ciężarowymi. Przyjęto uśredniony wskaźnik emisji 0,12 kg CO_2/(t·km), odpowiadający pojazdom spełniającym normę Euro VI w transporcie dalekobieżnym. Założono odległość 100 km dla popiołu lotnego i piasku kwarcowego. Dla pozostałych składników, czyli wodorotlenku sodu, szkła wodnego, filcu izolacyjnego, prętów zbrojeniowych, płyty oraz elementów dystansowych, przyjęto 300 km. Na tej podstawie obliczono emisje związane z produkcją, transportem oraz zużyciem energii. Zestawienie emisji przypisanych do poszczególnych etapów przedstawiono w tabeli 35.

Tabela 35. *Emisja CO_2-eq przypadająca na jeden prefabrykowany element (wartości obliczeniowe, jednostka: kg CO_2-eq).*

Pozycja	Obliczenie (kg × EF)	Emisja [kg CO_2-eq]
NaOH (produkcja)	10,7 kg × 2,50	26,75
Szkło wodne	26,7 kg× 0,80	21,36
Piasek	44,45 kg× 0,005	0,22
Popiół lotny	44,45 kg× 0,00	0,00
Filc lniano-konopny	8,75 kg× 0,80	7,00
Pręty kompozytowe	1,3 kg × 5,00	6,50
Płyta BOTAMENT	4,0 kg × 3,00	12,00
Dystanse (plastik)	0,05 kg × 2,00	0,10
Produkcja (suma)	-	73,93
Transport (popiół+piasek)	(44,45+44,45) kg = 88,9 kg= 0,0889 t × 100 km × 0,12 = 1,0668	1,07
Transport (pozostałe)	10,7+26,7+8,75+1,3+4,0+0,05 = 51,5 kg = 0,0515 t × 300 km × 0,12 = 1,854	1,85
Transport (suma)	-	2,92
Energia wygrzewania	1,4 kWh × 0,65 = 0,91	0,91
Całkowite emisje (element)	-	≈77,76

Łączna emisja przypadająca na jeden element prefabrykowany wynosi około 77,8 kg CO_2-eq. Element ma powierzchnię 0,5 m². Oznacza to około 155,5 kg CO_2-eq w przeliczeniu

na 1 m² ściany. Wartość ta wynika z przeskalowania emisji dla jednego elementu. Obliczenia oparto na zachowawczych wskaźnikach emisji dla wodorotlenku sodu i szkła wodnego. Dobór tych parametrów ma istotny wpływ na wynik końcowy. W tabeli 36 przedstawiono procentowy udział poszczególnych składników w całkowitej emisji CO_2-eq analizowanego elementu.

Tabela 36. *Procentowy udział poszczególnych składowych w całkowitej emisji CO_2-eq przypadającej na jeden element.*

Składnik / proces	**Emisja (kg CO_2-eq)**	**Udział (%)**
NaOH (produkcja)	26,75	34,4%
Szkło wodne (produkcja)	21,36	27,5%
Produkcja pozostałe (filc, pręty, płyta, piasek)	25,82	33,2%
Transport (łącznie)	2,92	3,8%
Energia wygrzewania	0,91	0,9%
Suma	77,76	100%

Analiza pokazuje, że głównym źródłem emisji są aktywatory alkaliczne, czyli wodorotlenek sodu i szkło wodne. Ich łączny udział w całkowitej emisji wynosi około 62%. Odpowiada to wartości około 48,1 kg CO_2-eq na jeden element. Wynik ten jest zgodny z danymi literaturowymi porównującymi geopolimery z betonem cementowym. Wskazuje on, że największy potencjał redukcji emisji dotyczy składu aktywatorów. Ograniczenie zużycia NaOH może istotnie obniżyć ślad węglowy. Podobny efekt daje zastosowanie szkła wodnego o niższej emisyjności. Korzystne jest także wykorzystanie lokalnych surowców. Takie działania stanowią najskuteczniejsze strategie ograniczania całkowitego oddziaływania środowiskowego materiału [1–3,220].

W tabeli 37 przedstawiono ilości materiałów użytych w prefabrykowanym elemencie o wymiarach 50 × 100 × 25 cm. Zestawienie obejmuje także odpowiadające im jednostkowe wskaźniki emisji oraz krótką informację o źródłach danych. W przypadkach, w których wartości literaturowe były zróżnicowane, przyjęto wskaźnik uznany za bazowy. Zakres rozbieżności podano w komentarzu.

Tabela 37. *LCI - zestawienie składników, ich ilości przypadających na jeden element oraz przyjętych jednostkowych wskaźników emisji (EF).*

Składnik	**Ilość na element**	**EF (kg CO_2-eq / jednostka)**	**Emisja = ilość × EF (kg CO_2-eq)**	**Źródło EF**
NaOH (płatki)	10,7 kg	bazowy: 2,50 (optymistyczny: 1,12; pesymistyczny: 3,20)	bazowy: 26,75	[228,229]
Szkło wodne sodowe	26,7 kg	bazowy: 0,80 (optymistyczny: 0,80; pesymistyczny: 1,50)	bazowy: 21,36	[230,231]
Piasek	44,45 kg	0,005 (≈5 kg CO_2/t)	0,22	[232]
Popiół lotny	44,45 kg	0,00* (transport liczony oddzielnie)	0,00	[232,233]
Filc lniano-konopny	8,75 kg	0,80	7,00	[234]
Pręty kompozytowe (FRP. Ø4 mm. ~1.3 kg)	1,3 kg	2,6-5,0 (przyjęto 5,0)	6,50	[235,236]
Płyta BOTAMENT 6 mm	1 szt, (przyjęto ~4,0 kg)	3,00	12,00	[232]
Dystanse T (plastik)	12 szt, (~0,05 kg)	2,00	0,10	[237]
Energia - wygrzewanie	1,4 kWh	0,65 kg CO_2/kWh (sieć) (PL: 0,66-0,67 w 2024)	0,91	[238,239]
Transport drogowy	łączna masa transportowana	0,12 kg CO_2 / t·km	2,92	[240]
Suma (produkcja + transport + energia)	-	-	≈77,76 kg CO_2-eq / element (bazowy)	(sumy obliczeń poniżej)

W analizie zastosowano zasadę zero-allocation dla popiołu lotnego traktowanego jako odpad procesowy. Takie podejście jest powszechnie stosowane w badaniach LCA dotyczących geopolimerów. W przypadku wodorotlenku sodu literatura wskazuje na duże rozbieżności w jednostkowych wskaźnikach emisji. Podawane wartości mieszczą się w przedziale od około 1,1 kg CO_2/kg [229] do 2-3 kg CO_2/kg w opracowaniach ogólnych [4,110,241]. Różnice te wynikają głównie z różnych technologii produkcji oraz odmiennego przypisywania obciążeń środowiskowych w procesie chlorowo-alkalicznym. Z tego powodu w pracy przeprowadzono analizę wrażliwości. Obejmowała ona kilka wariantów obliczeniowych.

Etap produkcji (wariant bazowy):

NaOH: 10,7 kg × 2,50 kg CO_2/kg = 26,75 kg CO_2-eq
Szkło wodne: 26,7 kg × 0,80 kg CO_2/kg = 21,36 kg CO_2-eq
Pozostałe materiały (filc izolacyjny, pręty zbrojeniowe, płyta, piasek, elementy dystansowe): łącznie ≈ 25,8 kg CO_2-eq
Łączna emisja na etapie produkcji wynosi około 99,91 kg CO_2-eq na element.

Transport:

Popiół oraz piasek: masa 88,9 kg (0,0889 t) × 100 km × 0,12 kg CO_2/t·km = 1,07 kg CO_2-eq
Pozostałe materiały: masa ≈ 51,5 kg (0,0515 t) × 300 km × 0,12 kg CO_2/tk·m = 1,85 kg CO_2-eq
Całkowita emisja związana z transportem wynosi około 2,92 kg CO_2-eq.

Zużycie energii:

Energia elektryczna: 1,4 kWh × 0,65 kg CO_2/kWh = 0,91 kg CO_2-eq
Przyjęto wskaźnik emisyjności krajowego miksu energetycznego na poziomie 0,65 kg CO_2/kWh, zgodny z danymi dla roku 2024.

Wynik łączny (scenariusz bazowy):

Sumaryczna emisja wynosi około 77,8 kg CO_2-eq na jeden prefabrykowany element. Element ten odpowiada powierzchni 0,5 m². Oznacza to około 155,5 kg CO_2-eq w przeliczeniu na 1 m² powierzchni ściany.

Ze względu na dużą wrażliwość wyników na przyjęte wskaźniki emisji dla aktywatorów alkalicznych i energii elektrycznej przeprowadzono analizę trzech scenariuszy obliczeniowych.

Scenariusz A - optymistyczny (niskie wartości EF):

NaOH: EF = 1,12 kg CO_2/kg
Szkło wodne: EF = 0,80 kg CO_2/kg (dolny zakres literaturowy)
Energia i transport: jak w scenariuszu bazowym

Wynik:

Produkcja: (10,7 × 1,12) + (26,7 × 0,80) + 25,82 ≈ 59,1 kg CO_2-eq

Transport + energia: 2,92 + 0,91 ≈ 3,83 kg CO_2-eq

Łącznie ≈ 62,9 kg CO_2-eq na element, co odpowiada ≈ 125,8 kg CO_2-eq/m².

Scenariusz B - bazowy (zachowawczy):

NaOH: EF = 2,50 kg CO_2/kg

Szkło wodne: EF = 0,80 kg CO_2/kg

Wynik: ≈ 77,8 kg CO_2-eq na element, tj. ≈ 155,5 kg CO_2-eq/m²

Scenariusz C - pesymistyczny (wysokie wartości EF):

NaOH: EF = 3,20 kg CO_2/kg

Szkło wodne: EF = 1,50 kg CO_2/kg (górny zakres wartości literaturowych)

Wynik:

Produkcja: (10,7 × 3,20) + (26,7 × 1,50) + 25,82 ≈ 100,4 kg CO_2-eq

Transport + energia: 2,92 + 0,91 ≈ 3,83 kg CO_2-eq

Łącznie ≈ 104,2 kg CO_2-eq na element, co odpowiada ≈ 208,4 kg CO_2-eq/m².

W tabeli 38 przedstawiono podsumowanie analizowanych scenariuszy obliczeniowych. Zestawiono w niej uzyskane wartości emisji CO_2-eq w kilogramach. Pozwala to bezpośrednio porównać wpływ przyjętych założeń na końcowy wynik analizy.

Tabela 38. *Zestawienie porównawcze analizowanych scenariuszy obliczeniowych wraz z odpowiadającymi im wartościami emisji CO_2-eq (kg CO_2-eq).*

Scenariusz	**Emisja / element (kg CO_2-eq)**	**Emisja / m² (kg CO_2-eq)**
A - optymistyczny (NaOH 1,12, szkło wodne 0,8)	62,9	125,8
B - bazowy (NaOH 2,50, szkło wodne 0,8)	77,8	155,5
C - pesymistyczny (NaOH 3,20, szkło wodne 1,5)	104,2	208,4

Uzyskane wyniki pokazują, że głównym czynnikiem wpływającym na ślad węglowy elementu są aktywatory alkaliczne, czyli wodorotlenek sodu i szkło wodne. W scenariuszu bazowym i pesymistycznym ich udział w całkowitej emisji wynosi około 65-70%. Taki poziom jest zgodny z danymi podawanymi w literaturze dotyczącej materiałów geopolimerowych [230]. Największe możliwości ograniczenia oddziaływania środowiskowego dotyczą aktywacji alkalicznej. Kluczowe jest ograniczenie zużycia NaOH. Można to osiągnąć przez zmianę proporcji aktywatorów lub zwiększenie udziału szkła wodnego w stosunku do wodorotlenku sodu. Rozważane jest także zastosowanie alternatywnych składników. Istotne znaczenie ma wybór szkła wodnego o niższej emisyjności. Korzystne jest jego pozyskiwanie od lokalnych producentów lub z procesów o mniejszym zużyciu energii. Ważnym kierunkiem jest również wykorzystanie niskoemisyjnych źródeł energii podczas obróbki materiału, w tym na etapie wygrzewania [230]. Analiza pokazuje, że emisje związane z transportem i zużyciem energii mają niewielki udział w całkowitym wyniku. W scenariuszu bazowym łącznie nie przekraczają 5%. Ich znaczenie może jednak wzrosnąć przy wysokoemisyjnym miksie energetycznym lub dużych odległościach transportu. Dla Polski przyjęto wskaźnik emisji energii elektrycznej w 2024 roku na poziomie 0,65 kg CO_2/kWh. Wartość ta pokazuje, że krajowy miks energetyczny nadal charakteryzuje się wysoką emisją CO_2 [239].

Analizę ekonomiczną oparto na aktualnych cenach rynkowych w Polsce z lat 2024-2025. Uwzględniono koszty materiałów oraz zużycia energii. Jednostkowe ceny i odpowiadające im koszty określono na podstawie dostępnych danych rynkowych. Mają one charakter orientacyjny. Poniżej przedstawiono zestawienie przyjętych cen.

→ NaOH (płatki): 5,00 zł/kg → 10,7 kg → 53,50 zł.

→ Szkło wodne sodowe: 2,50 zł/kg → 26,7 kg → 66,75 zł.

→ Piasek: 60 zł/t = 0,06 zł/kg → 44,4 kg → 2,66 zł.

→ Popiół lotny: przyjęto niski, ale niezerowy koszt pozyskania. Wynika to z jego charakteru jako produktu ubocznego procesów energetycznych. Przyjęta cena wynosi 100 zł/t, czyli 0,10 zł/kg. W literaturze i danych rynkowych podaje się przedział 60-145 zł/t, który odpowiada typowym wartościom w Polsce.

→ Filc lniano-konopny: ~40 zł/element (orientacyjnie).

→ Pręty kompozytowe i montaż: ~30 zł/element (6 m prętów + łączniki).

→ Płyta BOTAMENT 6 mm: cena rynkowa 52,73 zł/szt → przyjęto 1 szt./element → 52,73 zł.

→ Dystanse T 4 mm: ~0,20 zł/szt → 12 szt. → 2,40 zł.

→ Energia (1,4 kWh) × cena 0,80 zł/kWh → ~1,12 zł.

W tabeli 39 przedstawiono szczegółowe zestawienie orientacyjnych kosztów materiałowych dla jednego elementu prefabrykowanego. Wartości podano w złotych na element. Zestawienie pozwala zobaczyć, z czego składa się koszt całkowity. Umożliwia także wskazanie składników o największym udziale w całkowitym koszcie wytworzenia.

Tabela 39. *Koszty materiałowe przypadające na jeden element prefabrykowany (wartości orientacyjne, zł/element).*

Pozycja	Ilość	Cena jednostkowa	Koszt (zł)
NaOH	10,7 kg	5,00 zł/kg	53,50
Szkło wodne	26,7 kg	2,50 zł/kg	66,75
Popiół lotny	44,4 kg	0,10 zł/kg	4,44
Piasek	44,4 kg	0,06 zł/kg	2,66
Filc lniano-konopny	7,3 kg	-	40,00
Pręty kompozytowe	6 m (~1,3 kg)	-	30,00
Płyta BOTAMENT 6 mm	1 szt	52,73 zł/szt	52,73
Dystanse	12 szt	0,20 zł/szt	2,40
Energia (wygrzewanie)	1,4 kWh	0,80 zł/kWh	1,12
Suma (koszt materiałowy)			≈253,6 zł

Po przeliczeniu na 1 m², co odpowiada dwóm elementom o wymiarach 50 × 100 cm, orientacyjny koszt materiałowy wynosi około 507 zł/m². Do tej wartości należy doliczyć koszty robocizny oraz koszty pośrednie produkcji. Obejmują one funkcjonowanie hali, amortyzację wyposażenia, przygotowanie form i kontrolę jakości. W prefabrykacji koszty te stanowią zwykle 20-50% kosztu materiałów. Przy założeniu wzrostu o 30% całkowity koszt wytworzenia wynosi około 330 zł na element. Odpowiada to około 660 zł/m². Podane wartości mają charakter orientacyjny.

Dla porównania warto odnieść te wyniki do kosztów typowych przegród budowlanych w Polsce w 2024 roku. W przypadku ścian z betonu z izolacją ze styropianu koszty wynoszą około 450-500 zł/m². Dla przegród z elementów silikatowych z izolacją z wełny mineralnej mieszczą się zwykle w zakresie 480-550 zł/m². Opracowany kompozyt geopolimerowy jest więc droższy od najprostszych rozwiązań. Mieści się jednak w przedziale kosztowym typowym

dla przegród o podwyższonych parametrach użytkowych. Dotyczy to zwłaszcza odporności ogniowej i właściwości termoizolacyjnych. Materiał ten oferuje także korzyści środowiskowe. Może mieć niższy ślad węglowy niż rozwiązania oparte na betonie cementowym lub klinkierze. Wykorzystuje również surowce odpadowe [75,110,113,180]. Analiza ilościowa pokazuje, że kompozyt geopolimerowy ma potencjał obniżenia emisji w porównaniu z materiałami opartymi na klinkierze cementowym. Warunkiem jest optymalizacja składu aktywatorów w procesie produkcji. Z ekonomicznego punktu widzenia rozwiązanie to może konkurować z materiałami specjalistycznymi o charakterze proekologicznym i podwyższonej odporności ogniowej. Jednocześnie pozostaje droższe od najprostszych, tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych.

8.3.7. Podsumowanie części III - opracowane kompozyty

W części III rozprawy przedstawiono pełną charakterystykę opracowanych kompozytów geopolimerowych o strukturze warstwowej. Obejmowała ona etap syntezy oraz ocenę właściwości mechanicznych, cieplnych i środowiskowych, a także zachowanie w podwyższonej temperaturze. Badania stanowiły kontynuację wcześniejszych badań kompozytów prototypowych. Wprowadzono jednak zmiany materiałowe i konstrukcyjne w celu zwiększenia funkcjonalności kompozytów. Zastosowano wcześniej opracowaną matrycę geopolimerową. Zrezygnowano z mat kokosowych na rzecz lokalnie dostępnego filcu lniano-konopnego. Zmieniano liczbę warstw izolacyjnych oraz ich formę. Analizowano maty ciągłe i pocięte na paski. Porównano też układ naprzemienny oraz wariant z izolacją w części centralnej. Takie podejście pozwoliło ocenić wpływ geometrii układu na właściwości użytkowe. Elementy dystansujące i pręty kompozytowe zapewniły powtarzalną geometrię próbek. Ograniczono w ten sposób liczbę zmiennych badawczych. Szczególną uwagę poświęcono właściwościom cieplnym. Współczynnik przewodności cieplnej wyznaczono z użyciem aparatu GHP 900. Pozwoliło to ocenić efektywną przewodność cieplną wybranych wariantów oraz wpływ oporu kontaktowego między warstwami. Dodatkowo oznaczono parametry cieplne matrycy geopolimerowej i filcu. Umożliwiło to powiązanie wyników z właściwościami poszczególnych warstw. Wyniki potwierdziły kluczową rolę warstwy izolacyjnej w ograniczaniu transportu ciepła. Wykazano również, że sposób rozmieszczenia izolacji wpływa na efektywną przewodność całego układu. Obliczenia oporu cieplnego i współczynnika U wskazały, że dla uzyskania U równego 0,19 $W/m^2 \cdot K$ konieczna jest przegroda o grubości 25 cm. Obejmuje ona 10 cm geopolimeru oraz 15 cm izolacji z filcu wraz

z płytami dystansującymi. Badania w temperaturach 100, 400 i 600°C potwierdziły wysoką stabilność termiczną matrycy geopolimerowej. Geopolimer ogranicza dopływ tlenu do warstw izolacyjnych. Skutkuje to częściowym zwęgleniem filcu, szczególnie w wariantach z izolacją centralną. Materiał pełni więc funkcję bariery termicznej i stabilizuje strukturę kompozytu. Próby ściskania po nagrzewaniu wykazały, że kompozyty zachowują znaczną część nośności. Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantów z mniejszym udziałem izolacji lub z izolacją w środku przekroju. Oznacza to, że ciągłe warstwy geopolimerowe przejmują główną część obciążeń po ekspozycji termicznej. Przeprowadzono także badania wymywalności oraz analizę promieniotwórczości naturalnej. Wyniki wskazują na skuteczne związanie potencjalnie niebezpiecznych składników w strukturze geopolimeru. Materiał spełnia kryteria bezpieczeństwa środowiskowego. Analiza LCA oraz analiza ekonomiczna pokazały, że mimo wyższych kosztów materiałowych kompozyty mogą osiągać konkurencyjny poziom emisji CO_2. Największy potencjał redukcji emisji dotyczy optymalizacji aktywatorów alkalicznych. Wyniki części III potwierdzają, że warstwowe kompozyty geopolimerowe stanowią perspektywiczne rozwiązanie dla budownictwa. Łączą funkcję nośną, izolacyjną i ochronną. Wykorzystują surowce odpadowe i materiały naturalne.

9. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, analiz oraz oceny właściwości warstwowych kompozytów na bazie glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie i włókien naturalnych sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Włókna naturalne oraz filce, maty i wełny naturalne mają współczynnik przewodzenia ciepła zbliżony do komercyjnych materiałów izolacyjnych. Można więc przypuszczać, że ich wykorzystanie przyniesie takie same efekty izolacyjne, a ze względu na biodegradowalność, odnawialność i ekologiczny charakter surowca przyniesie lepsze względy środowiskowe.
- Wykorzystanie zbrojeniowych prętów kompozytowych pozwala na uzyskanie wytrzymałych, monolitycznych kompozytów warstwowych. Pręty zbrojeniowe wpływają na wytrzymałość na zginanie i ściskanie, jednak wpływ na przenoszenie obciążeń ma sposób rozmieszczenia warstw izolacyjnych oraz rodzaj materiału izolacyjnego. W przypadku zastosowania zbrojenia o tej samej średnicy uzyskano różne wartości wytrzymałości w zależności od liczby warstw oraz rodzaju zastosowanej izolacji.
- Zastosowanie warstwowego układu izolacji oraz zbrojenia w kompozytach pozwala na wytwarzanie materiałów o wystarczającej wytrzymałości i nośności, a matryca geopolimerowa skutecznie zabezpiecza te warstwy.
- Zastosowanie tej samej ilości materiału izolacyjnego w postaci kilku cieńszych warstw, zamiast jednej grubszej, nie powoduje wzrostu efektywnej przewodności cieplnej, mimo większej liczby powierzchni styku między warstwami. Zjawisko to wynika z paradoksu oporu kontaktowego i zostało potwierdzone doświadczalnie z wykorzystaniem aparatu GHP 900.
- Możliwe jest wykorzystanie włókien naturalnych jako izolacji w kompozytach warstwowych z osnową geopolimerową. W celu uzyskania parametrów wymaganych przepisami prawa budowlanego można stosować grubości porównywalne z obecnie stosowanymi prefabrykatami i rozwiązaniami tradycyjnymi. Analiza ekonomiczna wykazała, że tego typu produkty są około 15% droższe od standardowych rozwiązań, jednak ich przewagą są względy środowiskowe oraz wyższe bezpieczeństwo przeciwpożarowe.

- Z danych literaturowych wynika, że geopolimery od kilkudziesięciu lat są wskazywane jako materiały o wysokiej odporności termicznej. W badanych kompozytach zapewniły skuteczną ochronę włókien oraz stabilność strukturalną i geometryczną kompozytu.

Zasadniczy cel pracy został osiągnięty. Przeprowadzono optymalizację rozwiązania pod względem konstrukcyjnym i izolacyjnym, a także wykonano analizę ekonomiczną oraz środowiskową. Nie potwierdzono natomiast, że podział izolacji na większą liczbę warstw poprawia izolacyjność termiczną, ponieważ przewidywany opór kontaktowy nie występował na granicach poszczególnych warstw. Zidentyfikowano natomiast zjawisko paradoksu oporu kontaktowego, które w analizowanych przypadkach prowadziło do pogorszenia właściwości izolacyjnych. W związku z tym należy uznać, że postawiona teza została potwierdzona jedynie częściowo. Praca ma charakter aplikacyjny, a badania będą kontynuowane. Planowane jest również zgłoszenie patentowe obejmujące nowe rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne polegające na wznoszeniu ściany w układzie naprzemiennym, poprzez tradycyjne murowanie bloków betonowych z jednoczesnym systemowym wprowadzaniem ciągłych warstw izolacji włóknistej już na etapie budowy. Proponowana koncepcja zakłada stosowanie wielkoformatowych rolek izolacyjnych przeciąganych pionowo w określonych odstępach, co pozwala uzyskać regularną, powtarzalną strukturę warstwową, w której izolacja stanowi integralny element konstrukcji przegrody. Zakres pracy został w pełni zrealizowany.

10. PERSPEKTYWY APLIKACYJNE I BADAWCZE

Wyniki badań przedstawione w pracy pokazują duży potencjał dalszego rozwoju warstwowych kompozytów na bazie glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie oraz włókien naturalnych. Potencjał ten dotyczy zarówno badań naukowych, jak i praktycznych zastosowań. Opracowane materiały pozwalają łączyć funkcję konstrukcyjną z poprawą właściwości termoizolacyjnych przegród budowlanych. Stanowią więc realną alternatywę dla klasycznych rozwiązań stosowanych w budownictwie. Uzyskane wyniki mogą być podstawą do dalszych badań oraz wdrożeń prowadzonych w skali półtechnicznej i przemysłowej. Dalsze prace planowane są we współpracy z zapleczem badawczo-technicznym tworzonym w przedsiębiorstwie Łęgprzem Sp. z o.o., gdzie przewiduje się uruchomienie specjalistycznego Centrum Badawczo-Rozwojowego. W ubiegłym roku firma uzyskała dofinansowanie ze środków Unii Europejskiej w ramach programu „Fundusze Europejskie dla Małopolski 2021-2027" na realizację projektu inwestycyjnego. Projekt nosi tytuł „Utworzenie Specjalistycznego Laboratorium Badawczego w obszarze inżynierii materiałowej i automatyzacji procesów produkcyjnych" (FEMP.01.03-IP.01-0998/24). Zakłada on wyposażenie przedsiębiorstwa w nowoczesną infrastrukturę badawczą. Celem jest stworzenie przestrzeni do badań materiałów i procesów związanych z technologiami budowlanymi i produkcyjnymi, w tym rozwiązań ściennych z izolacjami z materiałów niskoemisyjnych.

Pierwszy kierunek dalszych badań obejmuje kontynuację prac eksperymentalnych po uruchomieniu zaplecza badawczego w strukturach P.B.P. Łęgprzem Sp. z o.o. Planowane centrum umożliwi prowadzenie badań półtechnicznych nad warstwowymi kompozytami, zwłaszcza w kontekście ich zastosowania w przegrodach budowlanych. W warunkach zbliżonych do przemysłowych będzie można analizować wpływ parametrów procesu wytwarzania i montażu na właściwości fizyczne i mechaniczne materiału. Umożliwi to także ocenę zachowania kompozytów w warunkach eksploatacyjnych typowych dla rzeczywistych obiektów. Nowe zaplecze pozwoli wytwarzać elementy o wymiarach odpowiadających rzeczywistym komponentom przegród. Dzięki temu możliwe będzie przejście od badań małych próbek do badań pełnowymiarowych prototypów. Takie podejście pozwoli bezpośrednio zweryfikować wyniki dotyczące przewodzenia ciepła, oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła w układach o rzeczywistej geometrii i sposobie montażu.

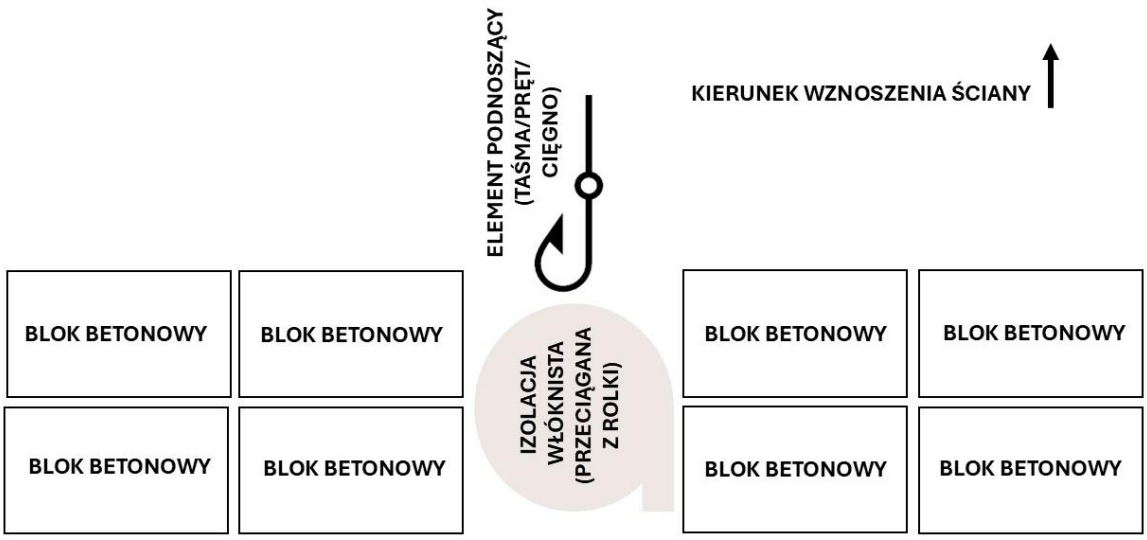
Drugi kierunek rozwoju dotyczy przeniesienia opracowanej koncepcji do technologii betonów konwencjonalnych i elementów murowych stosowanych w praktyce. Warstwowe kompozyty z izolacją włóknistą mogą być częścią ścian murowanych. Funkcję konstrukcyjną

pełniłyby klasyczne bloki betonowe, a funkcję termoizolacyjną warstwa włóknista wbudowana w układzie warstwowym. Takie rozwiązanie pozwala projektować przegrody, w których izolacja jest wprowadzana już na etapie wznoszenia ściany. Nie ma wtedy potrzeby stosowania dodatkowych systemów ociepleń po zakończeniu budowy.

Badania w tym kierunku mogą dotyczyć oceny zgodności opracowanych warstw izolacyjnych z technologiami stosowanymi w przemyśle betonowym. Chodzi przede wszystkim o procesy formowania, dojrzewania i montażu elementów. Ważne będzie sprawdzenie, czy nowe warstwy nie zakłócają standardowych etapów produkcji. Adaptacja rozwiązania do betonów konwencjonalnych zwiększa jego potencjał wdrożeniowy. Umożliwia zastosowanie w budownictwie mieszkaniowym i przemysłowym. Pozwala też zachować prostotę technologii i kompatybilność z istniejącymi systemami wykonawczymi.

Trzeci kierunek, kluczowy z punktu widzenia innowacyjności, dotyczy przygotowania zgłoszenia patentowego na nowe rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne. Koncepcja zakłada wznoszenie ściany pionowo przez naprzemienne układanie klasycznych bloków betonowych i warstw izolacji włóknistej. Izolacja ma postać ciągłej, uporządkowanej warstwy funkcjonalnej. Bloki betonowe są układane w sposób tradycyjny. W określonych odległościach wprowadza się pionowo ciągłą izolację w formie wielkoformatowych rolek przeciąganych w trakcie budowy ściany. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać przegrodę o regularnej i powtarzalnej strukturze warstwowej. Izolacja cieplna staje się wtedy integralną częścią konstrukcji ściany.

Nowość proponowanego rozwiązania polega na połączeniu tradycyjnego murowania z systemowym wprowadzaniem warstw izolacji włóknistej już w trakcie budowy ściany. Izolacja jest układana warstwowo i stanowi stały element przegrody. Taki układ ogranicza straty ciepła i zmniejsza ryzyko powstawania mostków termicznych. Jednocześnie upraszcza proces wykonawczy i pozostaje zgodny z obecnie stosowanymi technologiami budowlanymi. Rozwiązanie może być stosowane w ścianach jedno- i wielowarstwowych jako alternatywa dla klasycznych systemów ociepleń. Dalsze prace po uruchomieniu Centrum Badawczo-Rozwojowego w P.B.P. Łęgprzem Sp. z o.o. mogą dotyczyć dopracowania geometrii bloków betonowych, grubości i rozmieszczenia warstw izolacyjnych oraz sposobu ich integracji ze ścianą. Pozwoli to przygotować skuteczne zgłoszenie patentowe i stworzyć podstawy do komercjalizacji rozwiązania. Na rysunku 44 przedstawiono schemat koncepcyjny proponowanego systemu.



Rysunek 44. *Schemat koncepcyjny rozwiązania do zgłoszenia patentowego (rysunek poglądowy).*

Dalszy rozwój opracowanych kompozytów warstwowych może przebiegać równolegle w trzech obszarach. Pierwszy obejmuje badania półtechniczne realizowane w Łęgprzemie. Drugi dotyczy adaptacji rozwiązania do technologii betonów konwencjonalnych. Trzeci koncentruje się na ochronie i wdrożeniu nowego rozwiązania konstrukcyjnego. Takie kierunki rozwoju potwierdzają duży potencjał aplikacyjny opracowanych materiałów. Wskazują też na ich znaczenie dla rozwoju energooszczędnych i bardziej zrównoważonych technologii w budownictwie.

STRESZCZENIE

Rosnące wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków i bezpieczeństwa pożarowego wymuszają poszukiwanie nowych materiałów. Znaczenie mają także cele Europejskiego Zielonego Ładu oraz pakietu „Fit for 55”. Odpowiedzią na te wyzwania było opracowanie kompozytu warstwowego z osnową geopolimerową i izolacją z włókien naturalnych. Rozwiązanie to stanowi alternatywę dla systemów opartych na cemencie i izolacjach syntetycznych, tym samym wpisuje się w koncepcję gospodarki niskoemisyjnej. Pozwala również ograniczyć ślad węglowy i wykorzystać surowce odnawialne i odpadowe. Jednocześnie zwiększa trwałość i odporność ogniową przegrody. Teza pracy zakładała, że nieorganiczna struktura geopolimeru umożliwi skuteczną ochronę włókien naturalnych przed degradacją cieplną oraz poprawi bezpieczeństwo pożarowe. Przyjęto również założenie, że odpowiednie ukształtowanie układu wielowarstwowego pozwoli zwiększyć efektywność izolacyjną bez zwiększania ilości izolacji. W pracy przeprowadzono badania właściwości fizykochemicznych i granulometrycznych prekursorów geopolimeryzacji, określono warunki syntezy oraz sposób formowania warstw i rozmieszczenia zbrojenia. Zbadano właściwości włókien naturalnych oraz wyznaczono parametry cieplne i mechaniczne kompozytów. Przeanalizowano wpływ konfiguracji warstw na efektywną przewodność cieplną. Wykazano, że podział tej samej ilości izolacji na kilka cieńszych warstw nie zwiększa efektywnej przewodności cieplnej mimo większej liczby granic międzywarstwowych. Zjawisko to wiąże się z paradoksem oporu kontaktowego i zostało potwierdzone w badaniach laboratoryjnych. Dla wariantów końcowych wykonano analizę środowiskową LCA oraz analizę ekonomiczną. Wyniki wskazują na korzystny potencjał ekologiczny przy umiarkowanie wyższych kosztach w porównaniu z najprostszymi rozwiązaniami tradycyjnymi. Wykazano, że największy wpływ na ślad węglowy mają aktywatory alkaliczne, co wskazuje na kierunki dalszej optymalizacji składu. Główny cel pracy został osiągnięty, choć teza została potwierdzona jedynie częściowo. Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi podstawę do dalszych badań. Planowane jest także zgłoszenie patentowe dotyczące rozwiązania polegającego na wznoszeniu ściany w układzie naprzemiennym z jednoczesnym wprowadzaniem ciągłych warstw izolacji włóknistej na etapie budowy. Zakres pracy został w pełni zrealizowany zgodnie z przyjętymi założeniami badawczymi.

SUMMARY

Growing requirements for energy efficiency in buildings and fire safety are driving the search for new materials. The objectives of the European Green Deal and the Fit for 55 package are also important. The response to these challenges was the development of a layered composite with a geopolymer matrix and insulation made of natural fibers. This solution is an alternative to systems based on cement and synthetic insulation, thus fitting in with the concept of a low-carbon economy. It also reduces the carbon footprint and makes use of renewable and waste materials. At the same time, it increases the durability and fire resistance of the partition. The thesis assumed that the inorganic structure of the geopolymer would effectively protect natural fibers from thermal degradation and improve fire safety. It was also assumed that the appropriate design of the multilayer system would increase the insulation efficiency without increasing the amount of insulation. The thesis examined the physicochemical and granulometric properties of geopolymerization precursors, determined the conditions for synthesis and the method of layer formation and reinforcement distribution. The properties of natural fibers were examined and the thermal and mechanical parameters of the composites were determined. The influence of layer configuration on effective thermal conductivity was analyzed. It was shown that dividing the same amount of insulation into several thinner layers does not increase effective thermal conductivity despite the greater number of interlayer boundaries. This phenomenon is related to the contact resistance paradox and has been confirmed in laboratory tests. An LCA environmental analysis and an economic analysis were performed for the final variants. The results indicate favorable ecological potential at moderately higher costs compared to the simplest traditional solutions. It was shown that alkaline activators have the greatest impact on the carbon footprint, which indicates directions for further optimization of the composition. The main objective of the work has been achieved, although the thesis has only been partially confirmed. The work is application-oriented and provides a basis for further research. A patent application is also planned for a solution involving the construction of a wall in an alternating pattern with the simultaneous introduction of continuous layers of fiber insulation during the construction phase. The scope of the work was fully completed in accordance with the accepted research assumptions.

BIBLIOGRAFIA NAUKOWA

[1] Davidovits J. *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials.* Journal of Thermal Analysis 1991;37:1633–56. https://doi.org/10.1007/BF01912193.

[2] Provis JL, Van Deventer JSL. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications.* Woodhead Publishing; 2009.

[3] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. *Geopolymer technology: The current state of the art.* Journal of Materials Science 2006;42:2917–33. https://doi.org/10.1007/S10853-006-0637-Z.

[4] Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications.* 5th edition. Geopolymer Institute; 2020.

[5] Provis JL. *Alkali-activated materials.* Cem Concr Res 2018;114:40–8. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.009.

[6] Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future.* Cem Concr Res 1999;29:1323–9. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9.

[7] He C, Osbaeck B, Makovicky E. *Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects.* Cem Concr Res 1995;25:1691–702. https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4.

[8] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Lorenzen L. *The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications.* Miner Eng 1997;10:659–69. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00046-0.

[9] Yip CK, Lukey GC, Van Deventer JSJ. *The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation.* Cem Concr Res 2005;35:1688–97. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.10.042.

[10] Loewenstein W. *The distribution of aluminum in the tetrahedra of silicates and aluminates | American Mineralogist | GeoScienceWorld.* American Mineralogist 1954;39:92–6.

[11] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. *The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete.'* Cem Concr Res 2007;37:1590–7. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.08.018.

[12] Barbosa VFF, MacKenzie KJD, Thaumaturgo C. *Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.* International Journal of Inorganic Materials 2000;2:309–17. https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6.

[13] Xu H, Van Deventer JSJ. *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.* Int J Miner Process 2000;59:247–66. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5.

[14] Davidovits J. *Properties of geopolymer cements.* First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev: 1994, p. 131–49.

[15] Provis JL, Lukey GC, Van Deventer JSJ. *Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results.* Chemistry of Materials 2005;17:3075–85. https://doi.org/10.1021/CM050230I.

[16] Duxson P, Lukey GC, Van Deventer JSJ. P*hysical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000°C.* Journal of Materials Science 2007 42:9 2007;42:3044–54. https://doi.org/10.1007/S10853-006-0535-4.

[17] Brough AR, Atkinson A. *Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure.* Cem Concr Res 2002;32:865–79. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00717-2.

[18] Fernández-Jiménez A, Palomo A. *Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator.* Cem Concr Res 2005;35:1984–92. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.03.003.

[19] Criado M, Fernández-Jiménez A, Palomo A. *Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO2/Na2O ratio: Part I: FTIR study.* Microporous and Mesoporous Materials 2007;106:180–91. https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2007.02.055.

[20] Bakharev T. *Resistance of geopolymer materials to acid attack.* Cem Concr Res 2005;35:658–70. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.005.

[21] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Lorenzen L. *Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash.* Metallurgical and Materials Transactions B 1998 29:1 1998;29:283–91. https://doi.org/10.1007/S11663-998-0032-Z.

[22] Komnitsas K, Zaharaki D. *Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry.* Miner Eng 2007;20:1261–77. https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2007.07.011.

[23] Kovalchuk G, Fernández-Jiménez A, Palomo A. *Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II.* Fuel 2007;86:315–22. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2006.07.010.

[24] Bernal SA, Provis JL, Rose V, Mejía De Gutierrez R. *Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends.* Cem Concr Compos 2011;33:46–54. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.09.004.
[25] Statkauskas M, Vaičiukynienė D, Grinys A, Bajare D. *Effect of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide Ratios on Compressive Strength of Ceramic Brick and Metakaolin Waste-Based Geopolymer Binder.* Materials 2025;18. https://doi.org/10.3390/MA18214947.
[26] Myers RJ, Bernal SA, Provis JL. *Phase diagrams for alkali-activated slag binders.* Cem Concr Res 2017;95:30–8. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.006.
[27] Zheng Y, Zhong H, Sun K, Shen B, Cui K, Zhao Y, et al. *Effect of composite activator on hydration kinetics and micromechanical properties of alkali-activated slag.* Cem Concr Compos 2025;160:106047. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.106047.
[28] Puertas F, Martínez-Ramírez S, Alonso S, Vázquez T. *Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products.* Cem Concr Res 2000;30:1625–32. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2.
[29] Rowles MR, O'Connor BH. *Chemical and structural microanalysis of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite.* Journal of the American Ceramic Society 2009;92:2354–61. https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2009.03191.X.
[30] Provis JL, Myers RJ, White CE, Rose V, Van Deventer JSJ. *X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders.* Cem Concr Res 2012;42:855–64. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.03.004.
[31] Duxson P, Lukey GC, Separovic F, Van Deventer JSJ. *Effect of Alkali Cations on Aluminum Incorporation in Geopolymeric Gels.* Ind Eng Chem Res 2005;44:832–9. https://doi.org/10.1021/IE0494216.
[32] Richardson IG. *The calcium silicate hydrates.* Cem Concr Res 2008;38:137–58. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.11.005.
[33] Bernal SA, Provis JL, Walkley B, San Nicolas R, Gehman JD, Brice DG, et al. *Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation.* Cem Concr Res 2013;53:127–44. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2013.06.007.
[34] Myers RJ, Bernal SA, Gehman JD, Van Deventer JSJ, Provis JL. *The Role of Al in Cross-Linking of Alkali-Activated Slag Cements.* Journal of the American Ceramic Society 2015;98:996–1004. https://doi.org/10.1111/JACE.13360.
[35] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan B V. *On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.* Materials Journal 2004;101:467–72. https://doi.org/10.14359/13485.
[36] Duxson P, Lukey GC, van Deventer JSJ. *Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1 – Physical evolution.* J Non Cryst Solids 2006;352:5541–55. https://doi.org/10.1016/J.JNONCRYSOL.2006.09.019.
[37] Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M. *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.* Prog Polym Sci 2012;37:1552–96. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2012.04.003.
[38] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance.* Compos Part A Appl Sci Manuf 2016;83:98–112. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2015.08.038.
[39] Savastano H, Warden PG, Coutts RSP. *Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites.* Cem Concr Compos 2005;27:583–92. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.09.009.
[40] John MJ, Thomas S. *Biofibres and biocomposites.* Carbohydr Polym 2008;71:343–64. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2007.05.040.
[41] Bledzki AK, Gassan J. *Composites reinforced with cellulose based fibres.* Prog Polym Sci 1999;24:221–74. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5.
[42] Fiore V, Scalici T, Nicoletti F, Vitale G, Prestipino M, Valenza A. *A new eco-friendly chemical treatment of natural fibres: Effect of sodium bicarbonate on properties of sisal fibre and its epoxy composites.* Compos B Eng 2016;85:150–60. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2015.09.028.
[43] Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites.* 1st Edition. CRC Press; 2005. https://doi.org/10.1201/9780203508206.
[44] Amada S, Untao S. *Fracture properties of bamboo.* Compos B Eng 2001;32:451–9. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00022-1.
[45] Rowell RM. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.* CRC Press; 2012.
[46] Pickering KL. *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites.* Woodhead Publishing; 2008.
[47] Bentur A, Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites.* CRC Press; 2006. https://doi.org/10.1201/9781482267747.
[48] Li Z, Wang L, Wang X. *Cement composites reinforced with surface modified coir fibers.* J Compos Mater 2007;41:1445–57. https://doi.org/10.1177/0021998306068083.

[49] Fengel D, Wegener G. *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions.* De Gruyter; 2011. https://doi.org/10.1515/9783110839654/XML.
[50] Eichhorn SJ, Baillie CA, Zafeiropoulos N, Mwaikambo LY, Ansell MP, Dufresne A, et al. *Current international research into cellulosic fibres and composites.* J Mater Sci 2001;36:2107–31. https://doi.org/10.1023/A:1017512029696/METRICS.
[51] Gram H-E. *Durability of Natural Fibres in Concrete.* Swedish Cement and Concrete Research Inst.; 1983.
[52] Neagu RC, Gamstedt EK, Berthold F. *Stiffness contribution of various wood fibers to composite materials.* J Compos Mater 2006;40:663–99. https://doi.org/10.1177/0021998305055276.
[53] Bos HL. *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials.* Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
[54] Savastano H, Agopyan V. *Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites.* Cem Concr Compos 1999;21:49–57. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00038-9.
[55] Wei J, Meyer C. *Degradation of natural fiber in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite.* Corros Sci 2017;120:42–60. https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2016.12.004.
[56] Tolêdo Filho RD, Scrivener K, England GL, Ghavami K. *Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites.* Cem Concr Compos 2000;22:127–43. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6.
[57] Alomayri T, Low IM. *Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites.* Journal of Asian Ceramic Societies 2013;1:30–4. https://doi.org/10.1016/J.JASCER.2013.01.002.
[58] Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, DeWitt DP. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* 8th ed. Wiley; 2020.
[59] Szargut J. *Termodynamika.* 7th ed. Wydawnictwo Naukowe PWN; 2013.
[60] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. *A review on buildings energy consumption information.* Energy Build 2008;40:394–8. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.007.
[61] *PN-EN ISO 6946:2017-10 - Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metody obliczania.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-6946-2017-10e.html (accessed January 28, 2026).
[62] *Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz.U. 2022 poz. 1225 2022.* https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220001225 (accessed February 1, 2026).
[63] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, De Gracia A, Fernández AI. *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:1675–95. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.018.
[64] Asan H. *Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials.* Build Environ 2006;41:615–20. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.02.020.
[65] *Z jakiego materiału i ilu warstw zbudować ściany zewnętrzne?* https://budujemydom.pl/stan-surowy/sciany-i-stropy/a/21604-z-jakiego-materialu-i-ilu-warstw-zbudowac-sciany-zewnetrzne (accessed February 1, 2026).
[66] Ashby M, Shercliff H, Cebon D. *Materials: Engineering, Science, Processing and Design.* Elsevier; 2023. https://doi.org/10.1016/C2016-0-04242-0.
[67] Neville AM. *Properties of Concrete.* 5th ed. Pearson Eduction; 2011.
[68] Papadopoulos AM. *State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments.* Energy Build 2005;37:77–86. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2004.05.006.
[69] *PN-EN ISO 13788:2013-05 - Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku - Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej - Metody obliczania.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-13788-2013-05p.html (accessed February 1, 2026).
[70] *PN-ISO 15686-6:2006 - Budynki i budowle - Planowanie okresu użytkowania - Część 6: Procedury zwiazane z uwzględnianiem wpływów środowiskowych.* https://sklep.pkn.pl/pn-iso-15686-6-2006p.html?options=cart (accessed February 1, 2026).
[71] Fuchs M, Hegger M, Stark T, Zeumer M. *Energy Manual: Sustainable Architecture.* Birkhauser Verlag AG; 2008.
[72] *Dyrektywa 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków - Dz.U.UE.L.2010.153.13 – OpenLEX.* https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/dyrektywa-2010-31-ue-w-sprawie-charakterystyki-energetycznej-budynkow-67956691 (accessed February 1, 2026).
[73] *PN-EN 13501-1:2019-02 - Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków - Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-13501-1-2019-02p.html (accessed February 1, 2026).

[74] *PN-B-02151-3:2015-10 - Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych.* https://sklep.pkn.pl/pn-b-02151-3-2015-10p.html (accessed February 1, 2026).
[75] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;29:394–416. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.08.037.
[76] *PN-EN ISO 10456:2009 - Materiały i wyroby budowlane - Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-10456-2009p.html (accessed February 1, 2026).
[77] Callister WD, Rethwisch DG. *Materials Science and Engineering: An Introduction.* 10th Edition. Wiley; 2018.
[78] Kaviany M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media.* New York: Springer; 1995. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4254-3.
[79] Modest MF, Mazumder S. *Radiative Heat Transfer.* Fourth Edition. Elsevier; 2021. https://doi.org/10.1016/C2018-0-03206-5.
[80] Holman JP. *Heat transfer.* McGraw-Hill; 2009.
[81] Yovanovich MM. *Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics.* IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2005;28:182–206. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2005.848483.
[82] Bahrami M, Culham JR, Yananovich MM, Schneider GE. *Review of Thermal Joint Resistance Models for Nonconforming Rough Surfaces.* Appl Mech Rev 2006;59:1–12. https://doi.org/10.1115/1.2110231.
[83] Fletcher LS. *Recent Developments in Contact Conductance Heat Transfer.* J Heat Transfer 1988;110:1059–70. https://doi.org/10.1115/1.3250610.
[84] Madhusudana C V. *Thermal Contact Conductance.* Springer Science & Business Media; 2012.
[85] Yovanovich M. *Thermal contact correlations 1981.* https://doi.org/10.2514/6.1981-1164.
[86] Bahrami M, Yovanovich MM, Culham JR. *Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds.* Int J Heat Mass Transf 2006;49:3691–701. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2006.02.021.
[87] Yang H, Zhang W, Hao L, Ye Y, Zeng R, Zhang W, et al. *Interfacial effects of thermal energy storage aggregates on the thermo-mechanical properties of cementitious composites.* Cem Concr Compos 2026;168. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2026.106487.
[88] Tang K, Wen M, Zhang Y, Ge X. *Experimental study on the measurement of interfacial thermal contact resistance of layered porous materials.* Case Studies in Thermal Engineering 2025;76. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2025.107363.
[89] Lee SC, Cunnington GR. *Heat Transfer in Fibrous Insulations: Comparison of Theory and Experiment.* Journal of Thermophysics and Heat Transfer 2012;12:297–303. https://doi.org/10.2514/2.6356.
[90] Abdou A, Budaiwi I. *The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content.* Constr Build Mater 2013;43:533–44. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.058.
[91] Budiansky B. *On the elastic moduli of some heterogeneous materials.* J Mech Phys Solids 1965;13:223–7. https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90011-6.
[92] Nield DA, Bejan A. *Convection in porous media.* Convection in Porous Media 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0/COVER.
[93] Torquato S. *Random Heterogeneous Materials:Microstructure and Macroscopic Properties.* New York: Springer New York; 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6355-3.
[94] Maxwell JC. *A treatise on electricity and magnetism.* Cambridge University Press; 2010. https://doi.org/10.1017/CBO9780511709333.
[95] Luikov AV. *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies.* Adv Heat Transf 1964;1:123–84. https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70098-4.
[96] *PN-EN ISO 10211:2017-09 - Mostki cieplne w konstrukcji budowlanej - Przepływy ciepła i temperatury powierzchni - Obliczenia szczegółowe.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-10211-2017-09p.html (accessed February 1, 2026).
[97] *European Commission. A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives 2020.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0662 (accessed February 1, 2026).
[98] *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.* https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng (accessed February 1, 2026).
[99] *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency.* https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/eng (accessed February 1, 2026).

[100] *Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków.* https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20140001200 (accessed February 1, 2026).
[101] *UN. Secretary-General, World Commission on Environment and Development. Report of the World Commission on Environment and Development 1987.* https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf (accessed February 1, 2026).
[102] *European Commission. Fit for 55 package: Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality.* 2021. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0550 (accessed February 1, 2026).
[103] *RePowerEU Plan : Joint European action on renewable energy and energy efficiency.* https://www.iea.org/policies/15691-repowereu-plan-joint-european-action-on-renewable-energy-and-energy-efficiency (accessed February 1, 2026).
[104] Kibert CJ. *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery.* 5th Edition. John Wiley & Sons; 2022.
[105] Ding GKC. *Sustainable construction—The role of environmental assessment tools.* J Environ Manage 2008;86:451–64. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2006.12.025.
[106] Kats G. *Greening America's Schools: Costs and Benefits 2006.* https://www.usgbc.org/resources/greening-america039s-schools-costs-and-benefits (accessed February 1, 2026).
[107] Mitterer C, Künzel HM, Herkel S, Holm A. *Optimizing energy efficiency and occupant comfort with climate specific design of the building.* Frontiers of Architectural Research 2012;1:229–35. https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2012.06.002.
[108] Zuo J, Zhao ZY. *Green building research–current status and future agenda: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;30:271–81. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.10.021.
[109] *European Commission. The European Green Deal.* https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed February 1, 2026).
[110] Habert G, D'Espinose De Lacaillerie JB, Roussel N. *An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends.* J Clean Prod 2011;19:1229–38. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.03.012.
[111] Scrivener KL, John VM, Gartner EM. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry.* Cem Concr Res 2018;114:2–26. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015.
[112] *European Commission. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe 2020.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF (accessed February 1, 2026).
[113] Provis JL, van Deventer JSJ. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM.* vol. 13. Dordrecht: Springer Dordrecht; 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2.
[114] *PN-EN 12390-5:2019-08 - Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-12390-5-2019-08p.html (accessed January 20, 2026).
[115] *PN-EN 12390-3:2019-07 - Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-12390-3-2019-07p.html?options=cart (accessed January 20, 2026).
[116] *ASTM C1784-20 - Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products.* https://doi.org/10.1520/C1784-20.
[117] *ASTM C518-21 - Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.* https://doi.org/10.1520/C0518-21.
[118] *PN-ISO 8301:1998 - Izolacja cieplna - Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym - Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego.* https://sklep.pkn.pl/pn-iso-8301-1998p.html (accessed January 20, 2026).
[119] *PN-EN 12664:2002 - Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych - Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego - Suche i wilgotne wyroby o średnim i małym oporze cieplnym.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-12664-2002p.html (accessed January 20, 2026).
[120] *ASTM D5334-22ae1 - Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure.* https://doi.org/10.1520/D5334-22AE01.
[121] *PN-EN 12457-4:2006 - Charakteryzowanie odpadów - Wymywanie - Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów - Część 4: Jednostopniowe badanie porcjowe przy stosunku cieczy do fazy stałej 10 l/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 10 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości).* https://sklep.pkn.pl/pn-en-12457-4-2006p.html (accessed January 20, 2026).

[122] *PN-EN ISO 11885:2009 - Jakość wody - Oznaczanie wybranych pierwiastków metodą optycznej spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-OES).* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-11885-2009e.html (accessed January 20, 2026).
[123] *PN-EN ISO 10304-4:2022-08 - Jakość wody - Oznaczanie rozpuszczonych anionów metodą chromatografii jonowej - Część 4: Oznaczanie chloranów(V), chlorków i chloranów(III) w wodach o niskim stopniu zanieczyszczenia.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-10304-4-2022-08e.html (accessed January 20, 2026).
[124] *PN-EN ISO 18412:2007 - Jakość wody - Oznaczanie chromu(VI) - Metoda fotometryczna dla wód słabo zanieczyszczonych.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-18412-2007p.html (accessed January 20, 2026).
[125] *PN-EN 1484:1999 - Analiza wody - Wytyczne oznaczania ogólnego węgla organicznego (OWO) i rozpuszczonego węgla organicznego (RWO).* https://sklep.pkn.pl/pn-en-1484-1999p.html (accessed January 20, 2026).
[126] *PN-EN 15216:2022-03 - Stałe składniki środowiska - Oznaczanie całkowitej substancji rozpuszczonej (TDS) w wodzie i eluatach.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-15216-2022-03e.html (accessed January 20, 2026).
[127] *PN-EN ISO 12846:2012 - Jakość wody - Oznaczanie rtęci - Metoda absorpcyjnej spektrometrii atomowej (AAS) ze wzbogacaniem lub bez wzbogacania.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-12846-2012e.html (accessed January 20, 2026).
[128] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach.* https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150001277 (accessed January 20, 2026).
[129] *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2020 r. w sprawie materiałów budowlanych, w przypadku których oznacza się stężenie promieniotwórcze izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232, wymagań dotyczących dokonywania tych oznaczeń oraz wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego, o której przekroczeniu informuje się właściwe organy.* https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210000033 (accessed January 20, 2026).
[130] Provis JL. *Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?* Materials and Structures 2013 47:1 2013;47:11–25. https://doi.org/10.1617/S11527-013-0211-5.
[131] Heah CY, Kamarudin H, Mustafa Al Bakri AM, Bnhussain M, Luqman M, Khairul Nizar I, et al. *Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers.* Constr Build Mater 2012;35:912–22. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.102.
[132] Taborda-Barraza M, Pelisser F, Gleize PJP. *Thermal-mechanical properties of metakaolin-based geopolymer containing silicon carbide microwhiskers.* Cem Concr Compos 2021;123. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104168.
[133] Strzałkowska E. *Morphology and chemical composition of mineral matter present in fly ashes of bituminous coal and lignite.* International Journal of Environmental Science and Technology 2020 18:9 2020;18:2533–44. https://doi.org/10.1007/S13762-020-03016-0.
[134] Misiak J. *Coal particles in the fly ashes from polish coal combustion.* Gospodarka Surowcami Mineralnymi / Mineral Resources Management 2015;31:111–20. https://doi.org/10.1515/GOSPO-2015-24.
[135] Wdowin M, Franus M. *The conversion technology of fly ash into zeolites.* Polityka Energetyczna/Energy Policy Journal 2014;17:369–80. https://doi.org/10.1007/S10098-014-0719-6.
[136] Kuźnia M, Magiera A, Jerzak W, Ziąbka M, Lach R. *Badanie składu chemicznego popiołów lotnych pochodzących z fluidalnego i konwencjonalnego spalania węgla.* Przemysł Chemiczny 2017;96:1699–703. https://doi.org/10.15199/62.2017.8.15.
[137] Kuźnia M. *A Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment.* Energies 2025;18. https://doi.org/10.3390/EN18010052.
[138] Ostrowski M. *Charakterystyka morfologii popiołów lotnych ze spalania węgli brunatnych.* Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 2011;4:136–50.
[139] Vu D-H, Bui H-B, Kalantar B, Bui X-N, Nguyen D-A, Le QT, et al. *Composition and Morphology Characteristics of Magnetic Fractions of Coal Fly Ash Wastes Processed in High-Temperature Exposure in Thermal Power Plants.* Applied Sciences 2019;9. https://doi.org/10.3390/APP9091964.
[140] Kutchko BG, Kim AG. *Fly ash characterization by SEM–EDS.* Fuel 2006;85:2537–44. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2006.05.016.
[141] Vassilev S V., Vassileva CG, Baxter D. *Trace element concentrations and associations in some biomass ashes.* Fuel 2014;129:292–313. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.04.001.
[142] Barbhuiya S, Pang E. *Strength and Microstructure of Geopolymer Based on Fly Ash and Metakaolin.* Materials 2022;15. https://doi.org/10.3390/MA15103732.
[143] Li Y, Dong Y, El-Naggar MR, Wang F, Zhao Y. *The Influence of Particle Size and Calcium Content on Performance Characteristics of Metakaolin- and Fly-Ash-Based Geopolymer Gels.* Gels 2024;10. https://doi.org/10.3390/GELS10100639.

[144] Geu MJ, Zhuge Y, Ma X, Pham TM. *Systematic review of physical, mechanical and durability performances of metakaolin concrete.* Appl Clay Sci 2026;279. https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2025.108048.
[145] N'cho W, Gharzouni A, Jouin J, Aimable A, Sobrados I, Rossignol S. *Effect of mixing metakaolins: Methodological approach to estimate metakaolin reactivity.* Ceram Int 2023;49:20334–42. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2023.03.157.
[146] Santos A, Andrejkovičová S, Perná I, Almeida F, Rocha F. *Mechanical and thermal properties of geopolymers derived from metakaolin with iron mine waste.* Appl Clay Sci 2024;258. https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2024.107452.
[147] Valášková M, Klika Z, Vlček J, Matějová L, Topinková M, Pálková H, et al. *Alkali-Activated Metakaolins: Mineral Chemistry and Quantitative Mineral Composition.* Minerals 2022;12. https://doi.org/10.3390/MIN12111342.
[148] *Piaski kwarcowe do produkcji cegły wapienno-piaskowej i betonów komórkowych - Państwowy Instytut Geologiczny - PIB.* https://www.pgi.gov.pl/surowce/skalne-i-inne/piaski-kwarcowe.html?utm (accessed January 23, 2026).
[149] *Piasek kwarcowy – czym jest, zastosowanie i zalety - Kwarcowy.* https://kwarcowy.pl/piasek-kwarcowy-czym-jest-zastosowanie-i-zalety/?utm (accessed January 23, 2026).
[150] Qaidi SMA, Sulaiman Atrushi D, Mohammed AS, Unis Ahmed H, Faraj RH, Emad W, et al. *Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review.* Constr Build Mater 2022;346. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128495.
[151] *Piasek kwarcowy, jak dobrać odpowiednią frakcję piasku kwarcowego do konkretnego zastosowania.* https://kwarcowy.pl/jak-dobrac-odpowiednia-frakcje-piasku-kwarcowego-do-konkretnego-zastosowania/?utm (accessed January 23, 2026).
[152] *The main specifications and standards of quartz sand.* https://www.fodamon.com/news/the-main-specifications-and-standards-of-quartz-sand.html?utm (accessed January 23, 2026).
[153] *Knowledge Mini-class of Quartz Sand.* https://www.slonmagnetics.com/blog/knowledge-mini-class-of-quartz-sand/?utm (accessed January 23, 2026).
[154] *What are the facts about quartz sand? By National Minerals.* https://www.nmfiltermedia.com/facts-about-quartz-silica-sand?utm (accessed January 23, 2026).
[155] Platias S, Vatalis KI, Charalampides G. *Suitability of Quartz Sands for Different Industrial Applications.* Procedia Economics and Finance 2014;14:491–8. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00738-2.
[156] Rodrigue Kaze C, Adesina A, Alomayri T, Assaedi H, Kamseu E, Chinje Melo U, et al. *Characterization, reactivity and rheological behaviour of metakaolin and Meta-halloysite based geopolymer binders.* Cleaner Materials 2021;2. https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2021.100025.
[157] Kohout J, Koutník P, Hájková P, Kohoutová E, Soukup A, Vakili M. *Effect of Aluminosilicates' Particle Size Distribution on the Microstructural and Mechanical Properties of Metakaolinite-Based Geopolymers.* Materials 2023;16. https://doi.org/10.3390/MA16145008.
[158] Gao R, Zhou Z, Yang J, Zhang J. *Innovative assessment of reactivity in fly ash: The role of particle size distribution characteristics.* Open Ceramics 2024;20. https://doi.org/10.1016/J.OCERAM.2024.100680.
[159] Querol X, Moreno N, Umaa JC, Alastuey A, Hernández E, López-Soler A, et al. *Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview.* Int J Coal Geol 2002;50:413–23. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00124-6.
[160] Mindess S, Young JF, Darwin D. *Concrete.* 2nd Edition. Pearson; 2003.
[161] Poletto M, Pistor V, Zattera AJ. *Structural Characteristics and Thermal Properties of Native Cellulose.* Cellulose - Fundamental Aspects 2013. https://doi.org/10.5772/50452.
[162] Oh SY, Dong IY, Shin Y, Hwan CK, Hak YK, Yong SC, et al. *Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR spectroscopy.* Carbohydr Res 2005;340:2376–91. https://doi.org/10.1016/J.CARRES.2005.08.007.
[163] Klemm D, Heublein B, Fink HP, Bohn A. *Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material.* Angewandte Chemie - International Edition 2005;44:3358–93. https://doi.org/10.1002/ANIE.200460587.
[164] Pandey KK. *A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy.* J Appl Polym Sci 1999;71:1969–75.
[165] Nelson ML, O'Connor RT. *Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part II. A new infrared ratio for estimation of crystallinity in celluloses I and II.* J Appl Polym Sci 1964;8:1325–41. https://doi.org/10.1002/APP.1964.070080323.
[166] Ciolacu DE, Ciolacu F, Popa VI. *Amorphous cellulose - Structure and characterization.* Cellulose Chemistry and Technology 2011;45:13–21.

[167] Sgriccia N, Hawley MC, Misra M. *Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites.* Compos Part A Appl Sci Manuf 2008;39:1632–7. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2008.07.007.
[168] Faix O. *Classification of Lignins from Different Botanical Origins by FT-IR Spectroscopy.* Holzforschung 1991;45:21–8. https://doi.org/10.1515/HFSG.1991.45.S1.21/XML.
[169] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. *A review of unconventional sustainable building insulation materials.* Sustainable Materials and Technologies 2015;4:1–17. https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2015.05.002.
[170] Schiavoni S, D'Alessandro F, Bianchi F, Asdrubali F. *Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;62:988–1011. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.045.
[171] Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH. *Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;79:558–84. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.094.
[172] Korjenic A, Petránek V, Zach J, Hroudová J. *Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources.* Energy Build 2011;43:2518–23. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.06.012.
[173] Ashour T, Wieland H, Georg H, Bockisch F-J, Wu W. *The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings.* Mater Des 2010;31:4676–85. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2010.05.026.
[174] Satyanarayana KG, Arizaga GGC, Wypych F. *Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview.* Prog Polym Sci 2009;34:982–1021. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2008.12.002.
[175] Eichhorn SJ, Dufresne A, Aranguren M, Marcovich NE, Capadona JR, Rowan SJ, et al. *Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites.* Journal of Materials Science 2010;45:1–33. https://doi.org/10.1007/S10853-009-3874-0.
[176] *Pręty kompozytowe do zbrojenia – Trokotex producent GRP.* https://trokotex.pl/prety-kompozytowe/ (accessed January 26, 2026).
[177] Sartori I, Hestnes AG. *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article.* Energy Build 2007;39:249–57. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.07.001.
[178] *PN-EN ISO 14040:2009 - Zarządzanie środowiskowe - Ocena cyklu życia - Zasady i struktura.* https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-14040-2009p.html (accessed January 26, 2026).
[179] Thormark C. *A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential.* Build Environ 2002;37:429–35. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6.
[180] Ramesh T, Prakash R, Shukla KK. *Life cycle energy analysis of buildings: An overview.* Energy Build 2010;42:1592–600. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.05.007.
[181] Pomponi F, Moncaster A. *Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say?* J Environ Manage 2016;181:687–700. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.08.036.
[182] Pedroso M, de Brito J, Silvestre JD. *Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative).* Constr Build Mater 2017;140:221–8. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.132.
[183] Hammond G, Jones C. *Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE).* University of Bath / BSRIA; 2011.
[184] Cabeza LF, Boquera L, Chàfer M, Vérez D. *Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis.* Energy Build 2021;231. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110612.
[185] Pacheco-Torgal F, Jalali S. *Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review.* Constr Build Mater 2011;25:575–81. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.07.024.
[186] Ali M, Liu A, Sou H, Chouw N. *Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete.* Constr Build Mater 2012;30:814–25. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.068.
[187] Asasutjarit C, Hirunlabh J, Khedari J, Charoenvai S, Zeghmati B, Shin UC. *Development of coconut coir-based lightweight cement board.* Constr Build Mater 2007;21:277–88. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.08.028.
[188] Zenkert D. *The Handbook of Sandwich Construction.* Engineering Materials Advisory Services; 1997.
[189] Evrard A, De Herde A. *Hygrothermal performance of Lime-Hemp wall assemblies.* J Build Phys 2010;34:5–25. https://doi.org/10.1177/1744259109355730.
[190] Florea I, Manea DL. *Analysis of Thermal Insulation Building Materials Based on Natural Fibers.* Procedia Manuf 2019;32:230–5. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.02.207.

[191] Hasan MA, Sheehan T, Ashour A, Elkezza O. *Flexural behaviour of geopolymer concrete T-Beams reinforced with GFRP bars.* Structures 2023;49:345–64. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.01.118.
[192] Allen HG. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels.* Elsevier; 1969. https://doi.org/10.1016/C2013-0-02134-2.
[193] Fernández-Jiménez A, Palomo A, Criado M. *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model.* Cem Concr Res 2005;35:1204–9. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.08.021.
[194] Zhang Z, Provis JL, Reid A, Wang H. *Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete.* Cem Concr Compos 2015;62:97–105. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.03.013.
[195] Korniejenko K, Frączek E, Pytlak E, Adamski M. *Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.* Procedia Eng 2016;151:388–93. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.395.
[196] Alomayri T, Shaikh FUA, Low IM. *Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites.* Mater Des 2014;57:360–5. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.01.036.
[197] Moujoud Z, Sair S, Ait Ousaleh H, Ayouch I, El Bouari A, Tanane O. *Geopolymer composites reinforced with natural Fibers: A review of recent advances in processing and properties.* Constr Build Mater 2023;388. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131666.
[198] Pacheco-Torgal F, Abdollahnejad Z, Camões AF, Jamshidi M, Ding Y. *Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?* Constr Build Mater 2012;30:400–5. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.017.
[199] Bernal SA, Provis JL. *Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives.* Journal of the American Ceramic Society 2014;97:997–1008. https://doi.org/10.1111/JACE.12831.
[200] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho RD. *Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research.* Constr Build Mater 2015;79:115–28. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.035.
[201] Ranjbar N, Zhang M. *Fiber-reinforced geopolymer composites: A review.* Cem Concr Compos 2020;107. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103498.
[202] Camargo MM, Taye EA, Roether JA, Redda DT, Boccaccini AR. *A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites.* Materials 2020;13:1–29. https://doi.org/10.3390/MA13204603.
[203] Silva G, Kim S, Aguilar R, Nakamatsu J. *Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry.* Sustainable Materials and Technologies 2020;23. https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2019.E00132.
[204] Zenkert D. *An Introduction to Sandwich Construction.* EMAS; 1995.
[205] Hasselman DPH, Johnson LF. *Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance.* J Compos Mater 1987;21:508–15. https://doi.org/10.1177/002199838702100602.
[206] Nan C-W, Birringer R, Clarke DR, Gleiter H. *Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance.* J Appl Phys 1997;81:6692–9. https://doi.org/10.1063/1.365209.
[207] Yuan W -b., Yu N, Li L -y., Fang Y. *Heat transfer analysis in multi-layered materials with interfacial thermal resistance.* Compos Struct 2022;293. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115728.
[208] Pacheco-Torgal F. *Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020.* Constr Build Mater 2014;51:151–62. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.10.058.
[209] Zhang Z, Provis JL, Reid A, Wang H. *Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction.* Constr Build Mater 2014;56:113–27. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.081.
[210] Rickard WDA, Vickers L, van Riessen A. *Performance of fibre reinforced, low density metakaolin geopolymers under simulated fire conditions.* Appl Clay Sci 2013;73:71–7. https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2012.10.006.
[211] Arnaud L, Gourlay E. *Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes.* Constr Build Mater 2012;28:50–6. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.07.052.
[212] Collet F, Pretot S. *Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content.* Constr Build Mater 2014;65:612–9. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.039.
[213] Walker R, Pavia S, Mitchell R. *Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes.* Constr Build Mater 2014;61:340–8. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.02.065.
[214] Shea A, Lawrence M, Walker P. *Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building.* Constr Build Mater 2012;36:270–5. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.123.

[215] Ba L, Trabelsi A, Ngo TT, Pliya P, El Abbassi I, Kane CSE. *Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study.* Fibers 2025;13. https://doi.org/10.3390/FIB13050052.
[216] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Schwartzman A. *The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics.* Miner Eng 1999;12:75–91. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00121-6.
[217] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Lukey GC. *The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers.* Chemical Engineering Journal 2002;89:63–73. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6.
[218] Lancellotti I, Ponzoni C, Barbieri L, Leonelli C. *Alkali activation processes for incinerator residues management.* Waste Management 2013;33:1740–9. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.04.013.
[219] Yao X, Zhang Z, Zhu H, Chen Y. *Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry.* Thermochim Acta 2009;493:49–54. https://doi.org/10.1016/J.TCA.2009.04.002.
[220] Bernal SA, Rodríguez ED, Kirchheim AP, Provis JL. *Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials.* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2016;91:2365–88. https://doi.org/10.1002/JCTB.4927.
[221] Wang S, Mulligan CN. *Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution.* Science of The Total Environment 2006;366:701–21. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2005.09.005.
[222] Pacheco-Torgal F, Labrincha JA, Leonelli C, Palomo A, Chindaprasirt P. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes.* Elsevier Inc.; 2014. https://doi.org/10.1016/C2013-0-16511-7.
[223] Kovler K. *Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction.* Constr Build Mater 2009;23:246–53. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.12.010.
[224] *Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation /: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* United Nations 2000;Volume I:1–659.
[225] Trevisi R, Risica S, D'Alessandro M, Paradiso D, Nuccetelli C. *Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance.* J Environ Radioact 2012;105:11–20. https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2011.10.001.
[226] *European Commission (1999) Radiation Protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials.* https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1077862 (accessed January 28, 2026).
[227] Kuzmanović P, Todorović N, Filipović Petrović L, Mrđa D, Forkapić S, Nikolov J, et al. *Radioactivity of building materials in Serbia and assessment of radiological hazard of gamma radiation and radon exhalation.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2020 324:3 2020;324:1077–87. https://doi.org/10.1007/S10967-020-07130-8.
[228] *Emission factors in kg CO2-equivalent per unit.* https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_appendix_h-wstp_south_end_plant_process_selection_report/appendix%207.pdf?utm (accessed February 4, 2026).
[229] *Sodium hydroxide (NaOH). E524.* https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/183314951001?utm (accessed February 4, 2026).
[230] Abdel-Gawwad HA, Al-Jabri K, Strzałkowski J, Alghamdi H, Abadel AA, Elrahman M. A, et al. *Sustainable utilization of sodium silicate-based lead glass sludge as an alkali-activator for alkali-activated slag: Performance, characterization, and Pb-stabilization.* Constr Build Mater 2024;434. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136681.
[231] Davidovits J. *False Values on CO2 Emission For Geopolymer Cement/Concrete 2015.* https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/False-CO2-values.pdf?utm (accessed February 4, 2026).
[232] *Process Data set: activated silica production; technology mix; production mix, at plant; 100% active substance (en) - Data on the Production of Chemicals.* https://ecoinvent.lca-data.com/datasetdetail/process.xhtml?lang=en&uuid=5f01aa3d-141f-45e5-a63e-ce0e461ec5c9&version=03.00.008&utm (accessed February 4, 2026).
[233] *Data specification Specifications for a future LCSA data format.* https://ecoinvent.org/app/uploads/2024/12/Attachment_0-9.pdf?utm (accessed February 4, 2026).
[234] *European Electricity Review 2024.* https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/ (accessed February 4, 2026).
[235] Pavlović A, Donchev T, Petkova D, Staletović N. *Sustainability of alternative reinforcement for concrete structures: Life cycle assessment of basalt FRP bars.* Constr Build Mater 2022;334. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127424.

[236] *Emission Factor: Glass fiber reinforced concrete (GFRC).* https://www.climatiq.io/data/emission-factor/0bbad0e0-5f18-46eb-9385-91db435a4445?utm (accessed February 4, 2026).
[237] *Find out about Plastics, Polymer Engineering and Leadership: Virgin vs. recycled glass-fiber PPS: How much can the carbon footprint be lowered?* https://www.findoutaboutplastics.com/2023/06/virgin-vs-recycled-glass-fiber-pps-how.html?utm#google_vignette (accessed February 4, 2026).
[238] *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe.* https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1?utm (accessed February 4, 2026).
[239] *Energy Transition in Poland 2024 Edition.* https://www.forum-energii.eu/ (accessed February 4, 2026).
[240] *CO2 emissions from trucks in the European Union: An analysis of the 2021 reporting period.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ID-243-%E2%80%93-EU-CO2-trucks_final2.pdf?utm (accessed February 4, 2026).
[241] Turner DA, Williams ID, Kemp S. *Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials.* Resour Conserv Recycl 2015;105:186–97. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026.

SPIS TABEL

Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne włókien naturalnych [37,38,41,43,53]. 19
Tabela 2. Normowe wartości oporów przejmowania ciepła przyjęte do obliczeń współczynnika U. . 52
Tabela 3. Kryteria dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach różnych kategorii zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. 56
Tabela 4. Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla kamiennego. 61
Tabela 5. Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w popiele lotnym pochodzącym ze spalania węgla brunatnego. 64
Tabela 6. Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w metakaolinie. 67
Tabela 7. Fazy mineralogiczne zidentyfikowane w piasku kwarcowym. 70
Tabela 8. Analiza składu tlenkowego materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych. 71
Tabela 9. Charakterystyka rozkładu wielkości cząstek materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych. 73
Tabela 10. Charakterystyka materiałów bazowych metodą sorpcji fizycznej. 75
Tabela 11. Charakterystyka materiałów bazowych metodą porozymetrii rtęciowej. 77
Tabela 12. Parametry fizyczne włókien naturalnych. 81
Tabela 13. Parametry fizyczne włókien w postaci mat, filców i wełn. 90
Tabela 14. Porównanie energii wbudowanej i wbudowanego CO_2 w wybranych materiałach budowlanych i izolacyjnych [180–184]. 97
Tabela 15. Parametry fizyczne kompozytów prototypowych. 103
Tabela 16. Parametry termoizolacyjne kompozytów prototypowych w różnych warunkach temperaturowych. 104
Tabela 17. System oznaczeń opracowanych kompozytów prototypowych. 106
Tabela 18. Charakterystyka wybranych parametrów fizycznych prototypowych kompozytów. 107

Tabela 19. Charakterystyka wybranych parametrów termoizolacyjnych prototypowych kompozytów. 109
Tabela 20. Wytrzymałość na zginanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci pręta przebiegającego przez środek próbki. 111
Tabela 21. Wytrzymałość na zginanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów równomiernie rozmieszczonych na jej długości próbki. 113
Tabela 22. Wytrzymałość na ściskanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci pręta przebiegającego przez środek próbki. 117
Tabela 23. Wytrzymałość na ściskanie prototypowych kompozytów ze zbrojeniem w postaci trzech krótkich prętów równomiernie rozmieszczonych na jej długości próbki. 119
Tabela 24. System oznaczeń opracowanych kompozytów geopolimerowych. 125
Tabela 25. Charakterystyka wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych. 129
Tabela 26. Parametry fizyczne opracowanych kompozytów geopolimerowych. 134
Tabela 27. Współczynnik przewodności cieplnej opracowanych kompozytów geopolimerowych... 136
Tabela 28. Uzyskane wartości parametrów cieplnych badanego geopolimeru. 138
Tabela 29. Obliczone przedziały ufności zmierzonych właściwości cieplnych geopolimeru. 139
Tabela 30. Uzyskane wartości parametrów cieplnych badanej izolacji naturalnej. 141
Tabela 31. Obliczone przedziały ufności zmierzonych właściwości cieplnych izolacji naturalnej. .. 141
Tabela 32. Charakterystyka wytrzymałości na ściskanie opracowanych kompozytów po oddziaływaniu wysokich temperatur. 156
Tabela 33. Aktywność izotopów promieniotwórczych i wartość wskaźnika I w badanym materiale geopolimerowym. 164
Tabela 34. Ilości składników użytych do wytworzenia jednego elementu (50 × 100 × 25 cm)..... 165
Tabela 35. Emisja CO_2-eq przypadająca na jeden prefabrykowany element (wartości obliczeniowe, jednostka: kg CO_2-eq). 167
Tabela 36. Procentowy udział poszczególnych składowych w całkowitej emisji CO_2-eq przypadającej na jeden element. 168
Tabela 37. LCI - zestawienie składników, ich ilości przypadających na jeden element oraz przyjętych jednostkowych wskaźników emisji (EF). 169
Tabela 38. Zestawienie porównawcze analizowanych scenariuszy obliczeniowych wraz z odpowiadającymi im wartościami emisji CO_2-eq (kg CO_2-eq). 171
Tabela 39. Koszty materiałowe przypadające na jeden element prefabrykowany (wartości orientacyjne, zł/element). 173

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Schematyczne przedstawienie jednostek tetraedrycznych [SiO_4] i [AlO_4] oraz sposobu ich łączenia w sieć glinokrzemianową w zależności od stosunku Si/Al (na podstawie [14]). 11
Rysunek 2. Schemat reakcji aktywacji alkalicznej glinokrzemianów - od rozpuszczania fazy amorficznej, przez tworzenie oligomerów, po sieciowanie struktury geopolimerowej (na podstawie [2]). 12
Rysunek 3. Schemat budowy morfologicznej ściany komórkowej włókna roślinnego z zaznaczeniem warstwy pierwotnej (P), warstw wtórnych (S1, S2, S3), mikrofibryli celulozowych oraz matrycy ligninowo-hemicelulozowej (na podstawie [49]). 18
Rysunek 4. Schematy konstrukcyjne zewnętrznych ścian budynku: (a) ściana jednowarstwowa, (b) ściana dwuwarstwowa, (c) ściana trójwarstwowa [65]. 22
Rysunek 5. Schemat hierarchii strategii zrównoważonego rozwoju w budownictwie (na podstawie [102]). 36
Rysunek 6. Uproszczony schemat metodyki badań zastosowanej w niniejszej rozprawie doktorskiej. 44
Rysunek 7. Schematyczne ujęcie klasyfikacji czynników eksperymentalnych. 45
Rysunek 8. Morfologia popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS. 60
Rysunek 9. Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego. 61
Rysunek 10. Morfologia popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS. 63
Rysunek 11. Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego. 64
Rysunek 12. Morfologia metakaolinu wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS..... 66
Rysunek 13. Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy metakaolinu. 67
Rysunek 14. Morfologia piasku kwarcowego wraz z analizą składu pierwiastkowego metodą EDS. 69
Rysunek 15. Dyfraktogram ilustrujący skład fazowy piasku kwarcowego. 70
Rysunek 16. Widma FT-IR badanych włókien naturalnych. 79
Rysunek 17. Obrazy mikroskopowe włókien ilustrujące różne typy materiałów: a) włókna kokosowe, b) siano, c) wióry drzewne, d) celuloza PRO AGRO, e) celuloza VestaEco CELL, f) włókna lniano-konopne, g) włókna konopne 1, h) włókna konopne 2, i) włókna konopne 3. 83
Rysunek 18. Obrazy makroskopowe włókien ilustrujące różne typy materiałów: a) włókna kokosowe, b) siano, c) wióry drzewne, d) celuloza PRO AGRO, e) celuloza VestaEco CELL, f) włókna lniano-konopne, g) włókna konopne 1, h) włókna konopne 2, i) włókna konopne 3. 86
Rysunek 19. Makrofotografie włókien w postaci mat, filców i wełny: a) mata kokosowa, b) filc jutowy, c) filc lniany, d) filc lniano-konopny 1, e) filc konopny, f) filc lniano-jutowy, g) filc lniano-konopny 2, h) wełna lniana, i) wełna konopna, j) wełna lniano-jutowa..... 88

Rysunek 20. Widma FT-IR mat i filców. 93
Rysunek 21. Pręty kompozytowe z włókna szklanego przesyconego żywicą epoksydową zastosowane jako zbrojenie w kompozytach warstwowych [176]. 95
Rysunek 22. Graficzne ujęcie procedury przygotowania kompozytów w warunkach laboratoryjnych. 101
Rysunek 23. Układ warstw w materiale kompozytowym: a) kompozyt, b) warstwa izolacyjna, c) warstwa geopolimerowa. 101
Rysunek 24. Prototypowe materiały kompozytowe - widok ogólny (po lewej) i przekrój poprzeczny (po prawej). 102
Rysunek 25. Porównanie wytrzymałości na zginanie prototypowych kompozytów z różnym układem zbrojenia. 115
Rysunek 26. Porównanie wytrzymałości na ściskanie prototypowych kompozytów z różnym układem zbrojenia. 121
Rysunek 27. Schemat układu warstw w opracowanych kompozytach warstwowych: a) układ naprzemienny geopolimer-izolacja, b) układ z warstwą izolacyjną skoncentrowaną w środkowej części próbki, c) układ naprzemienny z warstwami izolacyjnymi ułożonymi krzyżowo. 124
Rysunek 28. Makrofotografie warstwowych kompozytów geopolimerowych: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś. 128
Rysunek 29. Wytrzymałość na ściskanie opracowanych kompozytów geopolimerowych. 131
Rysunek 30. Makrofotografie kompozytów geopolimerowych po ściskaniu: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś. 133
Rysunek 31. Stanowisko badawcze do analizy zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach. 143
Rysunek 32. Profil temperaturowy stosowany w badaniach zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach. 143
Rysunek 33. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 100°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 145
Rysunek 34. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 400°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 146
Rysunek 35. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 600°C: a) K2MP-4P-R, b) K1M-2P-R, c) K1MP-2P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) RKG, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 147

Rysunek 36. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 100°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 150
Rysunek 37. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 400°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 151
Rysunek 38. Analiza zachowania materiałów w warunkach oddziaływania temperatury 600°C: a) K3M-2P-Ś, b) K4MP-2P-Ś, c) K4M-2P-Ś, d) K2MP-2P-Ś, e) K2M-2P-Ś, f) K3MP-2P-Ś, g) K1MP-2P-R, h) K4M-8P-R, i) K4MP-8P-R. 152
Rysunek 39. Makrofotografie kompozytów po działaniu wysokich temperatur: a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś.155
Rysunek 40. Porównanie wytrzymałości na ściskanie przed i po oddziaływaniu wysokich temperatur. 158
Rysunek 41. Makrofotografie kompozytów po działaniu temperatury i ściskaniu:a) RKG, b) K4M-8P-R, c) K4MP-8P-R, d) K3M-6P-R, e) K3MP-6P-R, f) K2M-4P-R, g) K2MP-4P-R, h) K1M-2P-R, i) K1MP-2P-R, j) K2MP-2P-Ś, k) K2M-2P-Ś, l) K3MP-2P-Ś, m) K3M-2P-Ś, n) K4MP-2P-Ś, o) K4M-2P-Ś. 160
Rysunek 42. Wymywalność metali ciężkich i zanieczyszczeń w materiale geopolimerowym. 161
Rysunek 43. Wymywalność związków organicznych w materiale geopolimerowym..... 163
Rysunek 44. Schemat koncepcyjny rozwiązania do zgłoszenia patentowego (rysunek poglądowy). 180

WYKAZ DOROBKU NAUKOWEGO

Publikacje naukowe

1. Łach Michał, **Przybek Agnieszka**, Hebdowska-Krupa Maria, Franus Wojciech, Szeląg Maciej, Krajniak Krzysztof, Masłoń Adam: Mechanical Behaviour of Geopolymer Concretes with Foamed Geopolymer and Lightweight Mineral Aggregates for Chimney Flue Elements. Materials, vol. 19, nr 9, 2026, Numer artykułu: 1811, s. 1-25. DOI: 10.3390/ma19091811, 140 punktów, IF: 3,2.
2. **Przybek Agnieszka**: Geopolymer Foams Loaded with Diatomite/Paraffin Granules for Enhanced Thermal Energy Storage. Materials, vol. 18, nr 19, 2025, Numer artykułu: 4512, s. 1-31. DOI:10.3390/ma18194512, 140 punktów, IF: 3,2.
3. **Przybek Agnieszka**: The Role of Natural Fibers in the Building Industry—The Perspective of Sustainable Development, Materials, vol. 18, nr 16, 2025, Numer artykułu: 3803, s. 1-43. DOI: 10.3390/ma18163803, 140 punktów, IF: 3,2.
4. **Przybek Agnieszka**, Hebdowska-Krupa Maria, Łach Michał: Paraffin coated with diatomite as a phase change material (PCM) in heat storage systems - a review of research, properties, and applications, Materials, vol. 18, nr 22, 2025, Numer artykułu: 5166, s. 1-50. DOI:10.3390/ma18225166, 140 punktów, IF: 3,2.
5. Łach Michał, **Przybek Agnieszka**, Duda Piotr, Bielaczyc Piotr: A Review of Direct Recycling Processes for Lithium-Ion Battery Cells, Materials, vol. 18, nr 24, 2025, Numer artykułu: 5608, s. 1-34. DOI: 10.3390/ma18245608, 140 punktów, IF: 3,2.
6. **Przybek Agnieszka**, Romańska Paulina, Korniejenko Kinga, Krajniak Krzysztof, Hebdowska-Krupa Maria, Łach Michał: Thermal properties of geopolymer concretes with lightweight aggregates, Materials, vol. 18, nr 13, 2025, Numer artykułu: 3150, s. 1-30, DOI:10.3390/ma18133150, 140 punktów, IF: 3,2.
7. **Przybek Agnieszka**, Łach Michał, Romańska Paulina, Ciemnicka Justyna, Prałat Karol, Koper Artur: Geopolymer concretes with organic phase change materials - analysis of thermal properties and microstructure, Materials, vol. 18, nr 11, 2025, Numer artykułu: 2557, s. 1-29, DOI:10.3390/ma18112557, 140 punktów, IF: 3,2.
8. **Przybek Agnieszka**, Romańska Paulina, Piątkowski Jakub, Łach Michał: Lightweight insulating geopolymer/phase-change materials applied using an innovative spray method, Applied Sciences-Basel, vol. 15, nr 10, 2025, Numer artykułu: 5481, s. 1-19, DOI:10.3390/app15105481, 100 punktów, IF: 2,5.
9. **Przybek Agnieszka**, Piątkowski Jakub, Romańska Paulina, Łach Michał, Masłoń Adam: Low-carbon insulating geopolymer binders: thermal properties, Sustainability, vol. 17, nr 15, 2025, Numer artykułu: 6898, s. 1-25, DOI: 10.3390/su17156898, 100 punktów, IF: 3,3.
10. Marczyk Joanna Martyna, **Przybek Agnieszka**, Setlak Kinga, Bazan Patrycja Elżbieta, Łach Michał: Energy-efficient insulating geopolymer foams with the addition of phase change materials, ACS Omega, vol. 10, nr 3, 2025, s. 2488-2500, DOI:10.1021/acsomega.4c06227, 70 punktów, IF: 4,3.

11. **Przybek Agnieszka**, Setlak Kinga, Piątkowski Jakub, Rzepka Korneliusz, Romańska Paulina, Mikuła Janusz, Łach Michał: Alkaline-activated materials for CO2 capture – literature review, own observations, and future perspectives, Evergreen, vol. 12, 2025, Numer artykułu: 3, s. 1664-1679. DOI:10.5109/7388857, 40 punktów, IF: 3,81.
12. **Przybek Agnieszka**, Rusinek Elwira, Piątkowski Jakub, Łach Michał: Foamed Geopolymers as Low-Emission Insulating Materials with CO2 Sorption Capability – Porosity, Thermal Conductivity, and Adsorption Performance, Technical Transactions, vol. 122, nr 1, 2025, Numer artykułu: 2025/027, s.1-11. DOI:10.37705/TechTrans/e2025027, 40 punktów.
13. **Przybek Agnieszka**: Assessment of physico-chemical behavior and sorptivity – diatomaceous earth as support for paraffinic phase-change materials, Materials, vol. 17, nr 19, 2024, Numer artykułu: 4691, s. 1-17, DOI:10.3390/ma17194691, 140 punktów, IF: 3,2.
14. **Przybek Agnieszka**, Łach Michał: Insulating innovative geopolymer foams with natural fibers and phase-change materials—A review of solutions and research results, Materials, vol. 17, nr 18, 2024, Numer artykułu: 4503, s. 1-22, DOI:10.3390/ma17184503, 140 punktów, IF: 3,2.
15. **Przybek Agnieszka**, Łach Michał: Research on the physical properties of an eco-friendly layered geopolymer composite, Materials, vol. 17, nr 19, 2024, Numer artykułu: 4937, s. 1-23, DOI:10.3390/ma17194937, 140 punktów, IF: 3,2.
16. **Bąk Agnieszka**, Mikuła Janusz, Oliinyk Inna, Łach Michał: Basic research on layered geopolymer composites with insulating materials of natural origin, Scientific Reports, vol. 14, 2024, Numer artykułu: 12576, s. 1-15, DOI:10.1038/s41598-024-63442-9, 140 punktów, IF: 3,9.
17. Łach Michał, Kozub Barbara, Bednarz Sebastian, **Bąk Agnieszka**, Melnychuk Mykola, Masłoń Adam: The influence of the addition of basalt powder on the properties of foamed geopolymers, Materials, vol. 17, nr 10, 2024, Numer artykułu: 2336, s. 1-21, DOI:10.3390/ma17102336, 140 punktów, IF: 3,2.
18. Łach Michał, Gliścińska Eulalia, **Przybek Agnieszka**, Smoroń Krzysztof: The influence of diatomite on the sound absorption ability of composites, Materials, vol. 17, nr 18, 2024, Numer artykułu: 4590, s. 1-21, DOI:10.3390/ma17184590, 140 punktów, IF: 3,2.
19. **Przybek Agnieszka**, Łach Michał, Bogucki Rafał, Ciemnicka Justyna, Prałat Karol, Koper Artur, Korniejenko Kinga, Masłoń Adam: Energy-efficient geopolymer composites containing phase-change materials—comparison of different contents and types, Materials, vol. 17, nr 19, 2024, Numer artykułu: 4712, s. 1-22, DOI:10.3390/ma17194712, 140 punktów, IF: 3,2.
20. Bazan Patrycja Elżbieta, Gajda Michał, Nosal Przemysław, **Bąk Agnieszka**, Setlak Kinga, Łach Michał: The influence of copper oxide particle size on the properties of epoxy resin, Applied Sciences-Basel, vol. 14, nr 6, 2024, Numer artykułu: 2534, s. 1-19, DOI:10.3390/app14062534, 100 punktów, IF: 2,5.
21. **Przybek Agnieszka**, Łach Michał, Hebdowska-Krupa Maria, Miernik Krzysztof, Mikuła Janusz: Research of the physical and chemical properties of diatomite as a carrier of phase change materials for use in advanced building

materials, Frontiers in Materials, vol. 11, 2024, Numer artykułu: 1507779, s. 1-13, DOI:10.3389/fmats.2024.1507779, 70 punktów IF: 2,83.

22. Łach Michał, **Przybek Agnieszka**, Setlak Kinga, Bazan Patrycja Elżbieta, Hebdowska-Krupa Maria: Resistance of low-emission geopolymer binders with fibers to aggressive external factors, Structure and Environment, vol. 16, nr 3, 2024, Numer artykułu: el 012, s. 134-140, DOI:10.30540/sae-2024-012, 40 punktów
23. Łach Michał, **Bąk Agnieszka**, Setlak Kinga, Hebdowska-Krupa Maria: Possibility of using a geopolymer containing phase change materials as a sprayed insulating coating - preliminary results, Emerging Science Innovation (EMSI), Taiwan Association of Engineering and Technology Innovation, vol. 2, 2024, s. 1-8, DOI:10.46604/emsi.2023.11989, 5 punktów
24. **Bąk Agnieszka**, Pławecka Kinga, Bazan Patrycja, Łach Michał: Influence of the addition of phase change materials on thermal insulation properties of foamed geopolymer structures based on fly ash, Energy, vol. 278, 2023, Numer artykułu: 127624, s. 1-15, DOI:10.1016/j.energy.2023.127624, 200 punktów, IF: 9,0.
25. Figiela Beata, **Bąk Agnieszka**, Hebda Marek, Korniejenko Kinga: Eco-friendly production of foamed geopolymers based on mine waste, Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, vol. 121, nr 2, 2023, s. 341-349, DOI:10.5604/01.3001.0054.3217, 140 punktów
26. Parzych Sławomir, Paszkowska Maja, Stanisz Dawid, **Bąk Agnieszka**, Łach Michał: Possibilities of using geopolymers in welding processes and protection against high temperatures, Materials, vol. 16, nr 21, 2023, Numer artykułu: 7035, s.1-15, DOI:10.3390/ma16217035, 140 punktów, IF: 3,1.
27. Ziejewska Celina, **Bąk Agnieszka**, Hodor Krzysztof, Hebda Marek: Eco-Friendly coal gangue and/or metakaolin-based lightweight geopolymer with the addition of waste glass, Materials, vol. 16, nr 17, 2023, Numer artykułu: 6054, s.1-21, DOI:10.3390/ma16176054, 140 punktów, IF: 3,1.
28. Brudny Karolina, Łach Michał, **Bąk Agnieszka**, Pławecka Kinga, Korniejenko Kinga: Application of diatomite as a substitute for fly ash in foamed geopolymers, Journal of Physics - Conference Series, vol. 2423, 2023, Numer artykułu: 012028, s.1-9, DOI:10.1088/1742-6596/2423/1/012028, 40 punktów
29. **Bąk Agnieszka**, Pławecka Kinga, Łach Michał: Comparison of thermal conductivity of foamed geopolymers containing phase change materials, Journal of Physics - Conference Series, vol. 2423, 2023, Numer artykułu: 012003, s.1-8, DOI:10.1088/1742-6596/2423/1/012003, 40 punktów
30. Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Bazan Patrycja, Łach Michał: Thermal properties of geopolymer composites containing microencapsulated phase change materials, Applied Research, vol. 2, nr 3, 2023, s. 1-9, DOI:10.1002/appl.202200063, 5 punktów
31. Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Hebdowska-Krupa Maria, Łach Michał: The use of calcined diatomite as an additive to geopolymeric materials, Materials Proceedings, vol. 13, nr 1, 2023, Numer artykułu: 28, s. 1-9, DOI:10.3390/materproc2023013028, 5 punktów
32. **Bąk Agnieszka**, Bazan Patrycja, Pławecka Kinga, Łach Michał: Geopolymers based on fly ash from the Bełchatów power plant, Materials Proceedings, vol.

13, nr 1, 2023, Numer artykułu: 17, s. 1-8, DOI:10.3390/materproc2023013017, 5 punktów

33. Marczyk Joanna, Ziejewska Celina, Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Łach Michał, Korniejenko Kinga, Hager Izabela, Mikuła Janusz, Lin Wei-Ting, Hebda Marek: Optimizing the l/s ratio in geopolymers for the production of large-size elements with 3D printing technology, Materials, vol. 15, nr 9, 2022, Numer artykułu: 3362, s. 1-18, DOI:10.3390/ma15093362, 140 punktów, IF: 3,4.
34. Łach Michał, Róg Gabriela, Ochman Karolina, Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Korniejenko Kinga: Assessment of adhesion of geopolymer and varnished coatings by the pull-off method, Eng, vol. 3, nr 1, 2022, s. 42-59, DOI:10.3390/eng3010005, 5 punktów
35. **Bąk Agnieszka**, Pławecka Kinga, Łach Michał: Comparison of thermal properties of foamed geopolymer materials based on fly ash and metakaolin, W: IV. International Turkic World Congress on Science and Engineering TURK-COSE 2022, 23-24 June 2022, Niğde - Türkiye : book of proceedings / Barut Murat [i in.] (red.), 2022, Niğde Ömer Halisdemir University, ISBN 978-975-8062-46-1, s. 366-371, 5 punktów
36. Łach Michał, Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Adamczyk Marcin, Bazan Patrycja, Kozub Barbara, Korniejenko Kinga, Lin Wei-Ting: Review of solutions for the use of phase change materials in geopolymers, Materials, vol. 14, nr 20, 2021, Numer artykułu: 6044, s.1-18, DOI:10.3390/ma14206044, 140 punktów, IF: 3.748.
37. Łach Michał, Pławecka Kinga, **Bąk Agnieszka**, Lichocka Katarzyna, Korniejenko Kinga, Cheng An, Lin Wei-Ting: Determination of the influence of hydraulic additives on the foaming process and stability of the produced geopolymer foams, Materials, vol. 14, nr 17, 2021, Numer artykułu: 5090, s.1-14, DOI:10.3390/ma14175090, 140 punktów, IF: 3.748.
38. Korniejenko Kinga, Kozub Barbara, **Bąk Agnieszka**, Balamurugan Ponnambalam, Uthayakumar Marimuthu, Furtos Gabriel: Tackling the circular economy challenges-composites recycling: used tyres, wind turbine blades, and solar panels, Journal of Composites Science, vol. 5, nr 9, 2021, Numer artykułu: 243, s.1-18, DOI:10.3390/jcs5090243, 20 punktów, IF: 3,54.
39. **Bąk Agnieszka**, Figiela Beata, Łach Michał, Gailitis Richard, Lin Wei-Ting, Korniejenko Kinga: Mechanical properties of hybrid cotton and steel fiber reinforced fly-ash based geopolymer composites, W: EuroCoalAsh 2021 Conference "International Conference for Promoting the Use of Coal Combustion Products (CCPs) in Construction" : conference proceedings, 2021, Aristotle University of Thessaloniki, s. 162-172, 5 punktów

Sumaryczny Impact Factor	**94,376**
Suma punktów MNiSW	**3695**
Liczba cytowań (Scopus)	**388**
Indeks Hirscha (Scopus)	**10**

Wskaźniki bibliometryczne z dnia 01.06.2026.

Własne projekty badawcze

"Badania funkcjonalnych lekkich struktur porowatych na bazie glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie"
Nazwa programu: Perły Nauki
Instytucja przyznająca: MNiSW
Nr umowy: PN/01/0067/2022
Planowany budżet projektu: 239 970,00 PLN
Okres kierowania projektem: 05.2023 – 05.2026

Udział w projektach badawczych

1. Projekty Studenckie FutureLab – 2024/2025, "Retencja, infiltracja i oczyszczanie wód opadowych"
Stanowisko: wykonawca, opiekun koła naukowego SMART-MAT
Okres współpracy w projekcie: 02.2025 – 02.2026

2. M-ERA.NET, nr umowy: M-ERA.NET3/2023/84/SHAPE/2024 " Sustainable High performance functionally graded composites via. Advanced manufacturing of Particle-reinforced Cu/SiC for Electrical applications" akronim SHAPE
Stanowisko: wykonawca
Okres współpracy w projekcie: 01.01.2025-31.10.2025

3. M-ERA.NET, nr umowy: M-ERA.NET3/2021/70/GEOSUMAT/2022 "Materiały dla gospodarki o obiegu zamkniętym - kompozyty geopolimerowe na bazie odpadów przemysłowych ze wzmocnieniem hybrydowym" akronim GEOSUMAT
Stanowisko: wykonawca
Okres współpracy w projekcie: 01.05.2025-31.05.2025

4. Studenckie Koła Naukowe Tworzą Innowacje, nr umowy: SKN/SP/601960/2024 "Badania sorpcji i desorpcji CO_2 w geopolimerowych funkcjonalizowanych strukturach porowatych w celu sekwestracji dwutlenku węgla"
Stanowisko: wykonawca
Okres współpracy w projekcie: 20.05.2024-20.05.2025

5. Program LIDER XI, nr umowy: Lider/16/0061/L-11/19/NCBR/2020 "Opracowanie technologii addytywnego wytwarzania przyjaznych dla środowiska i bezpiecznych materiałów izolacyjnych i zdolnych do akumulacji ciepła opartych na alkalicznej aktywacji surowców antropogenicznych"
Stanowisko: samodzielny referent techniczny
Okres współpracy w projekcie: 04.2021 – 12.2023

6. POIR DIATO, nr umowy: POIR.04.01.04-00-0032/20-00 "Opracowanie i demonstracja technologii wytwarzania wysoko efektywnych sorbentów na bazie diatomitu oraz wypełniaczy diatomitowych"
Stanowisko: samodzielny referent techniczny
Okres współpracy w projekcie: 11.2022 – 12.2022

7. "Utworzenie Centrum Badawczo-Rozwojowego Przedsiębiorstwa Budowlano-Produkcyjnego Łęgprzem Sp. z o.o. ", nr umowy: POIR.02.01.00-00-0275/16-00 z dnia 29.08.2017r.
Stanowisko: tester w dziale badawczo-rozwojowym
Okres współpracy w projekcie: 10.2021 – 03.2022

8. "E-mobilność oraz zrównoważone materiały i technologie", nr umowy: PPI/APM/2018/1/00027/U/001 z dnia 11.12.2018r.
Stanowisko: samodzielny referent techniczny
Okres współpracy w projekcie: 07.2021 – 08.2021

Zgłoszenia patentowe

Patent krajowy
Data zgłoszenia: 15.12.2023
Numer zgłoszenia: P.447122
Autorzy: Michał Łach, Agnieszka Bąk, Kinga Setlak
Tytuł zgłoszenia: Kompozyt geopolimerowy zawierający materiały zmiennofazowe oraz sposób wytwarzania tego kompozytu i jego zastosowanie
Nazwa UP: Urząd Patentowy Rzeczpospolitej Polskiej

Patent krajowy
Data zgłoszenia: 19.12.2023
Numer zgłoszenia: P.447177
Autorzy: Michał Łach, Agnieszka Bąk, Kinga Setlak, Barbara Kozub
Tytuł zgłoszenia: Sposób wytwarzania warstw spienionych geopolimerów metodą natryskiwania i linia technologiczna do stosowania tego sposobu
Nazwa UP: Urząd Patentowy Rzeczpospolitej Polskiej

Konferencje naukowe

1. XXXIV Konferencja Aktualia i perspektywy gospodarki surowcami mineralnymi, II Kongres Surowcowy
Data i miejsce konferencji: 03.11.2025 – 06.11.2025, Krynica Zdrój, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja ogólnopolska**

Tytuł wystąpienia: Surowce mineralne w innowacyjnych materiałach budowlanych – pianki geopolimerowe z PCM na bazie diatomitu
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: polski

2. The 4th International Online Conference on Materials (IOCM 2025)
Data i miejsce konferencji: 03.11.2025 – 06.11.2025, online
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Geopolymer foams with the addition of paraffin phase change materials encapsulated in diatomite to improve thermal energy storage
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

3. 10th International Conference on IX edycja konferencji naukowej „Innowacyjne pomysły młodych naukowców: Nauka – Startup – Przemysł" organizowanej w ramach flagowej konferencji EUIndTech2025
Data i miejsce konferencji: 02.06.2025 – 04.06.2025, Kraków, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Zrównoważone rozwiązania w budownictwie obniżające wpływ gazów cieplarnianych
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: polski

4. International Yildirim Bayezid Scientific Research and Innovation Symposium
Data i miejsce konferencji: 09.05.2025 – 10.05.2025, Bursa, Turcja, online
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Layered partitions based on aluminosilicate with the addition of natural fibers
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

5. 5th International Conference Strategies towards Green Deal Implementation Water, Raw Materials & Energy in Green Transition
Data i miejsce konferencji: 27.11.2024 – 29.11.2024, Kraków, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Investigation of qualities of layered geopolymer composites based on aluminosilicates and fibers of natural origin
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

6. XXXIII Konferencja Aktualia i Perspektywy Gospodarki Surowcami Mineralnymi
Data i miejsce konferencji: 06.11.2024 – 08.11.2024, Krynica Zdrój, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja ogólnopolska**
Tytuł wystąpienia: Makroenkapsulacja diatomitu zawierającego parafinowe substancje zmiennofazowe
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne

Język wystąpienia: polski

7. 10th International Conference on MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN, M2D 2024
Data i miejsce konferencji: 01.09.2024 – 05.09.2024, Nagoya, Japonia
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Diatomite as a medium for paraffin phase change material – evaluation of absorption capacity
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

8. 2nd Interdisciplinary Annual PhD Conference on Material Science and Innovative Technologies
Data i miejsce konferencji: 04.03.2024 – 05.03.2024, Kraków, online
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Influence of the addition a natural fibers on the insulating properties of multilayer geopolymer composites
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

9. Materials Info 2023 – 6th World Congress on Materials Science and Engineering, Theme: "Materials Innovation and Impact"
Data i miejsce konferencji: 18.09.2023 – 19.09.2023, Rzym, Włochy
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Thermal and strength properties of alkali activated foams with natural fibers and phase change materials
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

10. MATBUD`2023 – 10th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering
Data i miejsce konferencji: 19.04.2023 – 21.04.2023, Kraków, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Geopolymers based on fly ash from the Bełchatów power plant
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

11. I Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Inżynieria Materiałowa – Materiały i Technologie"
Data i miejsce konferencji: 20.11.2022 – 23.11.2022, Łódź – Słok, Polska
Zasięg konferencji: **konferencja ogólnopolska**
Tytuł wystąpienia: Właściwości mechaniczne i termoizolacyjne spienionych geopolimerów na bazie odpadów kopalnianych wzmacnianych włóknem konopnym
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: polski

12. IMST 2022 – 5 th International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”
Data i miejsce 28.09.2022 – 30.09.2022, Ryga, Łotwa
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Comparison of thermal conductivity of foamed geopolymers containing phase change materials
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

13. TURK-COSE 2022 – 4 th International Turkic World Congress on Science and Engineering
Data i miejsce konferencji: 23.06.2022 – 24.06.2022, on-line
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: Comparison of thermal properties of foamed geopolymer materials based on fly ash and metakaolin
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

14. VII edition of the International Conference Young Researchers' Innovative Ideas:Science | Start-Ups | Industry
Data i miejsce konferencji: 27.05.2021 – 28.05.2021, on-line
Zasięg konferencji: **konferencja międzynarodowa**
Tytuł wystąpienia: The use of phase change materials in geopolymers – literature review
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: angielski

Wizyty studyjne

Miejsce: Lviv Polytechnic National University, Institute of Mechanical Engineering and Transport (Ukraina)
Okres trwania: 09.08.2021 – 15.08.2021
Opiekun zagraniczny: prof. Oleksii Lanets
Wyjazd studyjny w ramach: KATAMARAN „Opracowanie nowych programów studiów w zakresie zaawansowanych technologii wytwarzania addytywnego”

Nagrody

1. Nagroda: Złoty medal
Organizator: IPITEX – Thailand Inventors Day 5-9 Styczeń, 2026
Opis: Złoty medal za wynalazek pt. Eco-friendly biodegradable pots made from processed fruit waste with a protective biopolymer coating, Autorzy: D. Wanat, A. Przybek, J. Piątkowski, Z. Stępińska, E. Rusinek, M. Bańkosz, M. Łach, B. Tyliszczak

2. Nagroda: Srebrny medal
Organizator: International Warsaw Invention Show (IWIS) 7-9 Listopad, 2025
Opis: Srebrny medal za wynalazek pt. Next-Generation Innovative Packaging Materials Based on Biodegradable Raw Materials for the Food Industry, Autorzy: A. Przybek, D. Wanat, J. Piątkowski, J. Sztrumpf, E. Rusinek, M. Bańkosz, B. Tyliszczak, M. Łach

3. **Nagroda: Brązowy medal**
Organizator: International Warsaw Invention Show (IWIS) 7-9 Listopad, 2025
Opis: Brązowy medal za wynalazek pt. Eco-Friendly Biodegradable Pots Made from Processed Fruit Waste with a Protective Biopolymer Coating, Autorzy: D. Wanat, A. Przybek, J. Piątkowski, Z. Stępińska, E. Rusinek, M. Bańkosz, M. Łach, B. Tyliszczak

4. **Nagroda: Srebrny medal**
Organizator: 18. MIĘDZYNARODOWE TARGI WYNALAZKÓW I INNOWACJI INTARG® 2025, 3-5 czerwca 2025
Opis: Srebrny medal za wynalazek pt. FLOBIOPOT – Biodegradowalne doniczki z odpadów owocowych pokryte biopolimerem. Innowacyjne
i ekologiczne rozwiązanie, które wspiera gospodarkę cyrkularna oraz redukuje ilość plastikowych odpadów w ogrodnictwie, Autorzy: D. Wanat, A. Przybek, J. Piątkowski, Z. Stępińska, E. Rusinek, M. Bańkosz, M. Łach, B. Tyliszczak

5. **Nagroda: Srebrny medal**
Organizator: 18. MIĘDZYNARODOWE TARGI WYNALAZKÓW I INNOWACJI INTARG® 2025, 3-5 czerwca 2025
Opis: Srebrny medal za wynalazek pt. REBIOPACK – Nowa generacja ekologicznych materiałów opakowaniowych dla przemysłu spożywczego, Autorzy: A. Przybek, D. Wanat, J. Piątkowski, J. Sztrumpf, E. Rusinek, M. Bańkosz, B. Tyliszczak, M. Łach

6. **Nagroda: 3 miejsce w konkursie „Opakowanie przyszłości - innowacyjne rozwiązanie dla produktów mlecznych."**
Organizator: Danone Sp. z o.o.,Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
Opis: 3 miejsce w konkursie „Opakowanie przyszłości - innowacyjne rozwiązanie dla produktów mlecznych." za projekt REBIOPACK

7. **Nagroda: 7 miejsce na Uczelnianej Sesji Kół Naukowych 2025**
Organizator: Politechnika Krakowska im. Tadeusz Kościuszki
Opis: Agnieszka Przybek, Dominika Wanat - REBIOPACK (REcycled BIOdegradable PACKaging) Recykling Odpadowych Materiałów Owocowych do Produkcji Biodegradowalnych Opakowań Spożywczych Pokrytych Biopolimerem, Koło Naukowe Materiałów Funkcjonalnych SMART-MAT, sekcja BudMat i sekcja SmartMat.

8. **Nagroda**: **1 miejsce na Wydziałowej Sesji Kół Naukowych 2025**
Organizator: Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusz Kościuszki
Opis: Agnieszka Przybek, Dominika Wanat - REBIOPACK (REcycled BIOdegradable PACKaging) Recykling Odpadowych Materiałów Owocowych do Produkcji Biodegradowalnych Opakowań Spożywczych Pokrytych Biopolimerem, Koło Naukowe Materiałów Funkcjonalnych SMART-MAT, sekcja BudMat i sekcja SmartMat.

9. **Nagroda: TOP 20 PK – Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki PK (nagroda dla 20% najlepiej publikujących pracowników zaliczonych do liczby N)**
Organizator: Politechnika Krakowska
Data przyznania: 01.03.2025

10. Nagroda: Stypendium Politechniki Krakowskiej za osiągnięcia naukowe
Organizator: Politechnika Krakowska im. Tadeusz Kościuszki
Opis: Nagroda za osiągnięcia naukowe w ramach Własnego Funduszu Stypendialnego Politechniki Krakowskiej – edycja zimowa 2024.

11. Nagroda: Nagroda Młodego Naukowca
Organizator: MATERIALS INFO 2023 – 6th World Congress on Materials Science and Engineering, Theme: "Materials Innovation and Impact"
Opis: Nagroda za najlepsze wystąpienie w kategorii Młody Naukowiec, tytuł wystąpienia: Thermal and strength properties of alkali-activated foams with natural fibers and phase change materials.

12. Nagroda: Nagroda II stopnia
Organizator: Fundacja Wspierania Młodych Talentów Profesora Janusza Magiery
Opis: Nagroda za całokształt osiągnięć w czasie studiów I i II stopnia, współautorstwo kilku artykułów opublikowanych w czasopismach z listy A - MeiN oraz opracowanie funkcjonalnych spienionych kompozytów geopolimerowych z dodatkiem materiałów zmiennofazowych do zastosowania w budownictwie.

Koła naukowe:

Sekcja BudMat, koła naukowego SMART-MAT na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej
Okres działania: 02.2023 – obecnie
Status: opiekun sekcji BudMat

Kursy/szkolenia:

- ✓ Studium Pedagogiczne dla Asystentów i Doktorantów – Uzyskanie kwalifikacji pedagogicznych do pracy dydaktycznej na uczelni
- ✓ Zarządzanie zespołem
- ✓ Zarządzanie projektem - przegląd wybranych metodyk
- ✓ Nowoczesna dydaktyka
- ✓ Biznes w działaniu
- ✓ Coaching jako narzędzie do uwalniania kreatywnego potencjału
- ✓ Efektywna komunikacja i zarządzanie zespołem
- ✓ Metoda projektów krok po kroku, czyli jak kreatywnie osiągać cele
- ✓ Projektowanie procesu i wyrobu w warunkach Przemysłu 4.0
- ✓ Warsztat kreatywnego myślenia, twórczego rozwiązywania problemów oraz podejmowania decyzji
- ✓ Zarządzanie finansami dla niefinansistów
- ✓ Zarządzanie projektami w przedsiębiorstwie
- ✓ Zarządzanie Projektami
- ✓ Zarządzanie strategiczne
- ✓ Badawcze kompetencje informacyjne w pracy naukowej
- ✓ Geopolimery - nowoczesne i przyjazne środowisku materiały dla Budownictwa
- ✓ Certyfikat audytora wewnętrznego w laboratorium według PN-EN ISO/IEC 17025:2018
- ✓ Szkoła letnia BIOART SUMMER SCHOOL AND STUDENT CONTEST
- ✓ Uczestnictwo w warsztatach Raw Materials Manager Workshop II
- ✓ Certyfikat POWERPKXXI2.0/S/Geopolymers/3 Letniej Szkoły Geopolimerów

Programy:

Udział w programie mentoringu biznesowego „**EXCELLENCE CHALLENGE”** - edycja VI
Data i miejsce: 02.2023 – 04.2023, Kraków
Organizator: Politechnika Krakowska, Biuro Pozyskiwania Funduszy
Charakter udziału: uczestnik

Warsztaty:

Warsztaty Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ)
Data i miejsce: 18.03.2025, Kraków, Polska
Tytuł wystąpienia: Gospodarka obiegu zamkniętego na przykładzie materiałów geopolimerowych
Rodzaj wystąpienia: wystąpienie ustne
Język wystąpienia: Polski

“Warsztaty Analityczne MS Spektrum ze Spektrometrii Atomowej”
Data i miejsce: 24.04.2024, Kraków, Polska
Organizator: MS Spektrum

“Czy spektrometria NMR musi być droga? Rozwiązania firmy Oxford Instruments”
Data i miejsce: 21.03.2024, Kraków, Polska

Organizator: MS Spektrum
“Spektroskopia podczerwieni FTIR w skali makro i mikro”
Data i miejsce: 31.05.2022, Kraków, Polska
Organizator: MS Spektrum

Popularyzacja nauki

- ✓ Udział w Ogólnopolskim Dniu Inżynierii Materiałowej 2026 organizowanym na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej dn. 27.03.2026r.
- ✓ Udział w Dniu Wynalazków Edycja 2025 dn. 08.05.2025r., wynalazek: Wielowarstwowe kompozyty betonowe i geopolimerowe z izolacjami z włókien pochodzenia naturalnego
- ✓ Prowadzenie warsztatów w ramach Koła Naukowego Materiałów Funkcjonalnych SMART-MAT dla szkół.
- ✓ Udział w Ogólnopolskim Dniu Inżynierii Materiałowej 2025 organizowanym na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej dn. 28.03.2025 r.
- ✓ 08.06.2024 r. wywiad w Radiu Nowy Świat w ramach Cyklu klimatycznego: o nowych ekologicznych materiałach izolacyjnych. Gościni mgr inż. Agnieszka Bąk
- ✓ Wystąpienie w programie Czysta Polska – Odcinek 160 https://form.lepszapolska.pl/czysta-polska/czysta-polska-odcinek-160_16351/
- ✓ Udział w Ogólnopolskim Dniu Inżynierii Materiałowej 2024 organizowanym na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej dn. 22.03.2024 r.
- ✓ Udział w Dniu Otwartym PK w ramach akcji „Dziewczyny na Politechniki” organizowanym przy pawilonie głównym dn. 19.04.2024 r.