

dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska, dr hab. inż. Marta Kosior- Kazberuk,
prof. PB
Politechnika Białostocka

Właściwości kompozytów bezcementowych z udziałem kruszywa z recyklingu betonu i biokarbonizatu

The properties of cementless composites with recycled concrete aggregate and biochar

Streszczenie

W dobie intensywnych poszukiwań alternatyw dla tradycyjnych kompozytów cementowych oraz efektywnego zagospodarowania odpadów gruzobetonowych i komunalnych, kompozyty bezcementowe (geopolimery) z udziałem kruszywa z recyklingu betonu, a także wykorzystanie produktów popirolitycznych w budownictwie, są przedmiotem zainteresowania coraz liczniejszej grupy badaczy. Celem przedstawionych w artykule badań było określenie wpływu zastosowania kruszywa z recyklingu gruzu betonowego (RCA) oraz biokarbonizatu (B) z pirolizy odpadów komunalnych, na właściwości fizyczno-mechaniczne i mikrostrukturę geopolimerów oraz ich zdolność do pochłaniania CO₂. W ramach eksperymentu przygotowano zaprawy geopolimerowe różniące się zawartością kruszywa z recyklingu i biokarbonizatu. Zróżnicowano również warunki dojrzewania zapraw. Frakcję 1-2 mm kruszywa naturalnego (piasku), co stanowiło 40% stosu okrucowego, całkowicie zastąpiono RCA, natomiast biokarbonizat (B) zastosowano w ilości 10% masy popiołu lotnego. Po 24 h od wykonania, po rozformowaniu, część próbek dojrzewała w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 65°C, drugą, poddano przyspieszonej karbonatyzacji w reaktorze z czystym CO₂ pod ciśnieniem 5 atmosfer. Wyniki badań wykazały, że próbki poddane karbonatyzacji charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na ściskanie (do 50% wzrostu w stosunku do serii kontrolnych), mniejszą nasiąkliwością oraz obniżoną porowatością. Badania mikrostruktury i analizy chemiczne potwierdziły powstawanie zeolitu, wydzielanie węgla wapnia oraz zmiany struktury porów, co przyczyniło się do poprawy parametrów mechanicznych kompozytów. Wyniki badań wskazują na potencjał do zastosowania geopolimerów wzbogaconych biokarbonizatem i kruszywem recyklingowym jako nowoczesnych kompozytów bezcementowych, dodatkowo wykazujących zdolność pochłaniania CO₂ z atmosfery.

Abstract

In the era of intensive search for alternatives to traditional cement composites as well as effective management of concrete and municipal waste, cement-free composites (geopolymers) with recycled concrete aggregate, as well as the use of post-pyrolysis products in construction, are the subject of interest of an increasing group of researchers. The research aimed to determine the effect of using aggregate from recycled concrete rubble (RCR) and biochar (B) from the pyrolysis of municipal waste on the physical and mechanical properties and microstructure of geopolymers, as well as their ability to absorb CO₂. As part of the experiment, geopolymer mortars were prepared with different contents of recycled aggregate and biochar. The regime of conditioning the mortars was also varied. The 1-2 mm fraction of natural aggregate (sand), which constituted 40% of the total content of aggregate, was completely replaced with RCR, while biochar (B) was used in the amount of 10% of the fly ash mass. After 24 hours from manufacturing, some of the samples were conditioned in a laboratory dryer at 65°C, while the others were subjected to accelerated carbonation in a reactor with pure CO₂ at a pressure of 5 atmospheres. The test results showed that the carbonated samples were characterised by higher compressive strength (up to 50% increase compared to the control series), lower water absorption and reduced porosity. Microstructure tests and chemical analyses confirmed the formation of zeolite, calcium carbonate precipitation and changes in the pore structure, which contributed to the improvement of the mechanical parameters of the composites. The research results indicate the potential for using geopolymers enriched with biochar and recycled aggregate as modern cement-free composites, additionally demonstrating the ability to absorb CO₂ from the atmosphere.

1. Wstęp

W obliczu rosnącej świadomości ekologicznej oraz wynikających z niej działań na rzecz ograniczenia negatywnego wpływu człowieka na środowisko i redukcji antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych, przed przemysłem budowlanym stoi wyzwanie wdrażania bardziej zrównoważonych rozwiązań. Jednym z obiecujących kierunków są geopolimery – nowoczesne materiały wiążące, które mogą być otrzymywane m.in. z naturalnych surowców, takich jak metakaolinit, oraz z ubocznych produktów spalania (UPS), takich jak żużle czy odpady energetyczne. Ich wykorzystanie nie tylko ogranicza ilość odpadów trafiających do środowiska, ale również pośrednio przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ [1]. Zmniejszenie śladu węglowego w cyklu życia wyrobów budowlanych jest kluczową dziedziną zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, tak ważnego aspektu w dobie rosnącego zanieczyszczenia powietrza i w dążeniu do neutralizacji jego skutków. W tym kontekście coraz większe zainteresowanie budzi także wykorzystanie kruszywa z recyklingu gruzu betonowego (RCA) oraz biocharu (BC), na przykład powstającego w procesie pirolizy odpadów organicznych. Zastosowanie tego typu materiałów odpadowych nie tylko sprzyja gospodarce cyrkularnej, ale może również przyczyniać się do dodatkowego pochłaniania CO₂ z atmosfery [2,3].

Najczęściej stosowanymi prekursorami do geopolimerów są popioły lotne, żużel wielkopiecowy, metakaolin, a także czerwony szlam [4]. Popularnie stosowanymi aktywatorami są wodorotlenek sodu lub potasu oraz szkło wodne. Badania pokazują, że geopolimery charakteryzują się większą odpornością na wysoką temperaturę, krótszym czasem wiązania, a nawet lepszymi właściwościami mechanicznymi niż tradycyjny beton cementowy ([5, 6].

Kruszywa naturalne (NA) wciąż stanowią główny składnik kruszywowy zarówno w betonie geopolimerowym (GPC), jak i w tradycyjnym betonie cementowym (CC). Ponieważ kruszywa stanowią od 75 do 80% całkowitej objętości betonu, zapotrzebowanie na nie w procesie jego wytwarzania jest bardzo wysokie. Obecna nadmierna eksploatacja kruszyw naturalnych doprowadziła w niektórych regionach do niedoboru zasobów piasku i żwiru, a także do degradacji środowiska [7].

Zastosowanie RAC pozwala na zmniejszenie zużycia energii oraz ograniczenie problemu nadmiaru składowanych odpadów budowlanych. Wynika to głównie z faktu, że RA wykorzystywane w RAC pochodzą z rozdrobnionych, oczyszczonych i przesortowanych fragmentów betonu odpadowego, które następnie są mieszane zgodnie z określoną krzywą uziarnienia [8]. Niemniej jednak efektywność betonu z takim kruszywem (RAC) w dużej mierze zależy od jego jakości. Z uwagi na wysoką nasiąkliwość i niską wytrzymałość mechaniczną recyklingowanego kruszywa, jego wykorzystanie w praktycznych zastosowaniach inżynierskich pozostaje ograniczone [9].

Zastosowanie kruszywa z recyklingu w betonie geopolimerowym przyczynia się do zmniejszenia zużycia surowców naturalnych oraz emisji CO₂. Wong (2022), [10] oraz Pawluczuk i in. 2021 [11] wykazali, że właściwości mechaniczne geopolimerów takie, jak wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości, mogą być porównywalne z betonem tradycyjnym, pod warunkiem odpowiedniej modyfikacji składu mieszanki i obróbki kruszywa z recyklingu. Zwrócili oni uwagę RCA uszczelnia mikrostrukturę kompozytu, co wpływa na poprawę ich właściwości. Dodatkowo [12] przeprowadzona analiza cyklu życia (LCA) wykazała znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z konwencjonalnym betonem. Biochar, jako produkt termicznej degradacji biomasy w warunkach beztlenowych, zyskuje na znaczeniu jako dodatek do kompozytów budowlanych ze względu na porowatą strukturę, zdolność do sekwestracji węgla oraz właściwości pucolanowe. Piccolo i in. (2021) [13] zsyntetyzowali lekkie materiały geopolimerowe zawierające biochar, wykazując poprawę właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na zginanie i ściskanie, a także redukcję gęstości kompozytu.

Integracja zarówno kruszywa z recyklingu, jak i biocharu w geopolimerach może przynieść synergiczne korzyści środowiskowe i techniczne. Jednocześnie, jak zauważają autorzy cytowanych prac, niezbędne są dalsze badania mające na celu optymalizację proporcji i sposobów aplikacji tych komponentów w celu maksymalizacji ich efektywności.

Badania wykazały, że zastąpienie naturalnego kruszywa RCA w geopolimerowym betonie prowadzi do obniżenia wytrzymałości na ściskanie. Na przykład, w badaniu przeprowadzonym przez Lyu i in. (2023) [14] stwierdzono, że zwiększenie zawartości RCA powoduje stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie, a także modułu sprężystości. Moduł sprężystości był najbardziej

podatny na zmiany, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie ulegała najmniejszemu spadkowi. Zwiększona zawartość RCA wiązała się również z wyższą absorpcją wody i zmniejszoną odpornością na przenikanie jonów chlorkowych, korozję siarczanową, działanie kwasów, mrozoodporność i karbonatyzację w betoniegeopolimerowym. Integracja RCA tworzy bardziej złożone strefy przejściowe w geopolimerowym betonie, co skutkuje zmniejszoną wytrzymałością wiązania i luźniejszą, bardziej porowatą mikrostrukturą. Rodzaj biocharu, w tym temperatura pirolizy i rodzaj biomasy, ma istotny wpływ na właściwości geopolimerów. Badania wykazały, że biochar wytworzony w wyższych temperaturach pirolizy (np. 500°C) może prowadzić do większej poprawy wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z biocharem wytworzonym w niższych temperaturach [15].

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz zmian mikrostrukturalnych geopolimerów na bazie popiołu lotnego, z dodatkiem kruszywa z recyklingu gruzu betonowego i biokarbonizatu, dojrzewających w warunkach laboratoryjnych oraz poddanych przyspieszonej karbonatyzacji w atmosferze CO₂.

2. Materiały i metody

Geopolimery przygotowano na bazie popiołu lotnego (PL) klasy F z Elektrowni Ostrołęka. Zawartość ważniejszych tlenków (PL) przedstawia się następująco: SiO₂ (54,6%), w tym reaktywna SiO₂ (42,36%), Al₂O₃ (25,3%), CaO (2,14%), w tym reaktywne CaO (1,84%), straty prażenia (4,37%), i inne.

Jako kruszywa użyto normowego piasku kwarcowego 0-2 mm wg PN-EN 196-1 oraz kruszywa z recyklingu gruzu betonowego 1-2 mm, które powstało z przekruszenia zapraw cementowych na CEM I 42,5 R i współczynnika w/c=0.5. Wykorzystano domielony do frakcji <0,063 mm biokarbonizat SS550 [16], który pochodził z pirolizy osadów ściekowych. Do aktywacji zastosowano mieszaninę Na₂SiO₃/8M NaOH w stosunku wagowym 2,5:1. Wykonano 8 serii zapraw geopolimerowych w formach 4x4x16 cm. Wszystkie próbki geopolimerów najpierw utwardzano przez 24 h w temperaturze 65°C. Po rozformowaniu jedna część próbek dojrzewała w warunkach laboratoryjnych, a drugą poddano karbonatyzacji przy ciśnieniu 5 atmosfer czystego CO₂ przez 24 h. Wykonane serie geopolimerów i ich skład, a także warunki dojrzewania zawarto w Tabeli 1. Przeprowadzono następujące badania kompozytów geopolimerowych: wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 196-1, skład fazowy metodą XRD, głębokości karbonatyzacji wg PN-EN 12390-12 i pomiaru zdolności sekwestracji CO₂ (w odniesieniu do przyrostu masy po ekspozycji). Ilość zabsorbowanego przez zaprawę CO₂, wyrażoną ułamkiem masowym w procentach, obliczono według równania:

$$\%CO_2 = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

w którym:

m₁ – masa badanej próbki po procesie sekwestracji CO₂, g

m₀ – początkowa masa badanej próbki, g

Szybkość karbonatyzacji została określona poprzez obliczenie nachylenia dopasowanej linii przy użyciu następującego równania:

$$d_k = a + K_{AC} \times \sqrt{t}$$

gdzie (mm) to (mm) to a

w którym:

d_k – średnia głębokość karbonatyzacji w czasie t (dni), mm

a – stała reprezentująca punkt przecięcia osi y, mm

K_{AC} - szybkość karbonatyzacji, mm·dzień^{-0,5}

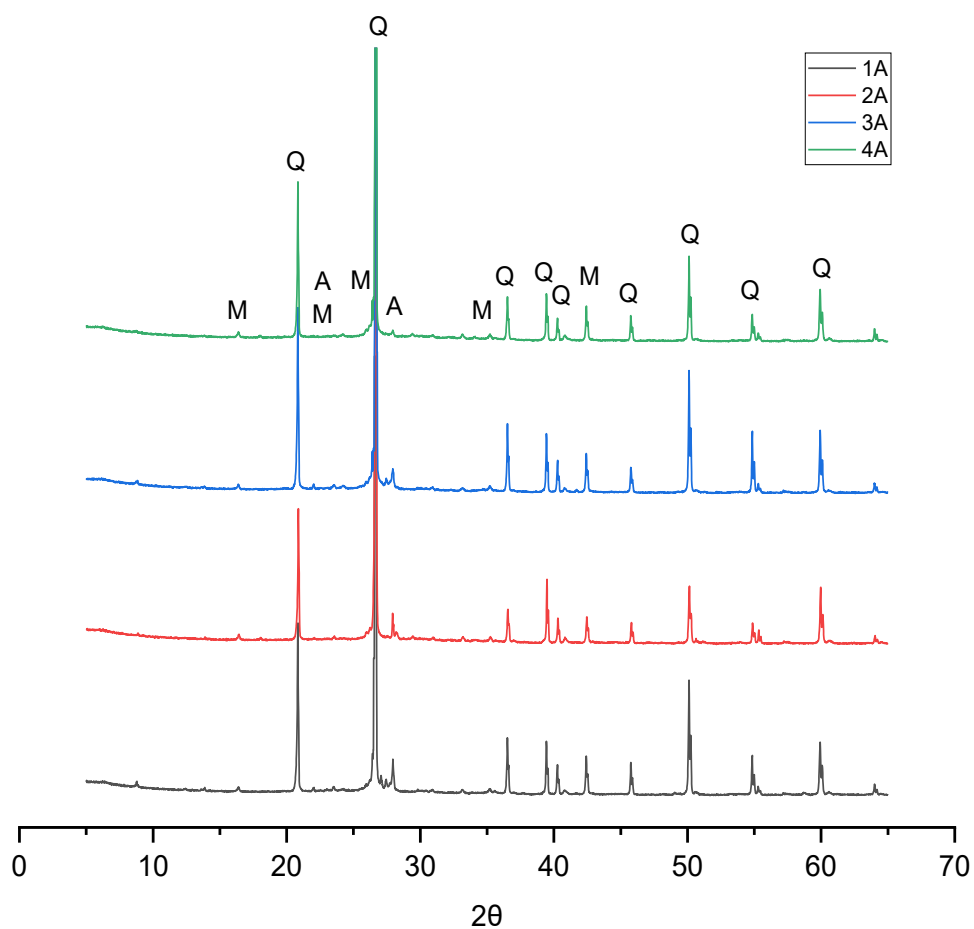
Wyniki badań i ich analiza

W Tabeli 1. Przedstawiono skład wykonanych serii geopolimerów przeznaczonych do badań.

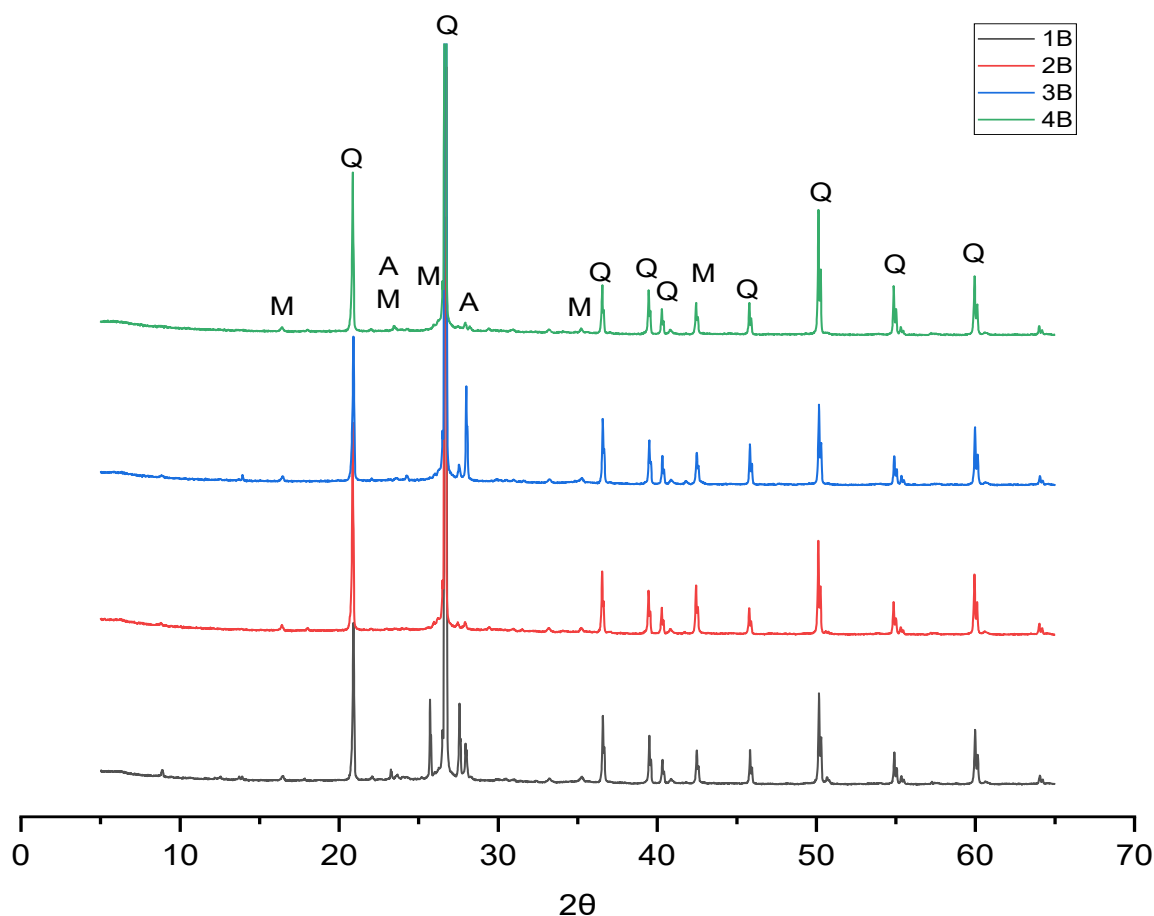
Tabela 1. Skład i opis przygotowanych kompozytów geopolimerowych na 12 próbek 4/4/16 cm

Składniki (skład na 12 bele- czek 4/4/16 cm)	SE- RIA IA	SE- RIA IIA	SE- RIA III A	SE- RIA IVA	SERIA IB karbo- natyza- cja	SERIA IIB karbo- natyza- cja	SERIA III B karbo- naty- zacja	SERIA IVB karbo- natyza- cja
jednostka	g							
kruszywo naturalne, piasek 0-2 mm	5 400	3 584	5 400	3 584	5 400	3 584	5 400	3 584
kruszywo z recy- klingu (1-2 mm)	-	1 515	-	1 515	-	1 515	-	1 515
popiół lotny	1 800	1 800	1 620	1 620	1 800	1 800	1 620	1 620
Biochar	-	-	180	180	-	-	180	180
Aktywator Na ₂ SiO ₃ /8 M NaOH	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500

W celu identyfikacji i porównania faz krystalicznych występujących w próbkach geopolimerowych zawierających składniki recyklingowe, przeprowadzono analizę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) dla ośmiu próbek materiałowych. Próbkę oznaczoną jako seria A (1A–4A) nie zostały poddane karbonatyzacji, natomiast ich odpowiedniki z serii B (1B–4B) zostały poddane kontrolowanemu procesowi karbonatyzacji. Widma dyfrakcyjne przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2.



Rys.1. XRD próbek geopolimerowych dojrzewających w suszarce laboratoryjnej, a następnie w warunkach laboratoryjnych

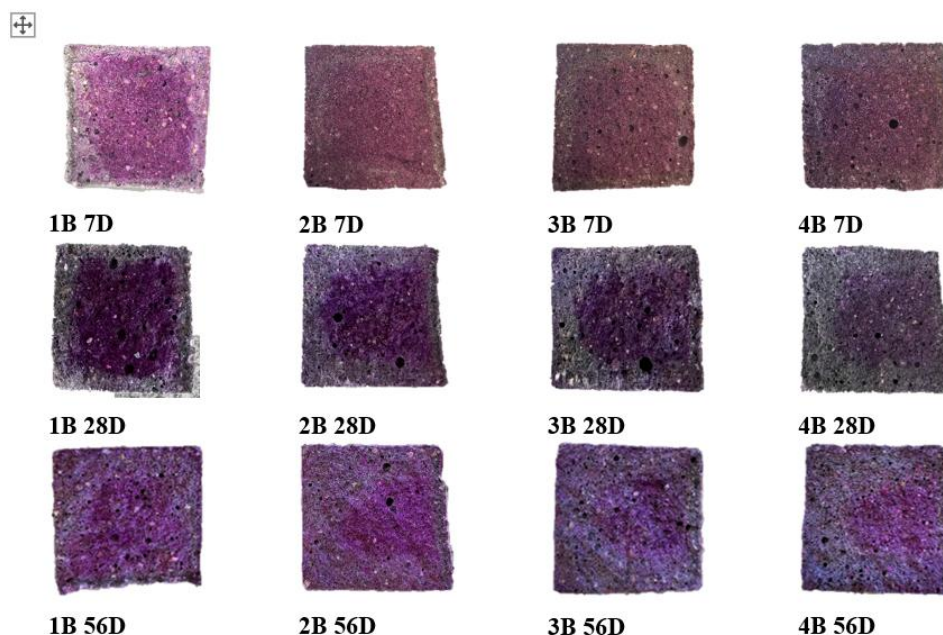


Rys.2. XRD próbek geopolimerowych dojrzewających w suszarce laboratoryjnej, a następnie w komorze karbonatyzacyjnej

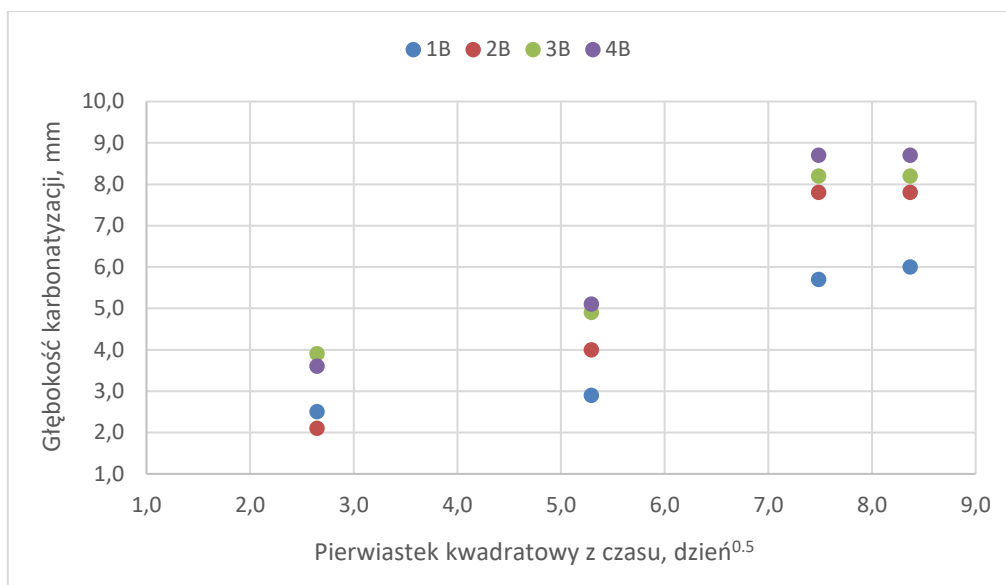
Jak zaobserwowano na Rys.1.i Rys.2. dominującymi fazami krystalicznymi są mullit i kwarc. Pierwszy z nich—został rozpoznany po charakterystycznych odległościach międzypłaszczyznowych d_{hkl} 3,39; 3,42; 5,37Å, drugi natomiast po d_{hkl} 3,34; 4,25; 2,13Å. Na wszystkich analizowanych dyfraktogramach rozpoznano również obecność zeolitu o typie struktury gismondytu. Został on zidentyfikowany po najmocniejszych refleksach d_{hkl} 10,00; 4,27; 3,34; 3,19 i 3,13Å. Jego powstanie ściśle związane jest reakcją szkliwa glinokrzemianowego obecnego w popiołach lotnych z aktywatorem ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/8 \text{ NaOH}$). Skład mineralny uzupełniają niewielkie ilości kalcytu, który w próbkach poddanych karbonatyzacji wykrył się w głównej mierze na powierzchniach zewnętrznych otrzymanych geopolimerów. Na jego obecność wskazują na dyfraktogramach piki d_{hkl} 3,03; 3,86; 2,28; 2,09 Å. We wszystkich próbkach zaobserwowano obecność intensywnych pików odpowiadających kwarcowi (SiO_2) (około $26^\circ 2\theta$), który stanowi dominującą fazę krzemionkową obecną w popiele lotnym oraz kruszywach naturalnych i z recyklingu. W obszarze około $29^\circ 2\theta$ występują silne sygnały charakterystyczne dla kalcytu (CaCO_3), których intensywność istotnie wzrasta w próbkach po karbonatyzacji, co jednoznacznie potwierdza przebieg tego procesu. W próbkach serii A, szczególnie 1A i 2A, zaobserwowano obecność portlandytu (Ca(OH)_2), rozpoznawalnego w zakresie 18° i $34^\circ 2\theta$.

Próbki 2A i 4A, w których część kruszywa naturalnego została zastąpiona kruszywem z recyklingu, wykazują zwiększoną obecność kalcytu i kwarcu, co może wynikać z pozostałości zaprawy cementowej na powierzchni kruszywa wtórnego. Dodatek biocharu, obecny w próbkach 3A i 4A, wpływa na ogólną strukturę materiału, co przejawia się zwiększonym udziałem faz amorficznych oraz poszerzeniem pasm w zakresie $20^\circ - 35^\circ 2\theta$. Efekt ten może być związany z powierzchniową adsorpcją jonów oraz interakcją z układem aktywatora zasadowego, co opisywano wcześniej m.in. w pracach Xu i van Deventer [4]. W serii B, wszystkie próbki wykazują istotnie większą intensywność sygnału kalcytu, co potwierdza ich karbonatyzację. Uzyskane wyniki XRD potwierdzają, że zarówno skład surowcowy, jak i proces karbonatyzacji wpływają na skład fazowy otrzymanych materiałów. Dodatki w postaci kruszywa z recyklingu oraz biocharu wpływają na przemiany mineralogiczne i mogą poprawiać stabilność chemiczną geopolimerów.

Wizualną ocenę głębokości karbonatyzacji przeprowadzono poprzez nałożenie roztworu wskaźnika pH (fenoloftaleiny) na świeżo oddzielone powierzchnie próbek (Rysunek 3). Wyniki zależności między głębokością karbonatyzacji a pierwiastkiem kwadratowym z czasu przedstawiono na Rysunku 4.



Rys.3. Przekroje próbek geopolimerów poddanych karbonatyzacji



Rysunek 4. Głębokość karbonatyzacji próbek zapraw geopolimerów (wskaźnik pH – fenoloftaleina).

Największą zdolnością sekwestracyjną charakteryzowały się próbki z serii ,3B, 2B,4B kolejno(0,35-0,66%), a najmniejszą próbka z serii 1B (0,22%) – Tabela 2. Wyniki analizy regresji przeprowadzonej z wykorzystaniem obserwowanych pomiarów głębokości karbonatyzacji w różnych okresach czasu dla zapraw geopolimerów przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 2. Ilość zabsorbowanego przez zaprawy dwutlenku węgla.

Próbka/Seria	CO ₂ , %
1B	0,22
2B	0,46
3B	0,35
4B	0,65

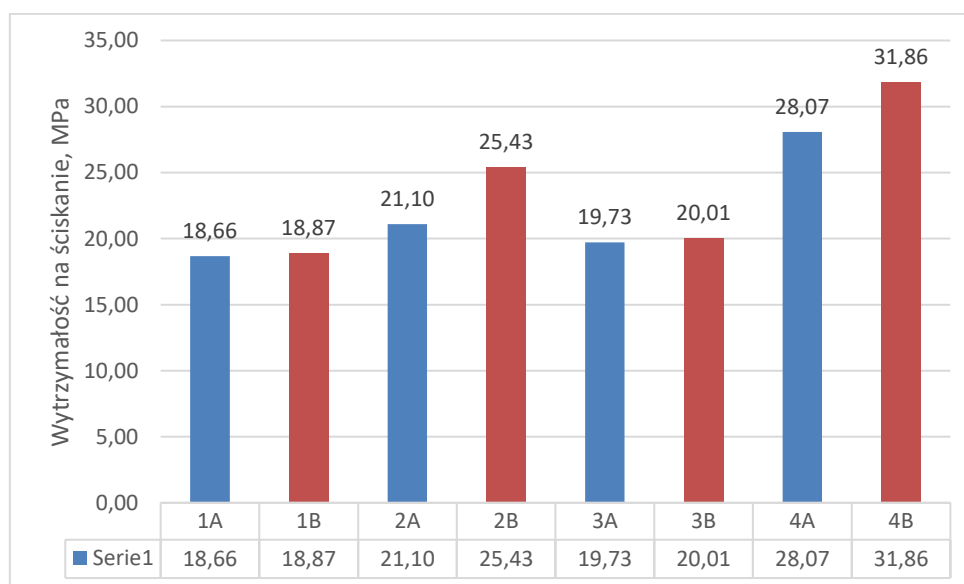
Tabela 3. Wyniki analizy regresji przeprowadzonej z wykorzystaniem obserwowanych pomiarów głębokości karbonatyzacji w różnych okresach czasu dla zapraw geopolimerów (wskaźnik pH – fenoloftaleina).

Parametr	1B	2B	3B	4B
K _{AC} (mm·dzień ^{-0,5})	0,67	1,09	0,84	0,98

R^2	0,87	0,95	0,92	0,94
-------	------	------	------	------

Wartości R^2 wahały się od 0,80 do 0,95, wskazując na dobry lub doskonały poziom dokładności w procesie dopasowania. Wyniki wskazują, że stopień karbonatyzacji wynoszący $1,09 \text{ mm} \cdot \text{dzień}^{-0,5}$ obserwowany w zaprawie 2B był najwyższy, podczas gdy zaprawa 1B charakteryzowała się najniższym stopniem karbonatyzacji wynoszącym $0,67 \text{ mm} \cdot \text{dzień}^{-0,5}$. Po 70 dniach ekspozycji, zaprawa 4B charakteryzowała się głębokością karbonatyzacji równą 8,7 mm, o 45% większą w porównaniu do zaprawy 1B (6,0 mm), (Rysunek 3).

Na Rysunku 5. przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie kompozytów geopolimerowych



Rysunek 5. Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek geopolimerowych po 28 dniach dojrzewania

Uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie mieszczą się w zakresie od 18,87 MPa (1B) do 31,86 MPa (4B). Zauważalny jest wyraźny trend wzrostowy wynikający z zastosowania dodatków recyklingowych oraz modyfikatorów organicznych. Seria 1B (referencyjna) uzyskała najniższy wynik wytrzymałości na ściskanie, co potwierdza ograniczoną wytrzymałość geopolimeru bazowego opartego jedynie na kruszywie naturalnym i popiele lotnym. Seria 2B z kolei, zawierająca dodatkowo kruszywo z recyklingu, wykazała wyraźny wzrost wytrzymałości do poziomu 25,43 MPa, co sugeruje korzystny wpływ materiału wtórnego.

Kompozyty geopolimerowe zawierające biokarbonizat (Seria 3B) jako dodatek, osiągnęła wartość 20,01 MPa, co wskazuje na umiarkowany, lecz pozytywny efekt wprowadzenia modyfikatora organicznego. Biochar, dzięki dużej powierzchni właściwej i porowatej strukturze, może poprawiać mikrostrukturę matrycy wiążącej oraz uczestniczyć w wiązaniu jonów wapniowych.

Najwyższą wartość wytrzymałości uzyskano dla serii 4B – 31,86 MPa, co potwierdza synergiczny efekt zastosowania zarówno kruszywa z recyklingu, jak i biokarbonizatu. Połączenie tych składników skutkuje wzmocnieniem strukturalnym materiału, co może wynikać zarówno z efektów fizycznych (redukcja pustek, lepsze wypełnienie) jak i chemicznych (lepsze sieciowanie struktur polimerycznych oraz wiązanie jonów Ca^{2+} i Na^+). Należy przeprowadzić bardziej zaawansowane testy mikrostrukturalne (SEM oraz analizę rozkładu porów przed i po karbonatyzacji).

Wnioski

Jak wykazały wyniki przeprowadzonych badań, zastosowanie do geopolimerów kruszyw z recyklingu i biokarbonizatu powoduje polepszenie parametrów fizyczno-mechanicznych kompozytów: wyższą wytrzymałość na ściskanie i zginanie, niższą nasiąkliwość oraz wyższą gęstość objętościową. Dodatkowo obecność tych składników sprzyja pochłanianiu CO_2 z atmosfery, co również wpływa na poprawę wyżej wymienionych właściwości kompozytów. Przeprowadzone badania mikrostrukturalne (dyfraktometria rentgenowska) potwierdzają, że zmieniająca się w wyniku powstawania węglanu wapnia struktura geopolimerów jest bardziej szczelna, modyfikacji ulega także rodzaj i średnica porów, co skutkuje polepszeniem parametrów wytrzymałościowych geopolimerów, a dalej poprawą ich trwałości. W naturalnym cyklu życia produktu pochłanianie CO_2 z atmosfery będzie wpływało na korzyść parametrów użytkowych geopolimerów na bazie materiałów odpadowych, co może być istotną alternatywą dla betonów cementowych na składnikach naturalnych i doskonałym rozwiązaniem pod względem realizacji celów zrównoważonego rozwoju.

Literatura

- [1] Miśkiewicz J. i Łach M. (2014). Wytwarzanie i właściwości geopolimerów na bazie tufu wulkanicznego. *Inżynieria Materiałowa*, Nr 35 (3), 270-276.
- [2] Wyrzykowski, M., Toropovs, N., Winnefeld, F., Lura, P. (2024). Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140008>
- [3] Liang, C., Pan, B., Ma, Z., He, Z., Duan, Z. (2020). Utilization of CO_2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103446. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>
- [4] Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*, 15(3), 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>
- [5] Zhang, P.; Han, X.; Hu, S.; Wang, J.; Wang, T. High-temperature behavior of polyvinyl alcohol fiber-reinforced metakaolin/fly ash-based geopolymer mortar. *Compos. Part B-Eng.* 2022, 244, 110171

- [6] Ren, R.; Li, L. Impact of polyethylene fiber reinforcing index on the flexural toughness of geopolymer mortar. *J. Build. Eng.* 2022, 57, 104943).
- [7] Zhang, H.; Xiao, J.; Tang, Y.; Duan, Z.; Poon, C. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. *Cem. Concr. Compos.* 2022, 130, 104527
- [8] Junak, J.; Sicakova, A. Concrete containing recycled concrete aggregate with modified surface. *Procedia Eng.* 2017, 180, 1284–1291
- [9] Feng, C.; Cui, B.; Huang, Y.; Guo, H.; Zhang, W.; Zhu, J. Enhancement technologies of recycled aggregate—Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment. *Constr. Build. Mater.* **2022**, 317, 126168
- [10] Wong, L. S. (2022). Durability Performance of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers*, 14(5), 868. <https://doi.org/10.3390/polym14050868>
- [11] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jimenez, J. R., Rodriguez, J. M. F., & Suescum-Morales, D. (2021). Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behaviour. *Journal of Building Engineering*, 44, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103317>
- [12] Gopalakrishna B.; Pasla D., Durability Performance of Recycled Aggregate Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag; 2024, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 36, Issue 4, <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17067>
- [13] Piccolo, F., Andreola, F., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2021). Synthesis and Characterization of Biochar-Based Geopolymer Materials. *Applied Sciences*, 11(22), 10945. DOI: 10.3390/app112210945MDPI+1PMC+1
- [14] Lyu, S., Xiao, J., Singh, A., & Ye, T. (2023). *The influence of recycled aggregate on the properties of geopolymeric recycled concrete: A comprehensive review*. *Journal of Asian Concrete Federation*, 9(4), 1–16. DOI: [10.1007/s41062-023-00800-3](https://doi.org/10.1007/s41062-023-00800-3)
- [15] Gupta, S.; Kashani, A.; Mahmood, A.H.; Han, T. Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash—Effect on mechanical and durability properties. *Constr. Build. Mater.* **2021**, 291, 123363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123363>
- [16] https://www.biochar.ac.uk/standard_materials.php