

Mgr inż. Marta Mucha

Betoniarnie ODRA Sp. z o.o.

Dr inż. Magdalena Oleśków

Cementownia ODRA S.A.

Dr hab. Elżbieta Janowska-Renkas, Profesor Uczelni

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Politechnika Opolska

Dr inż. Piotr Podkowa

Cementownia ODRA S.A.

Beton na fali – innowacyjne zastosowanie betonu

CONCRETE ON THE WAVE - INNOVATIVE APPLICATIONS OF CONCRETE

Streszczenie

W odpowiedzi na zaproszenie do udziału w ogólnopolskim konkursie Krakow Concrete Canoe Challenge 2025, grupa studentów z Koła Naukowego „Eko Mat-Bud”, działającego przy Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej, podjęła decyzję o realizacji ambitnego projektu – budowy kajaków z betonu. Grupa Odra Cement włączyła się w tą inicjatywę stając się partnerem technologicznym tego niezwykłego przedsięwzięcia. Artykuł przedstawia prace związane z wykonaniem form, które posłużyły do budowy betonowych kajaków, jak również badania mechaniczne betonu, które były niezbędne do opracowania receptur zastosowanych do budowy łodzi betonowych. Dzięki projektowi uczestnicy rozwinęli kompetencje w zakresie zielonych technologii, pracy zespołowej, organizacji procesów technologicznych i zarządzania projektem, co stanowi cenny wkład w kształtowanie przyszłych specjalistów świadomych wyzwań klimatycznych.

Abstract

In response to an invitation to take part in the nationwide Krakow Concrete Canoe Challenge 2025 competition, a group of students from the 'Eko Mat-Bud' Scientific Circle, operating at the Department of Construction Materials Engineering of the Faculty of Construction and Architecture of the Opole University of Technology, decided to implement an ambitious project - the construction of concrete canoes. The Odra Cement Group joined this initiative by becoming a technological partner in this unusual undertaking. This article presents the work involved in making the moulds that were used to build the concrete canoes, as well as the mechanical testing of the concrete that was necessary to develop the recipes used to build the concrete boats. Through the project, the participants developed competences in green technology, teamwork, process organisation and project management, making a valuable contribution to shaping future climate-conscious professionals.

1. Wprowadzenie

Beton to materiał powszechnie kojarzony z budownictwem. Z betonu wykonuje się drogi, mosty, budynki czy zbiorniki retencyjne, które są częścią naszej codziennej przestrzeni. Dzięki swojej wyjątkowej wytrzymałości i trwałości beton od lat stanowi niezastąpiony materiał konstrukcji budowlanych. Jednak czy kiedykolwiek zastanawialiśmy się, czy beton może zostać wykorzystany w sposób zupełnie niekonwencjonalny, w dziedzinie, która nie ma nic wspólnego z przemysłem budowlanym? A co, jeśli beton mógłby...pływać?

Zgodnie z przekazami historycznymi [7], już w 1848 roku Joseph-Louis Lambot jako pierwszy zastosował połączenie betonu ze zbrojeniem, konstruując barkę, którą następnie zaprezentował na wystawie światowej w Paryżu w 1855 roku. Była to prototypowa łódź wykonana z żelazobetonu (czyli betonu wzmocnionego metalowym zbrojeniem). Lambot zbudował ją, aby udowodnić, że taki materiał nadaje się również do konstrukcji narażonych na działanie wody. Co ciekawe, ta barka przetrwała do dziś a jej szczątki znajdują się w Musée du Conservatoire National des Arts et Métiers w Paryżu. To dowód na trwałość i skuteczność żelazobetonu.



Rys. 1. Żelazocementowa łódź Josepha Lambota w muzeum Brignoles [7]

W obecnych czasach odpowiedzią na pytanie jest innowacyjny projekt zrealizowany we współpracy Politechniki Opolskiej z Grupą Odra Cement, którego efektem są prototypowe kajaki wykonane z betonu. Te wyjątkowe konstrukcje nie tylko spełniają wymagania wytrzymałościowe, ale także zaskakują lekkością i funkcjonalnością.

Celem projektu było opracowanie receptury mieszanki betonowej o podwyższonych parametrach wytrzymałości na ściskanie i zginanie, przy jednoczesnym obniżeniu masy objętościowej oraz zwiększeniu szczelności. Dodatkowym, ale również istotnym, założeniem była redukcja śladu węglowego betonu poprzez wykorzystanie materiałów odpadowych. Rezultatem prac są kajaki, które nie tylko z powodzeniem utrzymują się na wodzie, lecz także dają realną szansę na osiągnięcie sukcesu w prestiżowych zawodach łodzi betonowych.

Autorami projektu są studenci z Koła Naukowego „Eko Mat-Bud”, działającego przy Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych wspierani przez pracowników Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej. Zespół, pod opieką dr hab. Elżbiety Janowskiej-Renkas przygotowuje się do udziału w międzynarodowym konkursie „Krakow Concrete Canoe Challenge 2025”. Rywalizacja ta jest okazją nie tylko do sprawdzenia wytrzymałości fizycznej i kondycji, ale przede wszystkim do zaprezentowania kreatywnego podejścia do wykorzystania materiałów budowlanych w niekonwencjonalny sposób.

2. Wymagania projektowe

Projekt realizowano zgodnie z regulaminem konkursu, który określał dopuszczalne rozmiary kajaka oraz zasady doboru materiałów konstrukcyjnych.

Kajak musiał mieć długość od 4,0 do 6,0 m, a maksymalna szerokości i wysokość nie mogły przekroczyć 1,0 m.

Materiały wykorzystywane w projekcie musiały odpowiadać założeniom zrównoważonego budownictwa:

- dopuszczalne były wyłącznie betony cementowe lub niskoklinkierowe spoiwa mineralne;
- skład mieszanki mógł zawierać nie więcej niż 3% substancji organicznych (np. superplastyfikatorów);
- zastosowanie żywic lub farby dopuszczono jedynie w celach dekoracyjnych, powyżej linii wody;
- konstrukcja mogły być wzmacniana włóknami, tekstyliami lub prętami zbrojeniowymi, pod warunkiem że nie będą wpływać na szczelność kajaka.

3. Charakterystyka mieszanki betonowej

Do opracowania mieszanki wykorzystano cement portlandzki żuźlowy klasy 42,5, granulowany żużel pomiedziowy i wielkopiecowy, perlit, szkło piankowe, pył krzemionkowy, nanokrzemionkę oraz domieszkę uplastyczniającą. W celu zwiększenia odporności mechanicznej mieszanka została wzmocniona siatką podtynkową z włókna szklanego, co przyczyniło się do poprawy wytrzymałości betonu na zginanie i zwiększyło jego odporność na uszkodzenia powstałe w trakcie użytkowania.

3.1. Cement CEM II/A-S 42,5 R

W projekcie zastosowano cement portlandzki z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego, charakteryzujący się szybkim przyrostem wytrzymałości, dobrą urabialnością oraz niższym śladem węglowym w porównaniu do czystego klinkieru (Tab. 1).

Tabela 1. Właściwości cementu CEM II/A-S 42,5 R

Parametr	Wartość
Powierzchnia właściwa (wg Blaine'a)	4 660 cm ² /g
Początek wiązania	245 min
Koniec wiązania	315 min
Woda zarobowa	26,0 %
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	26,7 MPa
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	52,5 MPa
Wytrzymałość na zginanie po 2 dniach	4,6 MPa
Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach	7,5 MPa

3.2. Granulowany żużel wielkopiecowy

Jako dodatek o właściwościach hydraulicznych zastosowano granulowany żużel wielkopiecowy z huty ArcelorMittal Krzywy Róg, o współczynnikach zasadowości i aktywności kwalifikujących go do grupy materiałów zasadowych o średniej aktywności (Tab. 2). Materiał ten poddano mieleniu w przemysłowym młynie pionowym, co jak wykazały badania, zwiększyło jego aktywność hydrauliczną i pozytywnie wpłynęło na przyrost (zwiększenie) wytrzymałość betonu. Proces hydratacji granulowanego żużla jest procesem mającym swój początek na powierzchni jego ziaren, zatem rozwinięcie powierzchni uzyskane w procesie mielenia będzie miało wpływ na jego aktywność mierzoną efektywnością tego procesu. W zależności od rodzaju zastosowanego młyna żużel posiada różny skład ziarnowy. Zaprawy wykonane w oparciu o żużel zmielony w młynie pionowym w dłuższych okresach twardnienia charakteryzują się wyższą wytrzymałością na ściskanie w porównaniu do zapraw wykonanych w oparciu o żużel zmielony w młynie kulowym. Efekt ten dotyczy każdej klasy ziarnowej. Im dłuższy czas dojrzewania próbek tym różnice pomiędzy wynikami w danej frakcji ziarnowej są większe [4].

Tabela 2. Właściwości granulowanego żużla wielkopiecowego

Parametr	Wartość
Powierzchnia właściwa (wg Blaine'a)	4 560 cm ² /g
Moduł zasadowy	1,04
Moduł aktywności	1,43
CaO+MgO+SiO ₂	88,8%
(CaO+MgO)/SiO ₂	1,24
Zawartość fazy szklistej	88%

3.3. Granulowany żużel pomiedziowy

Dodatkowo zastosowano żużel pomiedziowy pochodzący z Huty KGHM Polska Miedź S.A., charakteryzujący się dobrymi właściwościami pucolanowymi i bardzo wysokim stopniem zeszklenia (100%, Tab. 3).

Tabela 3. Właściwości granulowanego żużla pomiedziowego

Parametr	Wartość
Powierzchnia właściwa (wg Blaine'a)	3 840 cm ² /g
Wskaźnik aktywności po 28 dniach wg PN-EN 450-1	92%
Wskaźnik aktywności po 90 dniach wg PN-EN 450-1	103%
Zawartość fazy szklistej	100%

Przeprowadzone w pracy [3] badania wykazały, że stopień rozdrobnienia dodatku mineralnego istotnie wpływa na efektywność działania superplastyfikatora: w przypadku żużla wielkopiecowego wzrost udziału frakcji drobnych (<20 µm) prowadził do wyraźnego obniżenia parametrów reologicznych zaczynu. W związku z powyższym

żużel został poddany procesowi mielenia w młynie kulowym. Ze względu na jego korzystny wpływ na urabialność mieszanki betonowej oraz zdolność do poprawy wytrzymałości na ściskanie [2], zdecydowano się na jego zastosowanie jako częściowego zamiennika cementu.

3.4. Perlit

Zastosowano perlit ekspandowany EP 150, lekkie kruszywo mineralne stosowane jako wypełniacz w mieszankach budowlanych. Materiał cechuje się bardzo niskim ciężarem nasypowym, co pozwala skutecznie obniżyć gęstość betonu [5]. Wybrane parametry techniczne perlitu zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Właściwości perlitu

Parametr	Wartość
Ciężar nasypowy	75 kg/m ³
Uziarnienie	0 – 1,25 mm
Wytrzymałość na ściskanie	0,14 – 0,40 MPa
Wilgotność	< 2,0%

3.5. Szkło piankowe

Zastosowano szkło piankowe powstałe z rozdrobnionej i zmielonej stłuczki szklanej, którą miesza się z środkiem spieniającym i poddaje się ogrzewaniu w specjalnym piecu. Szkło piankowe jest nieorganicznym materiałem, odpornym na działanie wszystkich substancji chemicznych oraz organicznej i nieorganicznej przyrody. Jest to materiał ekologiczny, ponieważ jest w pełni recyklingowalny i nie emituje szkodliwych substancji.

Tabela 5. Właściwości szkła piankowego

Parametr	Wartość
Zawartość SiO ₂	71,7%
Zawartość Al ₂ O ₃	2,5%
Ciężar właściwy	4,2 g/cm ³

3.6. Pył krzemionkowy

Ponadto stosowano pył krzemionkowy jako drobnoziarnisty produkt uboczny powstający przy produkcji krzemków i stopów krzemu. Charakteryzuje się on wysoką zawartością dwutlenku krzemu (SiO₂) oraz bardzo małą średnicą ziaren, nawet 100 razy mniejszą niż ziarna cementu (tab. 6). Dzięki temu efektywnie wypełnia wolne przestrzenie w mieszance, poprawiając właściwości mechaniczne betonu, w tym wyraźnie zwiększając jego wytrzymałość na zginanie [1], oraz znacząco podnosząc jego trwałość.

Tabela 6. Właściwości pyłu krzemionkowego

Parametr	Wartość
Zawartość SiO ₂	95%
Wielkość cząstek	0,1 – 0,2 µm
Ciężar nasypowy	550 – 750 kg/m ³
Wilgotność	< 2,0%

3.7. Domieszka uplastyczniająca

W projekcie użyto domieszki upłynniającej o działaniu znacznie redukującym ilość wody RemCAST M230 produkcji firmy war – Remedium Sp. z o.o.

3.8. Nanokrzemionka hydrofilowa HI

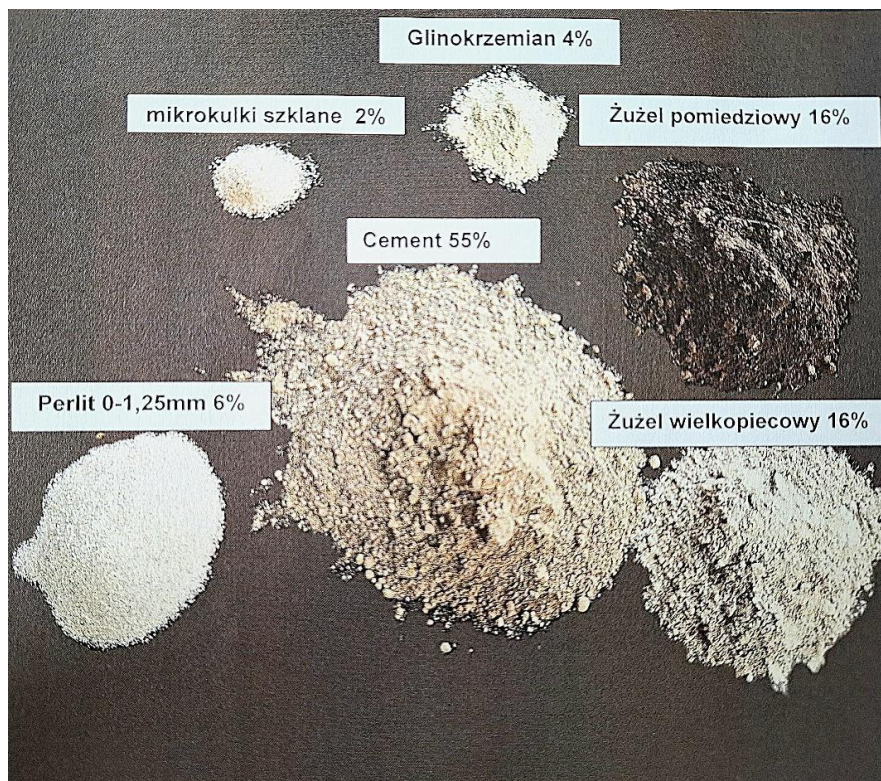
Do wykonania mieszanek betonowych stosowano wodny roztwór koloidu nanokrzemionki hydrofilowej z domieszką nanosrebra (HI) w ilości 1% w stosunku do masy cementu.

3.9. Skład mieszanki betonowej

Spośród kilkunastu zaprojektowanych i przetestowanych wariantów mieszanki betonowej, po analizie ich parametrów wytrzymałościowych (wytrzymałości na zginanie i ściskanie) oraz technologicznych, takich jak urabialność, konsystencja i jednorodność mieszanki, wybrano dwie optymalne receptury. Skład obu receptur został zoptymalizowany pod kątem wymagań konkursowych, takich jak: ekologiczność, szczelność, lekkość, oraz odporność na obciążenia mechaniczne. Zestawienie składników obu receptur przedstawiono w tabeli 7, oraz pokazano na rys. 2.

Tabela 7. Skład mieszanek betonowych wykorzystanych do wykonania konkursowych kajaków

Składnik		Receptura 1	Receptura 2
CEM II/A-S 42,5 R	kg/m ³	680	600
Granulowany żużel wielkopiecowy	kg/m ³	200	100
Granulowany żużel pomiedziowy	kg/m ³	200	100
Perlit	kg/m ³	77	106
Szkło piankowe	kg/m ³	34	30
Pył krzemionkowy	kg/m ³	50	30
Domieszka upłynniająca	kg/m ³	13,6	12
Nanokrzemionka hydrofilowa HI	kg/m ³	6,8	6,0
Woda	l/m ³	405	415



Rys. 2. Zdjęcie przedstawiające procentowy udział składników dla Receptury 1

Dobór grubości ścianek i zbrojenia

Istotnym etapem było ustalenie optymalnej grubości ścianki betonowego kajaka, która bezpośrednio wpływała na jego wytrzymałość, masę oraz trwałość. Spośród kilku rozpatrywanych wariantów wybrano powłokę o grubości około 10 mm. Decyzja ta wynikała z konieczności uzyskania odpowiedniej sztywności i wytrzymałości, przy jednoczesnym zachowaniu możliwie małej masy konstrukcji.

Ze względu na niską wytrzymałość betonu na zginanie oraz jego naturalną kruchość, zdecydowano się na wzmocnienie powłoki sześcioma warstwami siatki z włókna szklanego. Włókno szklane cechuje się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, co znacznie poprawia odporność kompozytów betonowych na pękanie oraz uszkodzenia mechaniczne.

Wykonane zostały próbki kontrolne o wymiarach 160×40×10 mm, które zostały poddane badaniom wytrzymałości na zginanie po 7 i 28 dniach dojrzewania. Uzyskana wartość wytrzymałości po 7 dniach wyniosła 12,5 MPa, co odpowiada modułowi zginania charakterystycznemu dla betonu zbrojonego. Wynik ten potwierdza, że zastosowana mieszanka betonowa wraz ze wzmocnieniem z włókna szklanego spełnia wymagania dotyczące nośności i elastyczności, zapewniając odpowiednią trwałość oraz odporność konstrukcji na obciążenia eksploatacyjne.

4. Realizacja projektu

W ramach realizacji projektu wykonano dwa kajaki, wykorzystując odmienne metody formowania. Pierwszy kajak powstał w technologii pozytywowej, polegającej na

ręcznym uzupełnianiu wcześniej przygotowanej formy betonową mieszanką. Drugi kajak wykonano metodą negatywową, polegającą na ręcznym nakładaniu betonu na zewnętrzną powierzchnię formy wykonanej ze styroduru. Obie techniki różniły się zarówno podejściem do nakładania betonu, jak i zastosowaniem różnych receptur mieszanki, co znacząco wpłynęło na ostateczny kształt konstrukcji oraz jej parametry użytkowe, takie jak masa, zwrotność i stabilność na wodzie.

4.1. Formowanie kajaka w pozytywie

W niniejszym projekcie termin „formowanie w pozytywie” odnosi się do techniki ręcznego wypełniania uprzednio przygotowanej formy mieszanką betonową. Forma ta odwzorowuje kształt gotowego kajaka, a mieszanka betonowa nakładana do jej wnętrza tworzy od środka powłokę konstrukcyjną.

Do wykonania formy zastosowano beton konstrukcyjny klasy C30/37. Została ona zaprojektowana jako wieloczęściowa, co umożliwiło jej łatwe rozformowanie oraz bezpieczne wyjęcie modelu, nawet mimo zaokrąglonych burt i wypukłego rantu kajaka. W procesie tworzenia formy wykorzystano oryginalny kajak (Rys.3), który po wcześniejszym zabezpieczeniu folią zanurzono w świeżo przygotowanej mieszance betonowej. Po kilku dniach, gdy beton stwardniał, kajak został ostrożnie usunięty.

Wnętrze powstałej formy (Rys. 4) wyłożono następnie specjalnym systemem żywic stosowanych w budownictwie sanitarnym. Zapewniły one szczelność oraz gładką powierzchnię, co zapobiegało przywieraniu betonu podczas właściwego procesu formowania gotowego kajaka.



Rys. 3. Zdjęcie oryginalnego kajaka w formie



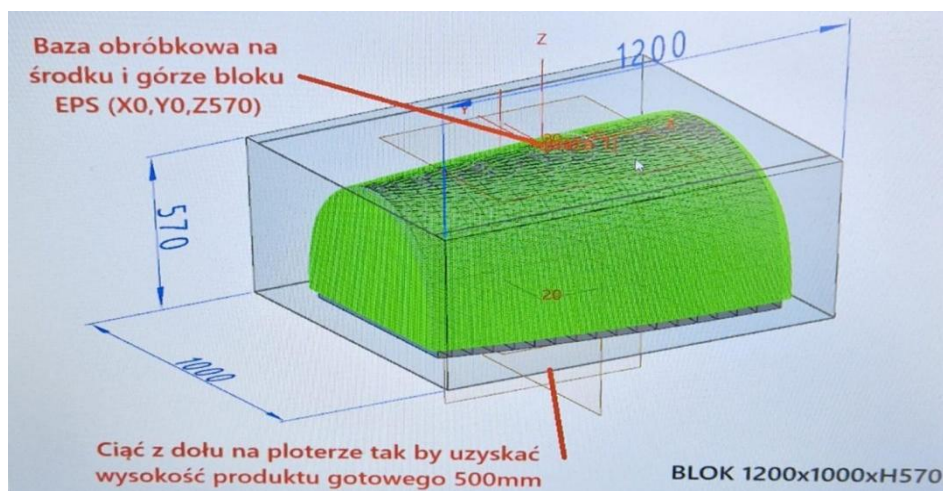
Rys. 4. Przygotowana forma

Do przygotowanej formy ręcznie nakładano mieszankę betonową przekładając każdą warstwę mieszanki, siatką z włókna szklanego. W trakcie nakładania kontrolowano grubość ścianek. Po ułożeniu 6 warstw siatki kajak został zabezpieczony folią, mającą na celu ochronę przed nadmiernym wysychaniem. Kajak dojrzewał w formie przez 7 dni, a następnie został przeniesiony w bezpieczne miejsce, gdzie kontynuowany był proces dojrzewania betonu.

4.2. Formowanie kajaka w negatywie

W przypadku „formowania w negatywie”, proces polega na nakładaniu mieszanki betonowej bezpośrednio na zewnętrzną powierzchnię formy, która odwzorowuje wewnętrzny kształt gotowego kajaka. Jest to metoda, która pozwala nie tylko na precyzyjne odtworzenie wnętrza kadłuba, ale także daje pewną swobodę w modelowaniu zewnętrznej warstwy łodzi. Dzięki temu możliwe jest nadawanie jej indywidualnych, bardziej aerodynamicznych kształtów, odbiegających od geometrii zastosowanej w formie.

Na potrzeby wykonania modelu kajaka ze styroduru przyjęto wstępne wymiary: długość 4000 mm, szerokość 890 mm oraz maksymalna wysokość burt 500 mm. Parametry te miały zapewnić odpowiednią stabilność kierunkową i boczną oraz wystarczającą wyporność. Na ich podstawie przygotowano geometryczny model 3D, który posłużył do wykonania formy negatywowej ze styroduru (Rys. 5).



Rys. 5. Geometryczny fragment modelu 3D



Rys. 6. Forma ze styroduru

Ze względu na ograniczenia wymiarowe, forma została podzielona na cztery segmenty, które następnie precyzyjnie dopasowano i połączono ze sobą, tworząc spójną całość odwzorowującą zewnętrzną powierzchnię kajaka i umożliwiającą aplikację materiału konstrukcyjnego od zewnątrz (Rys. 6). Nakładanie mieszanki betonowej przebiegało ręcznie, analogicznie jak w przypadku pierwszej jednostki. Każda warstwa była wzmacniana siatką z włókna szklanego, co zapewniało

odpowiednią wytrzymałość powłoki. Kajak dojrzewał w takich samych warunkach jak wcześniejszy prototyp. Po siedmiu dniach przystąpiono do jego rozformowania.

5. Charakterystyka gotowych kajaków

5.1. Parametry techniczne

Wymiary obu wykonanych kajaków różnią się nieznacznie, przy czym mieszczą się w przyjętych założeniach projektowych. Różnice wynikają głównie z zastosowanych technik formowania oraz sposobu nanoszenia materiału konstrukcyjnego. Pomimo tych rozbieżności, oba kadłuby zachowują proporcje zapewniające odpowiednią stateczność oraz wyporność, zgodnie z wcześniej przyjętymi wytycznymi projektowymi (Rys. 7,8).

Wymiary kajaków po rozformowaniu zestawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Parametry techniczne kajaków betonowych.

Rodzaj kajak	Parametry techniczne				
	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Wysokość burt [mm]	Grubość powłoki [mm]	Waga [kg]
Kajak w pozytywie	4410	760	380	8-12	89
Kajak w negatywnie	4020	890	380	8-12	48



Rys. 7. Zdjęcie przedstawiające kajak z formy-pozytyw



Rys. 8. Zdjęcie przedstawiające kajak z formy-negatyw

5.2. Badania wytrzymałościowe

W ramach projektu przeprowadzono badania mechaniczne betonu zastosowanego do budowy kadłubów kajaków. Materiał poddano analizie pod kątem dwóch podstawowych parametrów wytrzymałościowych: na ściskanie oraz na zginanie. Szczególne znaczenie miała wytrzymałość na zginanie, ponieważ to właśnie ten rodzaj obciążenia w największym stopniu oddziałuje na cienkościenną konstrukcję kadłuba podczas eksploatacji. Beton sam w sobie jest materiałem kruchym, o niskiej odporności na zginanie, dlatego kluczową rolę we wzmocnieniu konstrukcji odgrywała siatka z włókna szklanego oraz wypełniacz w postaci szkła piankowego.

Aby możliwie wiernie odwzorować właściwości rzeczywistego materiału kompozytowego, z którego wykonano kajaki, przygotowano próbki w formie beleczek o wymiarach 160 × 40 × 10 mm. Każda z beleczka zawierała sześć warstw siatki szklanej, przełożonych warstwami mieszanki betonowej – dokładnie tak, jak w rzeczywistej strukturze kadłuba. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i na zginanie betonu użytego do budowy kajaków

Rodzaj kajak	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]					Wytrzymałość na zginanie [MPa]	
	<i>Kostki 100 x 100 x 100 mm</i>					<i>Beleczki 160 x 40 x 10 mm</i>	
	3 dni	7 dni	14 dni	21 dni	28 dni	7 dni	28 dni
Kajak w pozytywie	14,3	18,3	20,3	23,8	31,5	11,7	27,5
Kajak w negatywnie	10,5	13,5	16,5	19,8	29,6	10,5	26,7

Beton zastosowany do budowy kajaków odpowiadał klasie C20/25. Typowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu dla tej klasy wynosi około 2,2 MPa, natomiast dzięki wzmocnieniu konstrukcji siatką z włókna szklanego uzyskano wytrzymałość na zginanie na poziomie 26,7–27,6 MPa. Oznacza to ponad 12-krotny wzrost tej właściwości w porównaniu do betonu niezbrojonego, co jednoznacznie potwierdza wysoką skuteczność zastosowanego wzmocnienia kompozytowego.

5.3. Aspekty zrównoważone

W projekcie realizacji betonowych kajaków szczególną wagę przywiązano do zrównoważonego podejścia w budownictwie, uwzględniającego trzy kluczowe filary: środowiskowy, społeczny i gospodarczy.

Jednym z nadrzędnych celów było zminimalizowanie śladu węglowego związanego z produkcją mieszanki betonowej. W tym celu zastosowano materiały odpadowe pochodzenia przemysłowego, takie jak żużel pomiedziowy czy wielkopieczowy. Ich użycie pozwoliło zastąpić część tradycyjnych kruszyw naturalnych, ale również częściowo zastąpić cement, który ze względu na obecność klinkieru cechuje się

wysokim śladem węglowym. Dzięki temu udało się obniżyć emisje związane z produkcją i przetwarzaniem materiałów oraz nadać drugie życie odpadom przemysłowym, zgodnie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym.

Dodatkowo, do mieszanki dodano lekkie materiały, takie jak perlit ekspandowany i szkło piankowe, które poprawiły właściwości izolacyjne i zmniejszyły masę jednostki pływającej [6]. Zmniejszenie ciężaru konstrukcji wpływa korzystnie na efektywność energetyczną w całym cyklu życia produktu. Pył krzemionkowy, jako dodatek mineralny, zwiększyła trwałość materiału, ograniczając konieczność napraw i konserwacji, co także wpływa na obniżenie kosztów środowiskowych w długim okresie.

Istotnym aspektem projektu była aktywizacja studentów i zaangażowanie lokalnego środowiska akademickiego w działania proekologiczne. Współpraca z partnerem przemysłowym Grupą Cement ODRA, umożliwiła studentom zdobycie praktycznej wiedzy na temat wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w realnych warunkach produkcyjnych.

Dzięki projektowi uczestnicy rozwinęli kompetencje w zakresie zielonych technologii, pracy zespołowej, organizacji procesów technologicznych i zarządzania projektem, co stanowi cenny wkład w kształtowanie przyszłych specjalistów świadomych wyzwań klimatycznych.

Projekt pokazał, że także w działaniach eksperymentalnych i edukacyjnych możliwe jest wdrażanie zasad efektywnego wykorzystania zasobów i minimalizacji odpadów. Wykorzystanie produktów ubocznych przemysłu nie tylko zmniejszyło koszty materiałowe, ale również promowało circular economy i lokalną współpracę między sektorem edukacyjnym a przemysłowym. Zastosowane rozwiązania mogą posłużyć jako wzór dla innych inicjatyw łączących innowacyjność, ekologię i edukację w praktyce.

6. Podsumowanie i wnioski

Projekt budowy betonowych kajaków w ramach Krakow Concrete Canoe Challenge 2025 stanowił znakomity przykład połączenia innowacyjnego podejścia inżynierskiego z ideą zrównoważonego rozwoju. Studentom Koła Naukowego „Eko Mat-Bud” przy wsparciu kadry dydaktycznej oraz Grupy Cement ODRA udało się stworzyć rozwiązanie, które łączyło funkcjonalność, ekologię i nowoczesne technologie materiałowe.

Projekt pozwolił uczestnikom nie tylko pogłębić wiedzę teoretyczną, ale przede wszystkim zdobyć praktyczne doświadczenie, rozwijać umiejętności pracy zespołowej, planowania, testowania i wdrażania rozwiązań w rzeczywistych warunkach. Zastosowanie materiałów odpadowych i innowacyjnych składników mieszanki betonowej dowiodło, że budownictwo może być bardziej przyjazne środowisku bez rezygnowania z wysokich parametrów technicznych.

Projekt ten nie tylko poszerzył kompetencje studentów, ale również zintegrował zespół i zainspirował do dalszego rozwoju w kierunku innowacyjnych, ekologicznych rozwiązań w inżynierii budowlanej. Pokazał, że efektywna współpraca nauki z przemysłem jest możliwa i przynosi realne korzyści edukacyjne i technologiczne.

Wnioski końcowe

1. Zrównoważony rozwój nie jest wyłącznie teorią, ale może być skutecznie wdrażany także w projektach edukacyjno-badawczych, przynosząc realne efekty.
2. Współpraca nauki z przemysłem stanowi ogromną wartość dodaną – umożliwia transfer wiedzy i rozwój praktycznych kompetencji przyszłych inżynierów.
3. Wykorzystanie odpadów przemysłowych, takich jak żużle (hutnicze i pomiedziowe), to realna alternatywa dla tradycyjnych surowców – ekonomiczna, ekologiczna i technologicznie efektywna.
4. Edukacja poprzez działanie – czyli udział w pełnym procesie projektowym – jest jedną z najskuteczniejszych metod kształcenia inżynierów gotowych na wyzwania współczesnego świata.
5. Inicjatywy takie jak KCCC pokazują, że pasja, wiedza i współpraca są kluczem do tworzenia innowacyjnych rozwiązań, które odpowiadają na globalne wyzwania.
6. Poprzez jednoczesne wprowadzenie do składu betonów żużla hutniczego i pomiedziowego w obecności mikro i nanokrzemionki oraz superplastyfikatora znacząco poprawia szczelność betonu co zwiększa jego odporność na działanie wody.
7. Zastosowanie siatki z włókna szklanego jako zbrojenia kompozytowego pozwala na ponad 12-krotny wzrost wytrzymałości na zginanie betonu klasy C20/25 (na kruszywie ze szkła piankowego), co potwierdza jego wysoką skuteczność w zastosowaniach wymagających podwyższonej trwałości i niskiej masy.

Podziękowania

Autorzy pragną serdecznie podziękować współuczestnikom projektu „KCC2025” za zaangażowanie w jego realizację na etapie projektowym i wykonawczym. Szczególne wyrazy wdzięczności kierujemy do przedstawicieli z Politechniki Opolskiej: dr. inż. P. Jakiel, dr inż. D. Fabianowski, dr inż. M. Sobol, dr inż. A. Mordak, mgr inż. K. Seewald, mgr inż. I. Klementowski, oraz studentów I roku Wydziału Budownictwa i Architektury kierunku Budownictwo, których wkład i aktywne uczestnictwo były nieocenione dla osiągnięcia celów projektu.

Literatura

- [1] G. Rutkowska, M. Sobczak (2014) Beton modyfikowany pyłami krzemionkowymi, Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria, tom 13 Nr 1-2.
- [2] M. Velumani, K. Nirmal (2021) Wpływ żużla pomiedziowego na właściwości mechaniczne i wytrzymałość różnych betonów, Cement Wapno Beton, 26(2), 156-166.
- [3] S. Grzeszczyk, E. Janowska-Renkas (2012) The influence of small particle on the fluidity of blast furnace slag cement paste containing superplasticizers. Construction and Building Materials, 26, 1, 411-415.

- [4] R. Bujak (2021) Wpływ warunków mielenia na aktywność chemiczną granulowanego żużla wielkopieczowego, Konferencja *Dni Betonu*, <https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2021/Bujak.pdf>
- [5] E. Janowska-Renkas, G. Janus, A. Kaliciak, I. Majcherczyk (2017); „Zastosowanie sztucznych kruszyw lekkich i kulek styropianowych w kształtowaniu wytrzymałości na ściskanie betonów lekkich” XIX Międzynarodowa Studencka Sesja Naukowa Materiały i Technologie XXI wieku, Katowice 18.05.2017, s. 83-93
- [6] S. Grzeszczyk, G. Janus (2021) Lightweight Reactive Powder Concrete Containing Expanded Perlite, *Materials*, vol. 14, no. 12, 2021, p. 3341. <https://doi.org/10.3390/ma14123341>
- [7] Lambot, Joseph-Louis. *Bateau en béton*. Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Bateau_en_b%C3%A9ton