



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA



Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

mgr inż. Mateusz Zakrzewski

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych
na bazie materiałów odpadowych**

Promotor:

dr hab. inż. Jacek Domski, prof. PK

SPIS TREŚCI

ARTYKUŁY NAUKOWE WCHODZĄCE W SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI W RAMACH ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	3
STRESZCZENIE	4
SUMMARY	6
1. Wprowadzenie	7
2. Przegląd literatury	8
3. Tezy, cel i zakres pracy	10
4. Charakterystyka zastosowanych materiałów odpadowych	12
4.1. Kruszywo odpadowe	14
4.2. Kord stalowy	15
4.3. Skład kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych	16
5. Metodyka badań	18
5.1. Stanowisko do badania belek poddanych obciążeniu długotrwałemu	21
5.2. Zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiarów długotrwałych	24
5.3. Dokładność systemu cyfrowej korelacji obrazu	25
6. Analiza wyników badań	25
6.1. Charakterystyka wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach. Zadanie 1	26
6.2. Ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu. Zadanie 2	28
6.3. Analiza, na podstawie wytycznych normowych, doraźnych i reologicznych cech wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Zadanie 3	30
6.4. Analiza wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych z wykorzystaniem nowatorskiego stanowiska badawczego. Zadanie 4	34
6.4.1. Analiza wybranych cech kompozytów na bazie materiałów odpadowych pod obciążeniem długotrwałym	34
6.4.2. Modyfikacja metody obliczeniowej szerokości rozwarcia rys zawartej w PN-EN 1992-1-1	40
7. Podsumowanie i wnioski	42
8. Bibliografia	44
SPIS POZOSTAŁYCH PUBLIKACJI NIE WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU W RAMACH PRACY DOKTORSKIEJ	
KOPIE OPUBLIKOWANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI W RAMACH ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	

OPUBLIKOWANE ARTYKUŁY NAUKOWE WCHODZĄCE W SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI W RAMACH ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych

Lp.	Autorzy/Tytuł publikacji/Czasopismo	IF ¹	Punktacja wg MEiN ²
P1	Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M. , Ponikiewski, T., (2017) <i>Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete</i> , Journal of Cleaner Production, Volume 158, s. 18–28.	11,072	140
P2	Zakrzewski, M. , Gancarz, M., Tvrđá, K., Laskowska-Bury, J., & Domski, J. (2023). Comparative Analysis of Waste, Steel, and Polypropylene Microfibers as an Additive for Cement Mortar. <i>Materials</i> , 16(4), 1625.	3,748	140
P3	Paják, M., Krystek, M., Zakrzewski, M. , & Domski, J. (2021). Laboratory investigation and numerical modelling of concrete reinforced with recycled steel fibers. <i>Materials</i> , 14(8), 1828.	3,748	140
P4	Zakrzewski, M. , Sanok, A., & Domski, J. (2023). Rheological Properties of Concrete Based on Waste Materials. In <i>Environmental Challenges in Civil Engineering II</i> (pp. 175-184). Cham: Springer International Publishing.	-	20
P5	Zakrzewski, M. ; Domski, J. Cracking Behavior and Deflections in Recycled-Aggregate Beams Reinforced with Waste Fibers Subjected to Long-Term Constant Loading. <i>Materials</i> 2023, 16, 3622.	3,748	140
P6	Zakrzewski, M. , Domski, J., (2023). Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials. <i>Rocznik Ochrona Środowiska</i>	0,640	70
SUMA:		22,956	650

¹ 5 Year Impact Factor (IF) według bazy Journal Citation Reports (JCR)

² Liczba punktów za publikację wg listy MEiN

STRESZCZENIE

Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych

Zagospodarowanie odpadów stanowi istotny problem podejmowany przez naukowców. Zmieniające się przepisy wymuszają na firmach produkcyjnych szukania możliwości zagospodarowania odpadów powstających w fabrykach. W niniejszej dysertacji przeprowadzono szeroką analizę możliwości wykorzystania wybranych materiałów odpadowych w celu stworzenia kompozytów cementowych o właściwościach odpowiadającym tradycyjnym betonom. Analizie poddano odpady pochodzące z produkcji pustaków ceramicznych, odpady pochodzące z produkcji wyrobów porcelanowych, piasek odpadowy uzyskiwany w procesie hydroklasyfikacji kruszywa, w kopalniach odkrywkowych usytuowanych w północno-zachodniej Polsce. Odpady te zastosowano jako zamienniki kruszywa naturalnego. Ponadto jako zbrojenie rozproszone kompozytów zastosowano kord stalowy uzyskiwany w procesie recyklingu zużytych opon samochodowych. W celach porównawczych zastosowano również komercyjne haczykowate włókna stalowe. Badania podzielono na cztery zadania badawcze. W pierwszym zadaniu określono podstawowe właściwości wybranych materiałów odpadowych. M. in. określono gęstość pozorną, jamistość i nasiąkliwość kruszyw przygotowanych z odpadów fabrycznych, określono wytrzymałość na rozciąganie kordu stalowego oraz wpływ dwukierunkowego przeginięcia na wytrzymałość włókien. W drugim zadaniu określono możliwość zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego. Analizie poddano elementy z zawartością włókien 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1,00%, 1,25%, 1,50%. Badania przeprowadzono na beleczkach z zaprawy cementowej o wymiarach 40x40x160 mm. Do określenia właściwości zapraw zbrojonych kordem stalowym wykonano badanie trzypunktowego zginania w oparciu o normę PN-EN 196-1 dodatkowo mierząc ugięcie beleczek w funkcji obciążenia w trakcie testów wytrzymałościowych. Przeprowadzone analizy pozwoliły na określenie receptur kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Przygotowano łącznie 24 mieszanki, w których zastosowano różne ilości kruszyw odpadowych. Dla każdej mieszanki przygotowano próbki z ilością włókien 0,0%, 0,5% oraz 1,0%. W trzecim zadaniu przeprowadzono szereg badań w celu określenia doraźnych i reologicznych cech wytrzymałościowych wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Określono wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, wytrzymałości resztkowe oraz dla wybranych kompozytów określono skurcz oraz pełzanie. Wyżej wymienione badania przeprowadzono na podstawie wytycznych normowych. Zadanie czwarte polegało na określeniu właściwości reologicznych wybranych kompozytów na podstawie długotrwałych badań belek o wymiarach 100x200x2900mm. Na potrzeby badań zaprojektowano stanowisko badawcze umożliwiające jednoczesne badania trzech belek. Do pomiaru odkształceń powierzchni belek oraz rys zastosowano, poza tradycyjnymi metodami pomiarowymi, system optyczny. Badania wykonano na ośmiu stanowiskach. Pojedyncze stanowisko składało się z trzech belek wykonanych z tego samego kompozytu, z różną ilością zbrojenia rozproszonego. Przeprowadzone badania wykazały, że

z badanych materiałów odpadowych można wytworzyć kompozyty o właściwościach zbliżonych do betonów tradycyjnych. Ponadto po przeanalizowaniu rezultatów badań długotrwałych zaproponowano modyfikację metody obliczania szerokości rozwarcia rys zawartej w normie PN EN 1992-1-1.

SUMMARY

Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials

Waste management is an important problem analyzed by scientists. Changing regulations force production companies to look for opportunities to manage waste generated in factories. In this dissertation, an extensive analysis of the possibility of using several waste materials in order to create cement composites with properties corresponding to traditional concretes has been carried out. Wastes from the production of ceramic hollow bricks, wastes from the production of porcelain products, waste sand obtained in the process of aggregate hydroclassification in opencast mines located in north-western Poland were analysed. These wastes were used as substitutes for natural aggregate. In addition, steel cord obtained in the recycling process of used car tires was used as a dispersed reinforcement of the composites. Commercial steel hooked fibres were also used for comparison purposes. The research was divided into four research tasks. In the first task, the basic properties of selected waste materials were determined. among others the apparent density, voids and absorbability of aggregates prepared from factory waste were determined, the tensile strength of the steel cord and the effect of bidirectional bending on the strength of the fibres were determined. In the second stage, the possibility of using steel cord as dispersed reinforcement was determined. Elements with a fibre content of 0.25% were analysed; 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, 1.50%. The tests were carried out on beams of cement mortar with dimensions of 40x40x160 mm. To determine the properties of mortars reinforced with steel cord, a three-point bending test was performed based on the PN-EN 196-1 standard, additionally measuring deflection under load during strength tests. The conducted analyzes made it possible to determine the recipes of cement composites based on waste materials. A total of 24 mixes were prepared, in which various amounts of waste aggregates were used. Samples with 0.0%, 0.5% and 1.0% fibre amounts were prepared for each blend. In the third task, a number of tests were carried out to determine the temporary and rheological strength properties of selected cement composites based on waste materials. Compressive strength, modulus of elasticity, residual strengths were determined, and shrinkage and creep were determined for selected composites. The above-mentioned tests were carried out on the basis of standard guidelines. The fourth task was to determine the rheological properties of selected composites based on long-term tests of beams with dimensions of 100x200x2900mm. For the purposes of the tests, a test stand was designed to enable simultaneous testing of three beams. In addition to traditional measurement methods, an optical system was used to measure beam surface deformations and cracks. The tests were carried out at eight positions. A single station consisted of three beams made of the same composite, with different amounts of dispersed reinforcement. The conducted research showed that composites with properties similar to traditional concretes can be produced from the tested waste materials. In addition, after analysing the results of rheological properties, a correction factor was proposed for the method of calculating the crack width included in the PN EN 1992-1-1 standard.

1. Wprowadzenie

Obecnie, z uwagi na postępujące zmiany klimatu, coraz większy nacisk kładziony jest na ochronę środowiska. M.in. jednym z celów Unii Europejskiej jest wspólne działanie na rzecz ochrony środowiska. Na świecie wprowadzone są coraz to bardziej restrykcyjne normy dot. np. emisji dwutlenku węgla czy ograniczenia produkcji plastikowych wyrobów codziennego użytku - worków, kubków, sztućców [1], [2]. W budownictwie przykładem wspomnianych restrykcji może być zaostrenie przepisów jakim powinny odpowiadać nowoczesne budynki [3]. Budynki lepiej izolowane mają mniejsze zapotrzebowanie na energię co wprost przekłada się na ochronę środowiska. Ponadto wciąż aktualnym tematem pozostaje gospodarka odpadami [4]. Coraz większy nacisk kładziony jest na ponowne wykorzystywanie odpadów. Obostrzenia z tym związane dotyczą wielu firm oraz przedsiębiorstw. Wymagania stawiane przez wiele Państw, w szczególności z Unii Europejskiej mówią wprost, że nowo wprowadzane na rynek produkty powinny być wytwarzane przynajmniej w części z przetworzonych odpadów. Komisja Europejska, w 2021 r., zatwierdziła plan działania dotyczący gospodarki odpadami w obiegu zamkniętym [5], [6]. Zmusza to producentów do poszukiwania sposobów utylizacji odpadów powstających w procesie produkcyjnym. Doprowadziło to do sytuacji, że jednym z aktualnych trendów w nauce, jest zagospodarowanie odpadów. Coraz częstszą praktyką jest utylizacja odpadów poprzez zastosowanie ich do produkcji materiałów budowlanych [7]–[12]. Odpady plastikowe wykorzystuje się m.in. przy produkcji różnego rodzaju paneli oraz desek przeznaczonych do wykończenia wnętrz oraz tarasów [13] czy elementów budownictwa drogowego [14]. Jednym z sposobów utylizacji odpadów w budownictwie jest wykorzystanie materiałów odpadowych w produkcji zamienników betonu, w postaci kompozytów cementowych na bazie odpadów lub z dodatkiem odpadów. Można wydzielić trzy rodzaje wykorzystania odpadów w produkcji tego typu wyrobów:

- zastąpienie naturalnie występującego kruszywa materiałami odpadowymi,
- wykorzystanie materiałów odpadowych jako zbrojenie betonu,
- wykorzystanie materiałów odpadowych jako dodatek do betonu.

Beton jest powszechnie stosowanym materiałem budowlanym, z uwagi na jego stosunkowo niskie koszty produkcji oraz powszechnie dostępne składniki (piasek, żwir, cement, woda). W związku z tym, ma on duży potencjał do zastosowania w nim odpadów nienadających się do dalszego przetworzenia. Stosowanie betonu wytworzonego na bazie materiałów odpadowych może znacząco przyczynić się do ich redukcji. Zastosowanie zamienników dla kruszywa grubego ma znaczenie dla północno-zachodniego regionu Polski. Pozwoli na redukcję zalegających w kopalniach hałd piasku. W tym regionie znajdują się duże pokłady kruszyw naturalnych. W zdecydowanej większości są to drobne piaski. Pozyskiwanie kruszywa grubego odbywa się w procesie hydroklastyfikacji [15]. Na skutek tego procesu pozyskiwane są znaczne ilości piasku, które na chwilę obecną trudno zagospodarować. Jednym z przykładów może być Pomorska Góra Piasku. Jest to sztuczne wzniesienie usypane z piasku o długości ok 600 m i szerokości

ok 200 m. W najwyższym punkcie osiąga wysokość 66 m. Wzniesienie powstało na skutek wieloletniego procesu wydobywania kruszywa. Według szacunków na zwałowisku znajduje się 8 mln ton piasku.

2. Przegląd literatury

W minionych latach opublikowanych zostało wiele publikacji analizujących wpływ zastosowania odpadów na właściwości betonu. Do betonu dodawane są odpady takie jak stłuczka szklana [16]–[18] odpady kopalniane [19]–[21], granulaty wytworzone z zużytych opon [22], [23] czy odpady plastikowe [24], [25]. Prowadzone badania wykazały, że zastosowanie odpadów może mieć pozytywny wpływ na właściwości kompozytów cementowych takich jak: wytrzymałość na ściskanie [26], szczelność [27], redukcję masy [28]. Jedną z głównych wad kompozytów cementowych jest ich kruchość oraz bardzo mała elastyczność. Nieustannie prowadzone są badania nad zneutralizowaniem tej wady poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego [20], [29]. Włókna stalowe czy z tworzyw sztucznych znajdują obecnie powszechne zastosowanie w różnego rodzaju elementach konstrukcyjnych [30] czy warstwach wykończeniowych [31]. Alternatywą dla komercyjnie produkowanych włókien są włókna odpadowe. Przykładem zastosowania odpadów jako zbrojenia rozproszonego jest zastosowanie włókien wykonanych z butelek plastikowych [32], lub wióry stalowe stanowiące odpad w procesie toczenia oraz skrawania [33]. Biorąc pod uwagę obecne trendy, udział materiałów budowlanych wykorzystujących odpady z recyklingu będzie wzrastał. Z punktu widzenia zastosowania kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych w elementach konstrukcyjnych, bardzo istotną kwestią jest jego zachowanie się w czasie pod obciążeniem. W procesie obliczeniowym stanów granicznych elementów konstrukcji, niezbędne jest przyjęcie właściwych współczynników pełzania oraz skurczu betonu. Cechy te nie są jeszcze wystarczająco poznane, aby możliwe było projektowanie zoptymalizowanych konstrukcji. Badania właściwości reologicznych kompozytów cementowych są rzadziej prowadzone przez naukowców ze względu na większy nakład pracy i długi czas badań. Najczęściej badania wykonywane są przez okres krótszy niż rok [34]–[36] lub od 400 do 1000 dni [37], [38]. Rzadziej badania prowadzone są dłużej [39]. Podstawowym badaniem właściwości reologicznych jest określenie swobodnego skurczu i pełzania w stanie osiowego ściskania. Badania te przeprowadza się w prostych przyrządach, w których umieszcza się próbki cylindryczne lub prostopadłościenną, a pomiaru najczęściej dokonuje się za pomocą ręcznych przyrządów [40]. W publikacjach [41]–[46] dotyczących właściwości długotrwałych betonów i kompozytów cementowych pojawia się wiele ciekawych propozycji badania tych cech na podstawie elementów w skali naturalnej. Wspólną cechą wymienionych badań jest zastosowanie schematu czteropunktowego zginania. We wspomnianych badaniach dominuje sposób obciążania z wykorzystaniem dużych elementów betonowych co jest rozwiązaniem mało praktycznym. Ciekawą metodą obciążania zastosowano w [44]. Obciążenie zrealizowano poprzez skręcenie dwóch belek śrubami stalowymi na obu końcach. Wadą takiego rozwiązania jest zmiana wartości obciążenia na skutek pełzania skręconych elementów. W tych badaniach, we wszystkich przypadkach, z wyjątkiem Mias [41] oraz

Chen [43], zastosowano tradycyjne zbrojenie górne i dolne. Prowadzenie badań długo-trwałych elementów w skali naturalnej daje najlepsze rezultaty do weryfikacji metod obliczeniowych. Poza właściwym określeniem wpływu kruszywa na ugięcie czy zarysowanie elementów ważnym jest również poprawne określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na podane cechy. Naukowcy od lat prowadzą badania nad usprawnieniem metod obliczeniowych długoterminowych parametrów betonu zbrojonego włóknami. W 1995 roku Ezeldin i Shiah przedstawili analityczną metodę obliczania ugięcia belek SFRC w czasie [47]. Zaproponowali oni przyjęcie zależności naprężenie-odkształcenie zidentyfikowanej w badaniach opisanych w [48]. Poddali badaniom belki o różnej zawartości włókien stalowych, niektóre z dodatkiem krzemionki. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie wzoru opisującego zależność naprężenie-odkształcenie betonu zbrojonego włóknami. Algorytm obliczeń opiera się na wyznaczeniu krzywizny belki z uwzględnieniem parametrów długotrwałych. Jednak jednym z założeń metody jest to, że odkształcenia betonu wywołane skurczem i pęczaniem są takie same jak w betonie bez włókien. Metoda ta wymaga określenia wytrzymałości na rozciąganie betonu zbrojonego włóknami na podstawie badań. W 1994 roku Tan i Paramsvam zaproponowali modyfikację metody obliczania ugięcia długotrwałego zawartego w normie ACI 318. Modyfikacja polega na wprowadzeniu dodatkowego współczynnika uwzględniającego ilość włókien w mieszance. Wartości tego współczynnika zostały określone na podstawie badań przedstawionych w [49]. W 2005 roku Tam i Shah ukończyli 10-letnie badanie belek o różnym stopniu zbrojenia rozproszonego. Wyniki eksperymentalne porównano z wynikami obliczonymi metodą efektywnych modułów, którą zmodyfikowano poprzez wprowadzenie współczynnika korygującego, uwzględniającego starzenie się betonu [39]. Bywalski i Kaminski zaproponowali w 2011 roku innowacyjne podejście [50]. W oparciu o normę Eurokod 2 [51] określili zależności między włóknami stalowymi a momentem bezwładności zarówno dla betonu zarysowanego, jak i niezarysowanego. Ich metoda wymaga użycia programów obliczeniowych ze względu na złożony układ równań, które należy rozwiązać.

Innym ważnym aspektem zachowania się konstrukcji betonowych w czasie jest powstawanie i propagacja rys. W przypadku betonu zbrojonego włóknami opracowane zostały różne metody obliczania szerokości rys i ich rozstawu [49], [52]. Różnią się sposobem uwzględniania interakcji między prętami zbrojeniowymi a włóknami stalowymi oraz przyjmowaniem właściwości granicznych w przekrojach zarysowanych i niezarysowanych. Jedną z metod po raz pierwszy przedstawił Nemegeer i inni. w 1995 roku [53]. Zaproponowali metodę obliczania szerokości rys prostopadłych w belkach z włóknami stalowymi Dramix. Metoda ta polegała na niewielkiej modyfikacji propozycji zawartej w Eurokodzie 2, tj. do obliczeń naprężeń w stali zbrojeniowej przyjęto wytrzymałość na rozciąganie po zarysowaniu. Wartość równoważnej wytrzymałości na rozciąganie określono na podstawie belgijskiej normy NBN B15-238 [54]. Wadą tej metody jest to, że ogranicza się ona do włókien tylko jednego producenta. Metoda zaproponowana przez Froscha [55] opiera się na tym samym wzorze wyznaczania szerokości rys, co w Eurokodzie 2 [23]. Metoda umożliwia określenie minimalnego, średniego i maksymalnego rozstawu rys, stosując odpowiedni współczynnik. Rozstaw rys obli-

cza się jako iloczyn współczynnika oraz właściwej odległości środka ciężkości rozciąganego zbrojenia do krawędzi przekroju. Odkształcenia stali zbrojeniowej określa się za pomocą stosunków naprężeń i modułów sprężystości. Zastosowanie tej metody w elementach z betonu zbrojonego włóknami jest możliwe tylko poprzez odpowiednie określenie odkształceń stali zbrojeniowej. W 2000 roku Vandewalle zaproponowała inną metodę obliczania szerokości rys prostopadłych [56], opartą na Eurokodzie 2 [51]. Jedyną różnicą jest przyjęcie dodatkowego członu we wzorze na wyznaczanie średniej odległości pomiędzy rysami. Jest to metoda prosta z obliczeniowego punktu widzenia.

3. Tezy, cel i zakres pracy

Przeprowadzone analizy pozwoliły na sformułowanie następujących tez rozprawy doktorskiej:

1. *Możliwe jest opracowanie takiego kompozytu cementowego, wytworzonego na bazie odpadów pochodzących z fabryk porcelany, pustaków ceramicznych oraz piasku odpadowego, którego właściwości doraźne oraz długotrwałe będą odpowiadały betonowi zwykłemu.*
2. *Możliwe jest skuteczne zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych w elementach belkowych obciążonych długotrwałe.*

W ramach niniejszej pracy doktorskiej podjęto się realizacji czterech zadań badawczych. Każdemu z zadań przypisano różne cele do zrealizowania. W pierwszym zadaniu analizie poddano wybrane materiały odpadowe. W zadaniu drugim przeanalizowano możliwość zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego w betonie. W trzecim zadaniu określono podstawowe parametry mieszanek na bazie wybranych materiałów odpadowych w oparciu o obowiązujące normy i wytyczne. W ostatnim zadaniu określono cechy reologiczne wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Wyniki z poszczególnych etapów zostały opublikowane w sześciu publikacjach. Poszczególne zadania oraz publikacje, w których przedstawiono uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1. Zasadniczym celem pracy było określenie właściwości cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych, przy zastosowaniu autorskiego stanowiska badawczego oraz przy niekonwencjonalnym wykorzystaniu systemu optycznego. W badaniach długotrwałych skupiono się na ugięciu, zarysowaniu oraz deformacji belek w skali naturalnej, wykonanych z wybranych kompozytów. W ramach badań doraźnych przeanalizowano właściwości zastosowanych materiałów odpadowych oraz parametry wytrzymałościowe wytworzonych mieszanek.

Tabela 1. Cele zrealizowane w ramach pracy doktorskiej

Zadania badawcze	Cel	Publikacje, w których przeprowadzono analizy przypisane do poszczególnych etapów
1	Charakterystyka wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach	P1, P6
2	Ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu	P2, P3
3	Analiza, na podstawie wytycznych normowych, doraźnych i reologicznych cech wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych	P4, P5, P6
4	Analiza wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych z wykorzystaniem nowatorskiego stanowiska badawczego	P5, P6

W tabeli 2 zaprezentowano zestawienie przeprowadzonych testów wytrzymałościowych w poszczególnych etapach głównych wraz z zestawieniem ilości próbek.

Tabela 2. Ilość próbek zbadanych w badaniach przeprowadzonych w ramach niniejszej dysertacji

Badanie wpływu dodatku włókien na właściwości zaprawy cementowej (P2)					
Ilość mieszanek	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie	Wytrzymałość na zginanie (beleczki z nacięciem 4 mm)	Wytrzymałość na zginanie (beleczki z nacięciem 4 mm)	Suma
7	6	3	3	3	
Łącznie elementów:	42	21	21	21	105
Ilość zaprawy:					
Badanie kordu stalowego jako zbrojenie rozproszone (P3)					
Ilość mieszanek	Wytrzymałość na ściskanie		Wytrzymałości resztkowe		Suma
5	6		3		
Łącznie:	30		15		45
Badanie właściwości reologicznych – skurcz i pełzanie (P4)					
Ilość mieszanek	Wytrzymałość na ściskanie	Moduł sprężystości	Skurcz	Pełzanie	Suma
5	6	3	3	3	
Łącznie:	30	15	15	15	75
Badanie właściwości doraźnych i reologicznych (P5 i P6)					
Ilość mieszanek	Wytrzymałość na ściskanie	Moduł sprężystości	Wytrzymałości resztkowe	Badanie cech reologicznych na belkach w skali naturalnej	Suma
24 (20)	6	3	3	1	
Łącznie:	144	72	72	24	312
Łączna liczba zbadanych elementów:					537

Do przygotowania przedstawionych w tabeli 2 elementów badawczych użyto: 3,74 m³ betonu. Do wytworzenia betonu użyto łącznie 1497 kg cementu oraz 1349 kg kruszywa odpadowego z ceramiki białej, 954 kg kruszywa odpadowego z ceramiki czerwonej oraz 2372 kg kruszywa pochodzenia naturalnego, w tym piasku odpadowego. Ponadto wykorzystano 139 mb stali zbrojeniowej oraz 52 kg komercyjnych włókien stalowych i 108 kg kordu stalowego.

4. Charakterystyka zastosowanych materiałów

Do wytworzenia kompozytów cementowych użyto podstawowych materiałów takich jak cement, woda oraz dodatki w postaci superplastyfikatora oraz włókien stalowych. Szczegółowy opis wymienionych materiałów przedstawiono poniżej:

Spoiwo

Jako spoiwo w badanych kompozytach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R charakteryzujący się szybkim przyrostem wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie po dwóch dniach, badana zgodnie z normą PN-EN-196-1 [57], osiąga wartość powyżej 28 MPa. Natomiast po normowym czasie dojrzewania, wynoszącym 28 dni, kształtuje się na poziomie powyżej 42,5 MPa [58]. Zgodnie z technologiczną kartą produktu cement ten może być stosowany bez względu na porę roku oraz warunki dojrzewania. Może również zostać eksploatowany we wszystkich klasach ekspozycji, nie licząc agresywnych środowisk chemicznych [58]

Woda zarobowa

Woda wykorzystana do wykonania wszystkich elementów badawczych pochodziła z lokalnego przyłącza wodociągowego. Zarówno barwa wody jak i jej zapach były zgodne z wymaganiami normy. W związku z tym, pobieranie próbek oraz badanie pod względem zawartości związków chemicznych zgodnie z PN-EN 1008:2004 [59] nie było konieczne.

Plastyfikator

Dodatek włókien stalowych w znacznym stopniu pogarsza urabialność mieszanki betonowej, stąd niezbędne było zastosowanie domieszki upłynniającej. Do wykonania kompozytów zastosowano stężony superplastyfikator polimerowy SilkaViscoCrete 5-600. Według deklaracji producenta [60] jego gęstość wynosi 1,07 kg/m³ a wartość pH zawiera się w przedziale $4,4 \pm 1,0$. Ponadto w swoim składzie nie zawiera żadnych chlorków lub innych związków chemicznych, które mogłyby wywołać korozję stali zbrojeniowej oraz włókien.

Pył krzemionkowy

W kompozytach na bazie kruszywa z ceramiki białej zastosowano dodatek w postaci pyłu krzemionkowego. Pył krzemionkowy, dodawany do mieszanki betonowej, usprawnia działanie plastyfikatora, co w efekcie pozwala na zachowanie stosunkowo niskiego stosunku wodno-cementowego. Zastosowanie pyłu krzemionkowego zwiększa

wytrzymałość na ściskanie betonu oraz w istotny sposób obniża przepuszczalność stwardniałego betonu. Uszczelnienie betonu zwiększa jego odporność na korozję. W niniejszych badaniach zastosowano gotowy produkt zgodny z normą PN-EN 13263-1 [61]. Parametry zastosowanego pyłu krzemionkowego przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Podstawowe składniki pyłu krzemionkowego wg deklaracji producenta [62] w odniesieniu do obowiązującej normy PN-EN 13263-1 [61]

Składniki	Zawartość deklarowana przez producenta [%] [62]	Wymagane wg normy PN-EN 13263-1 [%] [61]
Dwutlenek siarki, SiO ₂	92,45	≥ 85
Tlenek wapnia, CaO	0,03	≤ 1
Siarczany, SiO ₃	0,12	≤ 2
Chlorki, Cl	0,004<0,01	≤ 0,3

Włókna stalowe

W badanych kompozytach cementowych zastosowano m.in. włókna stalowe firmy EKOMET o długości 50 mm i średnicy 0,8 mm zgodne z normą PN-EN 14889-1 [63]. Są to włókna haczykowate, o okrągłym przekroju. Ich smukłość wynosi $\lambda = 62,5$. Parametry włókien deklarowane przez producenta przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry włókien EKOMET 50/0.8 wg deklaracji producenta

Cecha	Wartość
Grupa konstrukcyjna [-]	I
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1200
Kształt włókien: haczykowate	-
Konsystencja (Ve-Be) przy zawartości włókien 12-14 kg/m ³ [s]	4
Wpływ na wytrzymałość betonu (12-14 kg/m ³) przy CMOD*=0,5 mm [MPa]	1,5
Wpływ na wytrzymałość betonu (12-14 kg/m ³) przy CMOD*=3,5 mm [MPa]	1,0

*- rozwarcie naciętej szczeliny wg metody przedstawionej w PN-EN 14651

Zgodnie z założeniami pracy doktorskiej do wytworzenia kompozytów cementowych wykorzystano również materiały odpadowe. Jako zamienniki kruszywa zastosowano:

- odpady pochodzące z produkcji pustaków ceramicznych,
- odpady pochodzące z produkcji wyrobów porcelanowych,
- piasek odpadowy uzyskiwany w procesie hydroklasyfikacji kruszywa, w kopalniach odkrywkowych usytuowanych w północno-zachodniej Polsce.

Jako zbrojenie rozproszone kompozytów zastosowano:

- kord stalowy uzyskiwany w procesie recyklingu zużytych opon samochodowych.

Ogólną charakterystykę zastosowanych w badaniach materiałów odpadowych przedstawiono w kolejnych punktach dysertacji.

4.1. Kruszywo odpadowe

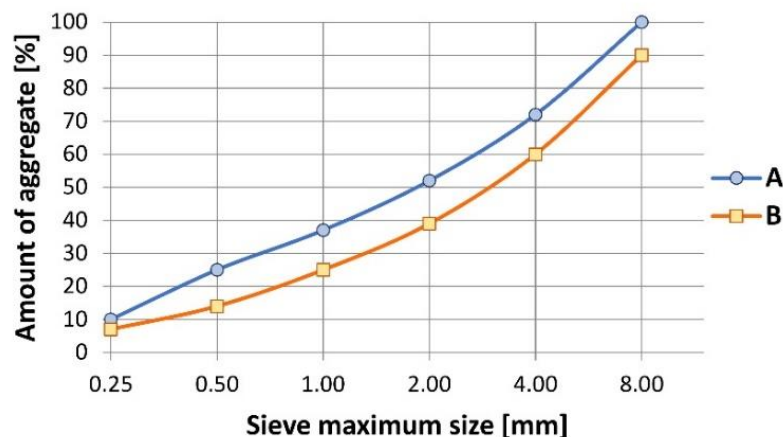
Zastosowanie kruszywa uzyskanego z materiałów odpadowych w elementach fibro-betonowych wymaga spełnienia dodatkowych warunków w porównaniu z kruszywem kwarcytowym stosowanych do zwykłych betonów. Jest to związane z występowaniem włókien stalowych, które warunkują maksymalny wymiar ziaren jaki powinien zostać zastosowany w kompozycie. Zgodnie z założeniami dysertacji do wykonania kompozytów wykorzystano kruszywo odpadowe oraz naturalne. Kruszywo do kompozytów przygotowano z odpadów fabrycznych pochodzących z zakładu Polskie Fabryki Porcelany "Ćmielów" i "Chodzież" S.A. położonego w Chodzieży oraz z odpadów pochodzących z produkcji pustaków ceramicznych w fabryce Weinerberger w Lęborku. W dalszej części dysertacji przyjęto uproszczenia w nazewnictwie. Odpady z produkcji pustaków ceramicznych zostały określone jako ceramika czerwona a odpady z produkcji porcelany jako ceramika biała.



Rys 4.1. Odpady fabryczne wykorzystane do wytworzenia kruszywa: a) odpady z fabryki porcelany, b) odpady z fabryki pustaków ceramicznych po wstępnym kruszeniu

Dostarczone przez producentów odpady nie nadawały się do zastosowania w całości do produkcji kompozytów (rys. 4.1.). Zostały one poddane procesowi kruszenia, mielenia oraz przesiewania w celu uzyskania krzywej uziarnienia jak dla betonu wzorcowego zgodnie z normą [64]. Wybrano krzywą A dla kruszywa o maksymalnym rozmiarze ziaren do 8 mm (rys. 4.2). W pierwotnym założeniu przyjęto, że 100% kruszywa będzie pochodziło z odpadów. Podczas przygotowania kruszywa okazało się, że uzyskanie frakcji w przedziale 0,125 – 2,0 mm jest bardzo pracochłonne i czasochłonne. W związku z tym, w drugiej fazie badań w ramach Zadania 4 wspomniane frakcje zastąpiono piaskiem odpadowym. Większość kruszywa w kompozytach nadal stanowiły odpady fabryczne a zastosowanie tego typu kompozytów stało się bardziej racjonalne, z ekonomicznego punktu widzenia. Zastosowany piasek odpadowy pochodził z lokalnych kopalni kruszyw. Piasek ten stanowi odpad w procesie hydroklasyfikacji kruszywa

grubego. Wynika to z dużej dysproporcji kruszywa drobnego i grubego występującego w naturalnych złożach w północnej Polsce. Transport kruszywa grubego z innych regionów Polski jest nieopłacalny a ilość piasku drobnego składowanego w kopalinach jest trudna do zagospodarowania.



Rys 4.2. Krzywe przesiewu wg normy [64] dla betonu wzorcowego [65]

4.2 Kord stalowy

Kord stalowy jest pozyskiwany w procesie recyklingu zużytych opon samochodowych. W procesie tym opony poddawane są obróbce mechanicznej, podczas której uzyskuje się granulaty gumowy, tekstylia oraz kord stalowy [66]. Ilość kordu zależy głównie od rodzaju opony. Opony do pojazdów lekkich zawierają do 15% stali, a opony do samochodów ciężarowych do 25% stali [67]. Ze względu na różne rodzaje i rozmiary opon uzyskiwany kord stalowy jest bardzo zróżnicowany pod względem długości, kształtu i średnicy włókien. Niemniej wymiary kordu są zbliżone do komercyjnych włókien stalowych i można go stosować w mieszankach cementowych bez dodatkowej obróbki.

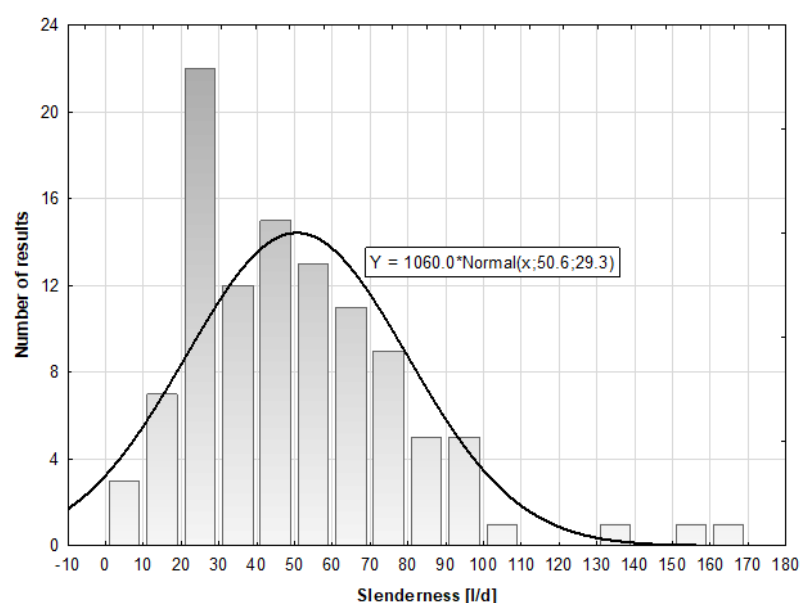


Rys 4.3. Włókna wykorzystane do badanych kompozytów a) haczykowane włókna stalowe 50/0.8 b) kord stalowy [68]

Analiza losowej próbki składającej się ze 106 włókien pobranych z materiału dostarczonego przez producenta pozwoliła na określenie podstawowych parametrów kordu stalowego. Średnica większości włókien odpadowych (90%) wynosi od 0,20 do 0,35 mm. Średnicę włókien mierzono mikrometrem. Wyniki przedstawiono w tabeli 6. Ważnym parametrem opisującym włókna jest ich smukłość, dlatego też dla wybranej grupy włókien pogrupowano liczby włókien w poszczególne przedziały smukłości i określono rozkład smukłości badanej próby (rys. 4.4).

Tabela 6. Parametry kordu stalowego [65]

Parameter	Average [mm]	Standard Deviation [mm]	Median [mm]	Minimum Value [mm]	Maximum Value [mm]
diameter	0.31	0.18	0.25	0.05	1.35
length	13.29	5.80	12.57	2.90	27.90



Rys 4.4. Rozkład smukłości włókien kordu stalowego [69]

4.3 Skład kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych

W badaniach głównych przebadano 8 kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Dla każdego kompozytu wykonano 6 belek o wymiarach 100x200x2900 mm, po jednej z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w ilości 0,0%; 0,5% oraz 1,0%. Badania te podzielono na dwa etapy, oznaczone w tabeli cyframi rzymskimi. Do wytworzenia kompozytów zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R w ilości 400 kg/m³. Superplastyfikator Silka ViscoCrete 5-600 zastosowano w ilości 1% masy cementu. Dodatkowo w mieszankach wykonanych z kruszywem z ceramiki białej zastosowano jako dodatek pył krzemionkowy w ilości 8% masy cementu. Jako zbrojenie rozproszone zastosowano dwa rodzaje włókien: stalowe włókna haczykowane 50/0,8 oraz kord stalowy. W tabeli 7 zaprezentowano oznaczenia oraz skład wszystkich kompozytów i wytworzonych z nich belek poddanych badaniom głównym.

Tabela 7. Skład wybranych do badań kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych [68]

Stage	Mixture	Beam number	Aggregate 0.125–2.00 mm	Aggregate 2.00–8.00 mm	Fibers	Fiber-reinforcement ratio
Stage I	RCf0	B3	Red ceramic waste	Red ceramic waste	Steel fibers 50/0.8	0.0%
	RCf05	B2				0.5%
	RCf10	B1				1.0%
	RCc0	B3	Red ceramic waste	Red ceramic waste	Steel cord	0.0%
	RCc05	B2				0.5%
	RCc10	B1				1.0%
	WCf0	B3	White ceramic waste	White ceramic waste	Steel fibers 50/0.8	0.0%
	WCf05	B2				0.5%
	WCf10	B1				1.0%
	WCc0	B3	White ceramic waste	White ceramic waste	Steel cord	0.0%
	WCc05	B2				0.5%
	WCc10	B1				1.0%
Stage II	RCS0	B3	Waste Sand	Red ceramic waste	Steel cord	0.0%
	RCS05	B2				0.5%
	RCS10	B1				1.0%
	WCSf0	B3	Waste Sand	White ceramic waste	Steel fibers 50/0.8	0.0%
	WCSf05	B2				0.5%
	WCSf10	B1				1.0%
	WCS0	B3	Waste Sand	White ceramic waste	Steel cord	0.0%
	WCS05	B2				0.5%
	WCS10	B1				1.0%
	Sc0	B3	Waste Sand	Natural aggregate	Steel cord	0.0%
Sc05	B2	0.5%				
Sc10	B1	1.0%				

5. Metodyka badań

Badania prowadzono na podstawie norm krajowych i europejskich a także w ramach autorskich procedur. W tabelach 8-11 przedstawiono zestawienie badań podstawowych wraz z procedurą badawczą oraz wykorzystaną aparaturą. W ramach Zadania 1 przeprowadzono badania podstawowych cech fizycznych kruszyw uzyskanych w procesie kruszenia i mielenia odpadów fabrycznych. Określono gęstości pozorną (rys. 5.1), nasypową, jamistość oraz nasiąkliwość. Określono również parametry zastosowanych w kompozytach cementowych włókien stalowych oraz kordu stalowego. Zbadano wytrzymałość na rozciąganie, przeginanie oraz sprawdzono geometrię włókien. Szczegółowe procedury wszystkich badań zostały opisane w publikacjach P1-P6. Wyszczególnione badania zrealizowane w ramach Zadania 1 i przedstawiono w tablicy 8.

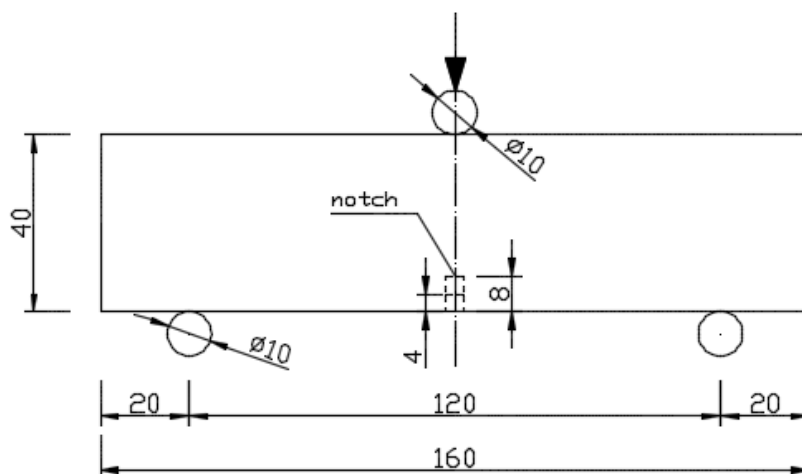
Tabela 8. Badania przeprowadzone w ramach realizacji Zadania 1

Material	Badana cecha	Kształt / wymiary próbki [mm]	Norma	Urządzenie, aparatura pomiarowa, dokładność
Kruszywo	Gęstość pozorna	Próbka o objętości 5 dm ³	EN 1097-3	Cylinder metalowy, stół wibracyjny, wagi laboratoryjne o dokładności odczytu 0,1 g oraz 1g
	Gęstość nasypowa			
	Jamistość			
	Nasiąkliwość	Próbka o masie 5000 g	EN 1097-6	waga laboratoryjna o dokładności odczytu 1g
Włókna stalowe	Geometria włókien	Włókna stalowe 0,8x50 mm oraz kord stalowy	PN-EN 14889-1	Mikrometr o dokładności pomiaru 0,01 mm
	Wytrzymałość na rozciąganie (R_m)		PN-EN ISO 6892-1	Maszyna wytrzymałościowa 10 kN Z010 Pro-Line ZWICK ROELL
	Wytrzymałość na przeginięcie		EN ISO 10218-1:1994	Urządzenie do przeginięcia dwukierunkowego



Rys 5.1. Badanie gęstości pozornej kruszywa uzyskanego w procesie kruszenia odpadów z produkcji pustaków ceramicznych

W Zadaniu 2 w pierwszej kolejności określono wpływ kordu stalowego na właściwości zaprawy cementowej. Badania wykonano, rozszerzając standardową procedurę do badania beleczek cementowych na zginanie. Monitorowano ugięcie beleczek w środku ich rozpiętości, w funkcji obciążenia. Badaniom poddano mieszanki z dodatkiem włókien w ilości 0,0%; 0,25%; 0,50%; 0,75%; 1,00%; 1,25%; 1,50% objętości mieszanki.



Rys 5.2. Schemat badania wpływu dodatku zbrojenia rozproszonego na właściwości zaprawy cementowej

Dla każdej mieszanki wykonano po 9 próbek, w tym 3 bez nacięcia i po 3 z nacięciem o głębokości 4 i 8 mm (rys. 5.2). Szczegóły procedury badawczej opisano w publikacji P1 [70]. Następnie wykonano badania wytrzymałości resztkowych w oparciu o normę PN-EN 14651 [71] (rys. 5.3), które są podstawą do klasyfikacji fibrobetonów. Wytrzymałości resztkowe określono dla mieszanek wykonanych z kruszywa naturalnego zgodnie z krzywą przedstawioną na rysunku 4.2. Zbadano próbki ze zbrojeniem rozproszonym w ilości 0,5%; 0,75%; 1,0%, 1,25% oraz 1,5% objętości mieszanki. Zestawienie badań w ramach realizacji Zadania 2 przedstawiono w tabeli 9.

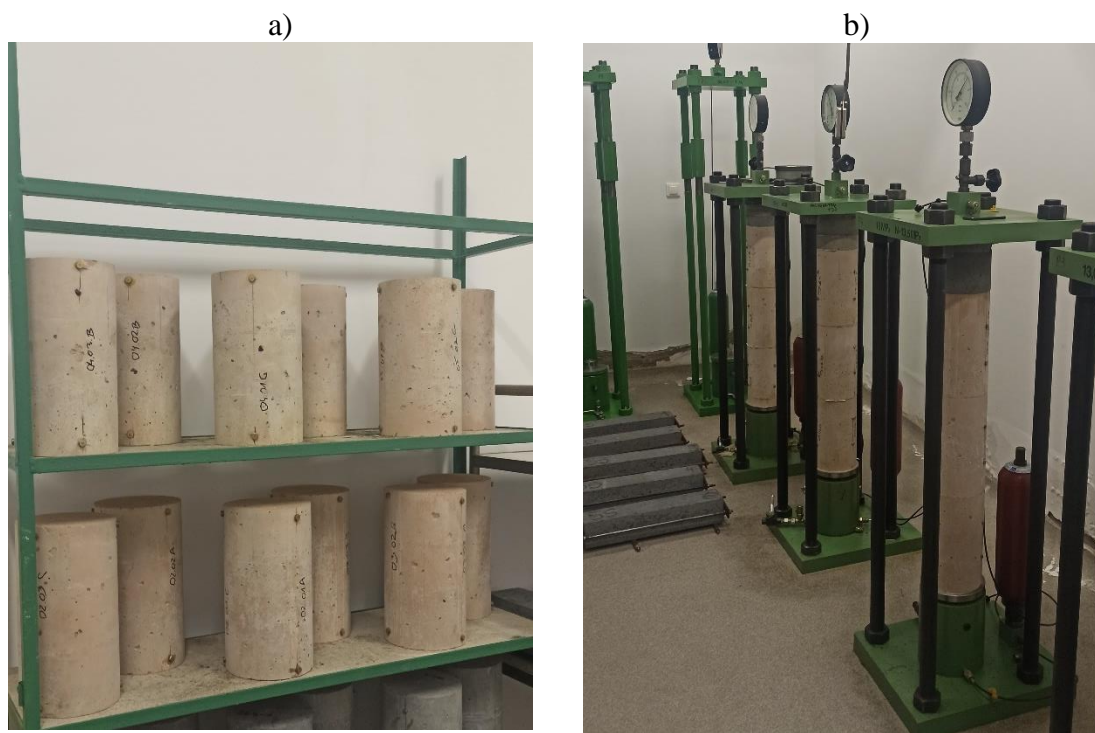
Tabela 9. Badania przeprowadzone w ramach realizacji Zadania 2

Badana cecha	Kształt / wymiary próbki [mm]	Norma	Urządzenie, aparatura pomiarowa, dokładność
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	Belki o wymiarach 150x150x600mm	EN 14651:2007	Prasa wytrzymałościowa Walter+Bai200 kN
Wytrzymałości resztkowe	Belki o wymiarach 150x150x600mm	EN 14651:2007	Prasa wytrzymałościowa Walter+Bai200 kN + system akwizycji danych SAD 256
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	Beleczyki o wymiarach 40x40x160mm	Autorska procedura	Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa Hege-wald&Peschke Inspekt 600 + czujnik siły 20 kN
Współczynnik wytrzymałości na zginanie			



Rys 5.3. Badanie wytrzymałości resztkowych na prasie wytrzymałościowej Walter+Bai DB200 z zamocowanymi czujnikami do pomiaru szerokości rozwarcia rysy

Zadanie nr 3 polegało na określeniu podstawowych parametrów, doraźnych i reologicznych, wybranych kompozytów na bazie materiałów odpadowych. Badania tych cech wykonano zgodnie z procedurami normowymi. Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na 6 próbkach dla każdego kompozytu. Moduł sprężystości został określony na 3 próbkach. Skurcz oraz pełzanie określono dla mieszanek na bazie kruszywa z odpadów ceramiki czerwonej (rys. 5.4). Wykonano po 3 próbki kompozytów RC0, RCf05, RCf10, RCc05, RCc10. Zestawienie norm i wykorzystanej aparatury przedstawiono w tabeli 10.



Rys 5.4. Badanie cech reologicznych wybranych kompozytów: a) badanie skurczu, b) badanie pełzania

Tabela 10. *Badania przeprowadzone w ramach realizacji Zadania 3*

Badana cecha	Kształt/ wymiary próbki [mm]	Norma	Urządzenie, aparatura pomiarowa, dokładność
Wytrzymałość na ściskanie	Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300mm	EN 13791:2008	Prasa wytrzymałościowa Walter+Bai 4000 kN
Moduł sprężystości	Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300mm	EN 12390-13:2014	Prasa wytrzymałościowa Walter+Bai 4000 kN + ekstensometr
Pełzanie	Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300mm	Instrukcja ITB nr 194	ekstensometr nasadowy o rozdzielczości 0,001 mm
Skurcz	Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300mm	Instrukcja ITB nr 194	Pełzarki hydrauliczne, ekstensometr nasadowy o rozdzielczości 0,001 mm

Zadanie 4 polegało na określeniu wybranych cech kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych pod obciążeniem długotrwałym (tabela 11). Badania ugięcia, zarysowania oraz deformacji powierzchni przeprowadzono na stanowisku autorskim. Szczegóły stanowiska badawczego przedstawiono w punkcie 5.1. Badania prowadzono przez 1000 dni. W badaniach zastosowano niekonwencjonalne podejście do pomiarów wybranych parametrów belek. Pomiar deformacji powierzchni oraz zarysowanie pomierzono za pomocą systemu optycznego. Badania przeprowadzono na belkach wykonanych z kompozytów cementowych przedstawionych w tabeli 7. Wszystkie szczegóły badań długotrwałych zostały omówione w publikacjach P5 i P6.

Tabela 11. *Badania przeprowadzone w ramach realizacji Zadania 4*

Badana cecha	Kształt / wymiary próbki [mm]	Procedura badań	Urządzenie, aparatura pomiarowa, dokładność
Ugięcie belek	Belki o wymiarach 100 x 200 x 2900 mm	Autorska procedura badań	Czujniki zegarowe o dokładności 0,01 mm, suwmiarka o dokładności 0,05 mm; System optyczny
Zarysowanie belek			Mikroskop o powiększeniu 36-krotnym, System optyczny
Deformacje powierzchni			ekstensometr nasadowy o rozdzielczości 0,001 mm, System optyczny

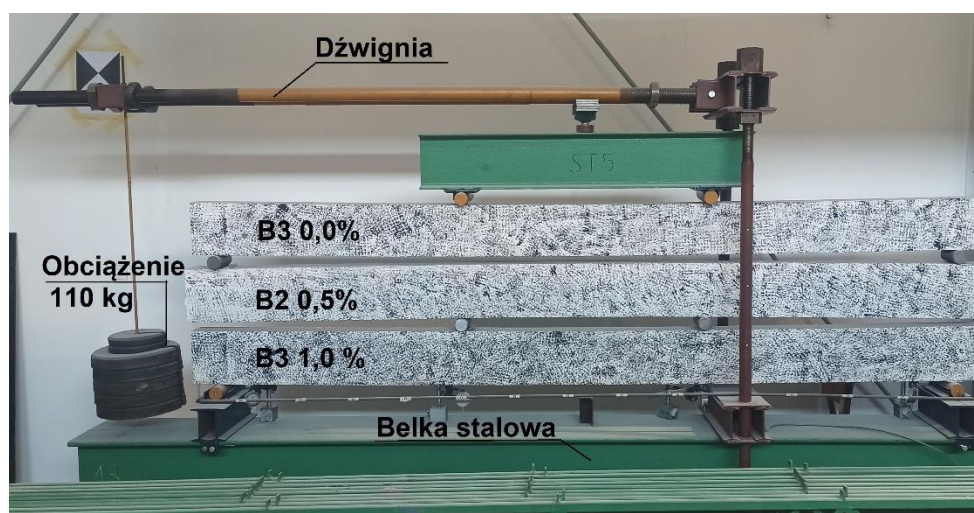
5.1. Stanowisko do badania belek poddanych obciążeniu długotrwałemu

Do określenia cech wybranych kompozytów obciążonych długotrwanie zaprojektowano autorskie stanowisko badawcze. Ideą było stworzenie stanowiska, które umożliwia badanie możliwie dużej liczby elementów, nie zajmując przy tym bardzo dużo miejsca. Ma to znaczenie w przypadku badań, które mogą trwać kilka lat i więcej. Autorskie stanowisko umożliwia jednoczesne badanie trzech belek o wymiarach 100x200x2900 mm (rys. 5.5.). Trzy belki (B1, B2, B3), o różnym stopniu zbrojenia rozproszonego, umieszczono jedna na drugiej. Belka środkowa została ustawiona w pozycji odwróconej. Głównym elementem stanowiska jest dźwignia o długości 2500

niu obciążenia dokonywano pomiarów za pomocą urządzeń manualnych. Fazy obciążeń I, II i III realizowane były kolejno w odstępach 7-dniowych. Po obciążeniu belek do wybranego poziomu zakończono pomiary doraźne. Następnie w jednakowych odstępach czasu wykonywano pomiary w celu określenia wzrostu ugięć i odkształceń w czasie.

Tabela 13. Parametry belek w pojedynczym stanowisku [P6]

Load type	Phase	Load	Interval to the next phase
Short term	I	B1 (own weight)	7 days
	II	B1+B2	7 days
	III	B1+B2+B3	1 hour
	IV	B1+B2+B3+Lever	1 hour
	V	B1+B2+B3+Lever+28kg	1 hour
	VI	B1+B2+B3+Lever+56kg	1 hour
	VII	B1+B2+B3+Lever+82kg	1 hour
	VIII	B1+B2+B3+Lever+110kg	1 hour
Long term	IX	B1+B2+B3+Lever+110kg	-



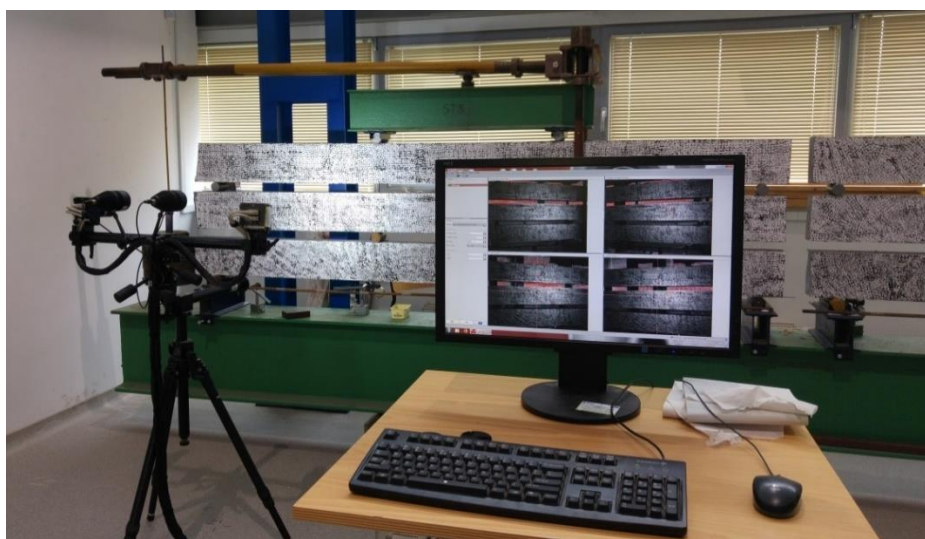
Rys 5.6. Stanowisko do badań długotrwałych belek

Powierzchnie boczne belek zostały przygotowane pod różne metody pomiarowe. Na jednej powierzchni naklejono mosiężne repery. Repery umieszczono m.in. w środkowej części belki w rozstawie 250 mm na wysokości zbrojenia rozciągającego, przy ściskanej krawędzi oraz co 40 mm pomiędzy nimi. Repery te posłużyły do określenia odkształceń powierzchni belek. Odkształcenia określono na podstawie przemieszczeń reperów pomierzonych za pomocą ekstensometru nasadowego o bazie pomiarowej 250 mm i rozdzielczości 0,001 mm. Kolejne repery umieszczono w geometrycznym środku powierzchni bocznej belek oraz w linii podpór, na środku wysokości belek. Dodatkowy reper umieszczono na niezależnym elemencie pod belką B1. Ugięcia belek oraz podpór mierzono za pomocą suwmiarki o dokładności 0,05 mm. Pomiar szerokości rozwarcia rys wykonywano na wysokości zbrojenia rozciągającego za pomocą mikroskopu optycznego o powiększeniu 36-krotnym. Druga powierzchnia została dostosowana do pomiarów optycznych. W pierwszej kolejności zaszpachlowano pory za pomocą zaprawy cementowej. Następnie na powierzchnię naniesiono czarno-biały deseń. Deseń pozwala na

określenie pozycji poszczególnych punktów powierzchni za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu. Belki od strony powierzchni mierzonej za pomocą tego systemu wraz z całym stanowiskiem przedstawiono na rysunku 5.6.

5.2. Zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiarów długotrwałych

Do określenia długotrwałych właściwości kompozytów cementowych zastosowano system optyczny. Jego zastosowanie w badaniach długotrwałych jest rozwiązaniem niekonwencjonalnym i innowacyjnym (brak w literaturze światowej takiego rozwiązania). Do pomiarów wykorzystano system GOM Aramis 4M do optycznej analizy 3D. Działanie systemu pomiarowego ARAMIS oparte jest na technice cyfrowej korelacji obrazu. Model powierzchni 3D tworzony jest na podstawie zdjęć wykonanych z dwóch kamer (Rys. 5.7.). Parametry i ustawienia układu optycznego przedstawiono w tabeli 14. W analizach ograniczono się do obszaru objętego środkową częścią wszystkich trzech belek w pozycji o szerokości 1100 mm. Z uwagi na fakt, że badania belek prowadzone były w stosunkowo długim okresie czasu, układ optyczny był wykorzystywany do pomiarów w innych badaniach i testach laboratoryjnych. Dlatego też przed każdym pomiarem był on sprawdzany i kalibrowany.



Rys 5.7. System optyczny GOM Aramis 3D

Pomiary systemem optycznym wykonano z trzech pozycji. System został skonfigurowany w taki sposób, że obszary 1 i 3 mają wspólny fragment z obszarem 2. Pod belkami przyspawano stalowy element, na który naklejono okrągłe znaczniki w celu odniesienia pomiarów na belkach do stałych punktów.

Tabela 14. Parametry ustawienia systemu optycznego [P6]

Lens focal length	20 mm
Cameras spacing	645 mm
Distance from the tested elements	1540 mm
Camera angle	21°
Calibration standard	Calibration cross CC20/1400

5.3. Dokładność pomiarowa systemu cyfrowej korelacji obrazu

Dokładność układu optycznego zależy od wielu czynników, takich jak: jakość obiektywu, wielkość obszaru pomiarowego, jakość wzoru na powierzchni, ustawienie kamer względem obiektu [72]. Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na jakość pomiarów są zmiany oświetlenia. Stanowiska badawcze w ramach etapu I (pkt 3.3) zostały umieszczone w piwnicy pozbawionej okien. Podczas badań stosowano tylko sztuczne oświetlenie. Za każdym razem, gdy wykonywano pomiary, stosowano ten sam zestaw światła. Stanowiska w ramach etapu II umieszczono w pomieszczeniu, w którym podczas pomiarów zasłaniano okna (rys. 9). Przed przystąpieniem do pomiarów wykonano test sprawności układu optycznego. Wykonano 150 zdjęć nieobciążonych belek. Wybrano trzy podstawy pomiarowe, odpowiadające kolejnym pomiarom: 12 mm (pomiar szerokości pęknięcia), 250 mm (oznaczenie deformacji) oraz 1100 mm (długość całej belki na zdjęciach). Wyniki odchylenia poddano analizie, której wyniki przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15. *Odchylenia systemu optycznego w zależności od wielkości bazy pomiarowej [P6]*

Length [mm]	Average [mm]	Standard deviation [mm]	Maximum [mm]	Minimum [mm]
1100	0.0102	0.0093	0.0165	-0.0356
250	-0.0031	0.0024	0.0036	-0.0114
12	-0.0027	0.0018	0.0025	-0.0069

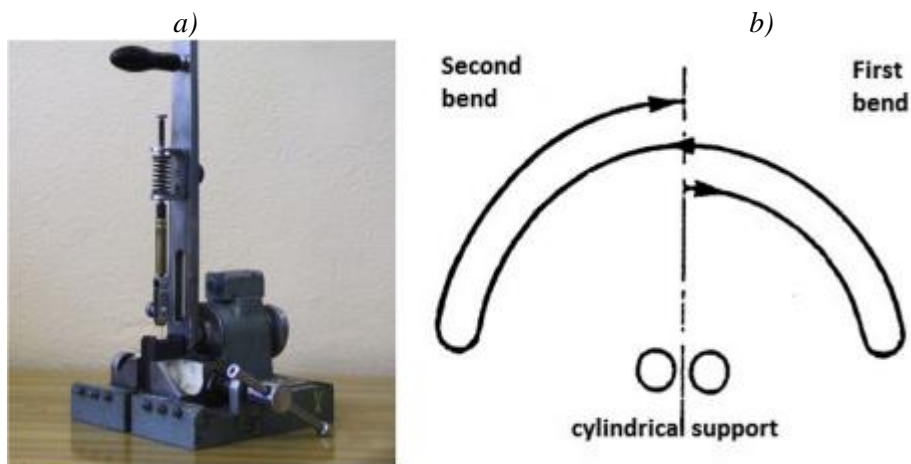
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że odchyłki pomiarowe systemu optycznego są na zadowalającym poziomie. Przyjmując całkowite maksymalne odchylenie 0,0094 mm jako dokładność pomiaru szerokości rozwarcia rysy, należy stwierdzić, że dokładność układu optycznego jest wyższa niż zastosowanego mikroskopu optycznego. Dokładność pomiaru odkształceń układu optycznego jest mniejsza niż ekstensometru. Niemniej jednak dla prowadzonych badań dokładność ta jest wystarczająca. Aby ograniczyć wpływ błędów pomiarowych na wartość mierzoną przyjęto, że dla każdego pomiaru zostanie wykonanych 10 zdjęć, a jako wartość zmierzona zostanie przyjęta wartość średnia.

6. Analiza wyników badań

W artykułach wchodzących w skład cyklu w ramach pracy doktorskiej przedstawiono badania i analizy wykraczające poza założone zadania przedstawione w punkcie 2. Stąd w niniejszej dysertacji zaprezentowano jedynie najistotniejsze z punktu widzenia realizacji zadań wyniki badań. Pominęto jedynie analizę wyników wytrzymałości resztkowych w celu stworzenia modelu matematycznego kompozytu cementowego z dodatkiem kordu stalowego oraz wyniki uzyskane w artykułach P1 i P2 dotyczące włókien, które nie zostały ostatecznie wykorzystane do wytworzenia kompozytów w badaniach głównych.

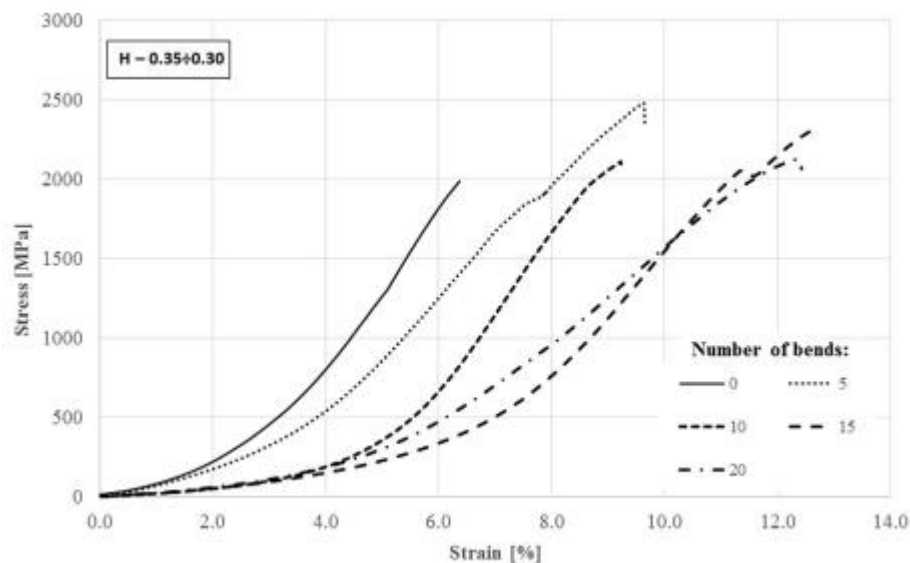
6.1. Charakterystyka wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach. Zadanie 1.

W artykule P1 przedstawiono wyniki parametrów włókien produkowanych seryjnie oraz kordu stalowego. Włókna te zostały poddane próbie dwukierunkowego przegina-
nia. Wykorzystane w badaniach urządzenie oraz schemat testu dwukierunkowego prze-
ginania przedstawiono na rysunku 6.1. Określono maksymalną ilość przegięć dla każ-
dego rodzaju włókien. Badano również wpływ określonej liczby przegięć (maksymalnie
20 przegięć pojedynczego włókna) na wytrzymałość na rozciąganie włókien.

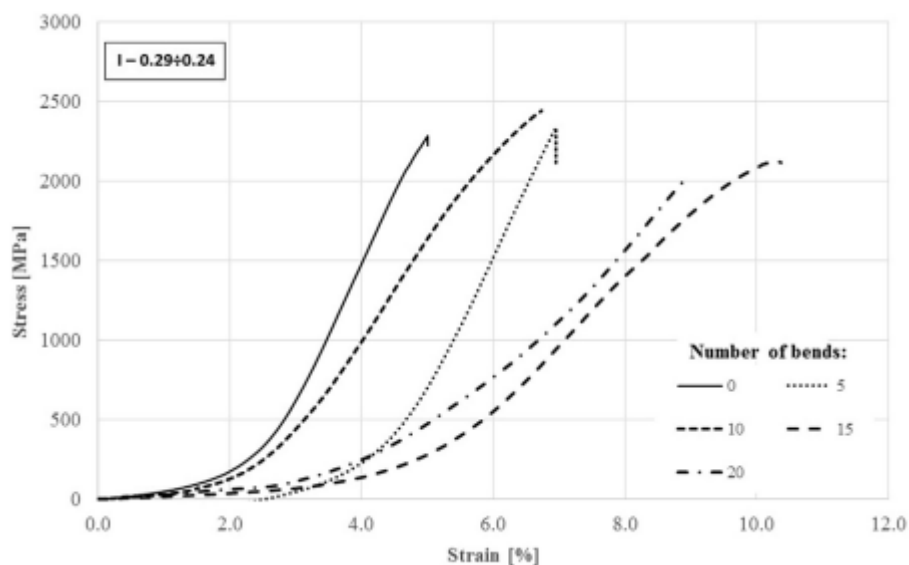


Rys 6.1. Badanie dwukierunkowego przeginań włókien : a) zastosowane urządzenie, b) schemat pojedynczej próby dwukierunkowego przeginań

Badania wykazały, że kord stalowy posiada wysokie parametry takie jak, wytrzyma-
łość na rozciąganie oraz odporność na dwukierunkowe przeginięcie. Wynika to
z faktu, że komercyjne włókna są produkowane z innego rodzaju stali niż kord stalowy
stosowany w oponach. Kord stalowy charakteryzuje się dużą odkształcalnością, co
wpływa na odporność na dwukierunkowe przeginięcie. Włókna z kordu stalowego ule-
gają zniszczeniu po blisko trzykrotnie większej ilości przegięć niż włókna komercyjne.
Na rysunkach 6.2. i 6.3. przedstawiono krzywe odkształcenie-napężenie w zależności
od ilości przegięć dla włókien o różnych średnicach.



Rys 6.2. Krzywe odkształcenie-napężenie dla kordu stalowego o średnicy w przedziale 0,30-0,35 mm w zależności od ilości przegieć



Rys 6.3. Krzywe odkształcenie-napężenie dla kordu stalowego o średnicy w przedziale 0,24-0,29 mm w zależności od ilości przegieć

Głównym wnioskiem sformułowanym na podstawie analizy wyników dla kordu stalowego jest to, że z mechanicznego i geometrycznego punktu widzenia kord stalowy, może być stosowany jako zbrojenie betonu. Ze względu na swoją wysoką ciągliwość i charakterystykę napężenie-odkształcenie po przegięciu, kord stalowy daje możliwość skomponowania wydajnego fibrobetonu przeznaczonego do obciążenia harmonicznego, obciążenia zmęczeniowego, obciążenia udarowego i obciążenia dynamicznego (wybuchami).

W artykule P6 przedstawiono rezultaty badań parametrów kruszywa odpadowego po przygotowaniu go zgodnie wytycznymi normy [64]. W trakcie badań ustalono kilka podstawowych parametrów samego kruszywa, gęstość pozorną, gęstość nasypową w stanie luźnym, jamistość oraz nasiąkliwość. Wyniki przedstawiono w tabeli 16.

Tabela 16. Właściwości zastosowanych kruszyw odpadowych [P6]

Type of aggregate	Voids	Apparent density	Loose bulk density	Water absorption
	[%]	g/cm ³	kg/dm ³	[%]
red ceramic	47.20	2.52	1.100	25.92
white ceramic	35.46	2.42	1.412	14.35
waste sand	38.00	2.59	1.634	18.54

6.2. Ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu. Zadanie 2.

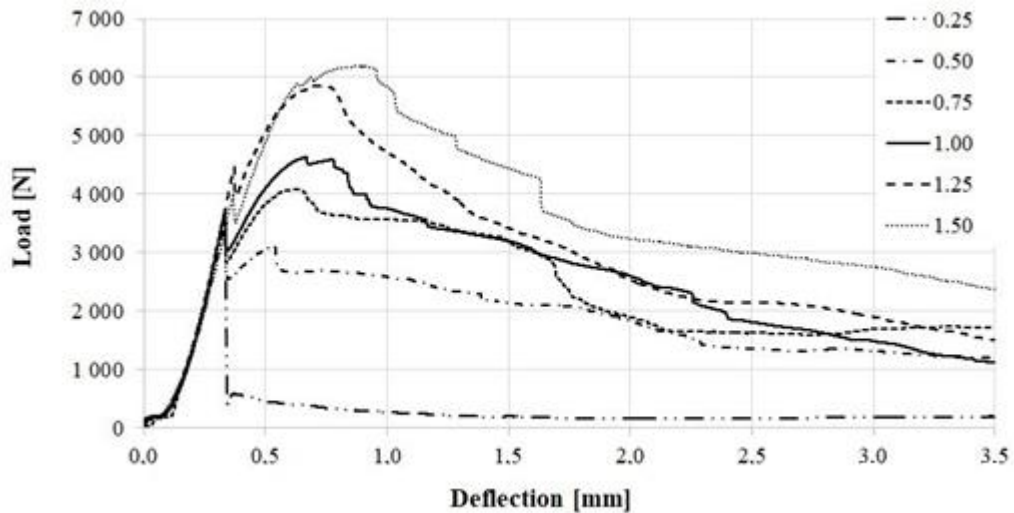
W pierwszej kolejności zbadano wpływ dodatku kordu stalowego na zaprawę cementową (rys. 6.4.). Na podstawie badań określono następujące parametry materiałowe: wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie, odporność na pękanie oraz równoważną wytrzymałość na zginanie. Szczegóły w jaki sposób określono wyżej wymienione parametry podano w artykule P3. W badaniach nie zaobserwowano istotnego wpływu dodatku kordu stalowego na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej. Wyniki mieściły się w przedziale od 50,98 MPa do 54,61 MPa. Również w przypadku wytrzymałości na zginanie wyznaczonej w chwili zarysowania belki nie odnotowano istotnych zmian wartości w zależności od ilości kordu stalowego.



Rys 6.4. Próbką z nacięciem 4 mm po zakończonym teście trypunktowego zginania.

Istotny wpływ dodatku kordu zaobserwowano dla wytrzymałości na zginanie określonej dla maksymalnego obciążenia. Wyraźne zwiększenie tej wartości odnotowano dla zapraw z dodatkiem włókien w ilości 1,25% i 1,50%. Badania przeprowadzone na próbkach o wymiarach 40 × 40 × 160 mm wykazały dobre właściwości materiałów zbrojonych kordem stalowym. W artykule wskazano wartość 0,75% jako optymalną ilość kordu stalowego. Taka ilość zapewnia stosunkowo wysoką krzywą zależności ob-

ciężenie-przemieszczenie (rys. 6.5). Również z ekonomicznego punktu widzenia taka ilość daje widoczne rezultaty przy mniejszym potencjalnym koszcie.



Rys 6.5. Wybrane krzywe obciążenie-przemieszczenie dla próbek z różną ilością zbrojenia kordem stalowym

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski dotyczące bezpośrednio włókien odpadowych:

- Kord stalowy jest pełnowartościowym, ekologicznym zamiennikiem włókien polipropylenowych. Zapewnia lepszą wytrzymałość na zginanie i większy współczynnik równoważnej wytrzymałości na zginanie.
- Zastosowanie kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego pozwoli na poprawę racjonalnej gospodarki odpadami oraz zmniejszenie zapotrzebowania na energię niezbędną do ponownego przetopienia kordu stalowego.

Analiza wpływu dodatku włókien poprzez ciągłe monitorowanie ugięcia beleczek pod obciążeniem jest dobrą metodą na wstępne określenie przydatności włókien do stosowania w betonie przed rozpoczęciem badań zgodnie z normą PN EN 14651-2005 [71].

W drugiej części Zadania 2 analizie poddano wytrzymałości resztkowe fibrobetonu zbrojonego kordem stalowym. Przeanalizowano po 3 próbki prostopadłościenne o wymiarach 150x150x600mm z zawartością włókien 0,5%, 0,75%, 1,00%, 1,25% i 1,50% w stosunku do objętości mieszanek. Wytrzymałości resztkowe stanowią podstawę oceny fibrobetonów wg normy [71]. Metodologia badawcza, została oparta o normę [71]. I została przedstawiona w artykule P2. Wynik badań wraz z współczynnikami przeliczonymi zgodnie z procedurą zawartą w Model Code 2010 przedstawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Wyniki testu trzypunktowego zginania belek ze zbrojeniem rozproszonym w postaci kordu stalowego [65]

Mix	Compressive strength (cylinders) [MPa]	Limit of proportionality [MPa]	Residual flexural tensile strength [MPa]				$f_{R,3}/f_{R,1}$	$f_{R,1}/f_{LOP}$
		f_{LOP}	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$		
0.5%	39.88	4.31	2.97	1.79	1.52	1.36	0.51	0.69
0.75%	40.29	4.33	2.94	2.17	1.93	1.65	0.66	0.68
1.0%	41.48	5.03	3.55	2.37	2.09	1.94	0.59	0.71
1.25%	40.08	4.47	3.97	3.43	3.03	2.72	0.76	0.89
1.5%	42.79	4.85	5.13	4.60	4.13	3.67	0.81	1.06

Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników w artykule P2 [65] sformułowano następujący wniosek dotyczący kordu stalowego:

- W ramach badań laboratoryjnych wykazano, że włókna stalowe pochodzące z recyklingu (kord stalowy) mają ogromny potencjał do zwiększenia resztkowej wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu. Wzrost wartości wytrzymałości resztkowych kompozytów następował systematycznie wraz ze wzrostem objętości włókien w mieszankach. Średnio wytrzymałości wzrastają o około 0,3 MPa. Największy wzrost, średnio o 0,8 MPa i 1,09 MPa, zanotowano odpowiednio dla kompozytów o najwyższych zawartościach włókien tj. 1,25% i 1,5%. Włókna odpadowe nie wpłynęły znacząco na wytrzymałość betonu na ściskanie, która oscylowała wokół wartości 40 MPa.

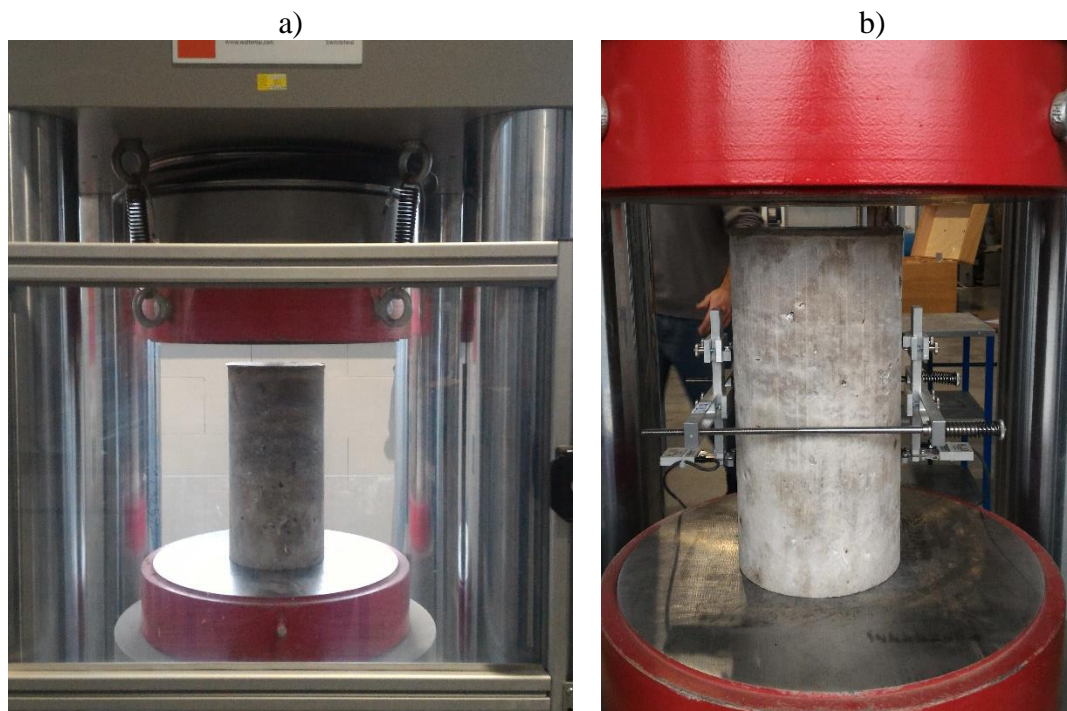
6.3. Analiza, na podstawie wytycznych normowych, doraźnych i reologicznych cech wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Zadanie 3.

W celu określenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych wybranych kompozytów na bazie materiałów odpadowych badaniom poddano próbki cylindryczne o wymiarach 150x300mm (rys. 6.6). Zbadano po 3 próbki w celu określenia modułu sprężystości oraz po 6 próbek do określenia wytrzymałości na ściskanie dla każdego kompozytu. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 18. Szczegóły dotyczące badania i przygotowania próbek opisano w artykule P5.

Na podstawie powyższych rezultatów sformułowano następujące wnioski:

- Kruszywa produkowane z odpadów z ceramiki białej, czerwonej oraz z piasku odpadowego mogą być wykorzystywane do produkcji kompozytów cementowych o właściwościach odpowiadających betonowi zwykłemu.

- Dodatek kordu stalowego do betonu poprawił jego wytrzymałość na ściskanie. Jednakże bezpośredni wpływ kordu stalowego na moduł sprężystości musi być określony przy użyciu większej liczby próbek.

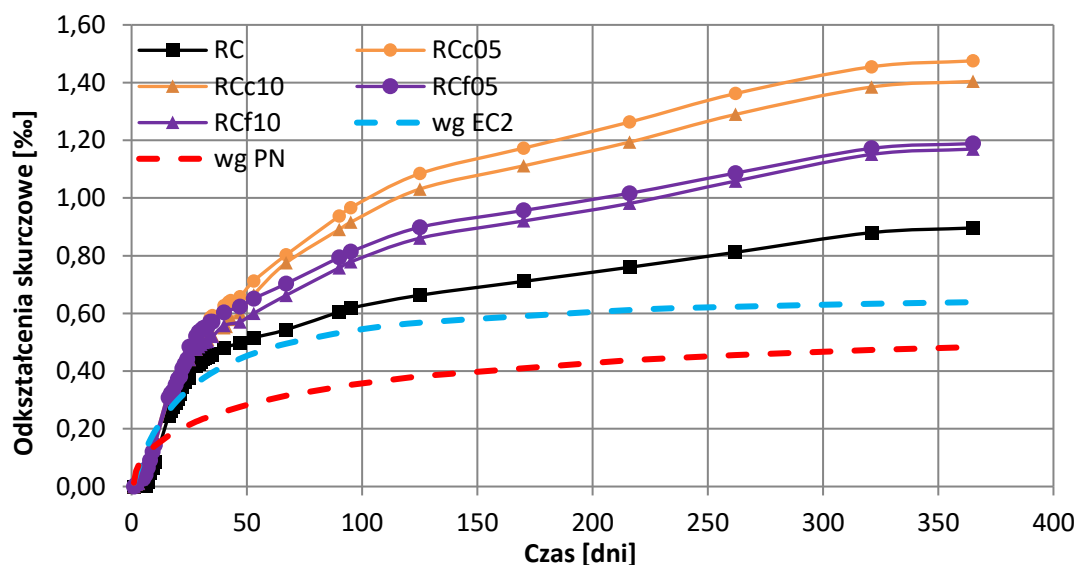


Rys 6.6. Badanie cech doraźnych wybranych kompozytów: a) wytrzymałość na ściskanie, b) moduł sprężystości.

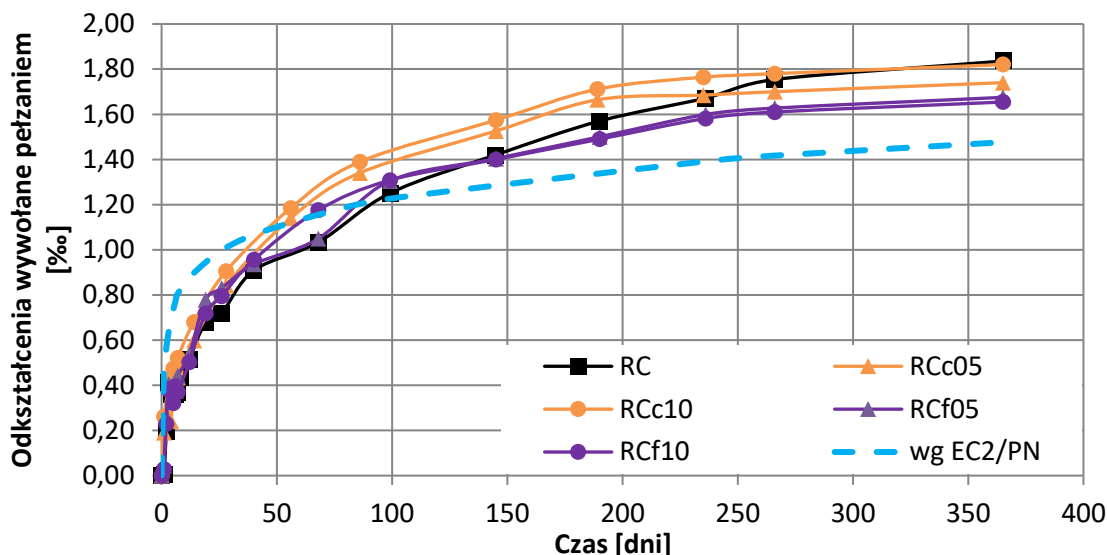
Tabela 18. Parametry wytrzymałościowe badanych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych

Mixture	Beam Number	Medium Secant Modulus of Elasticity [GPa]	Standard Deviation [GPa]	Compression Strength [MPa]	Standard Deviation [MPa]
Sc0	B3	37.89	1.84	42.03	1.88
Sc05	B2	39.50	0.54	60.51	0.72
Sc10	B1	42.20	1.20	72.53	8.76
RCf0	B3	16.56	0.32	37.74	1.55
RCf05	B2	16.97	0.11	38.82	0.69
RCf10	B1	15.04	0.31	40.24	0.92
RCc0	B3	20.05	1.12	47.55	2.75
RCc05	B2	18.74	1.83	49.40	1.91
RCc10	B1	18.65	0.12	50.52	2.12
RCSc0	B3	21.43	2.63	40.92	9.16
RCSc05	B2	23.30	0.62	48.09	0.95
RCSc10	B1	25.53	1.94	49.45	4.79
WCf0	B3	39.10	1.69	37.74	1.55
WCf05	B2	34.97	0.13	38.82	0.69
WCf10	B1	35.02	1.20	40.24	0.92
WCc0	B3	35.98	0.24	47.55	2.75
WCc05	B2	34.53	0.74	49.40	1.91
WCc10	B1	36.66	0.99	50.52	2.12
WCSf0	B3	41.15	0.72	59.20	6.04
WCSf05	B2	39.52	2.58	65.21	4.01
WCSf10	B1	40.09	0.63	66.72	4.56
WCSc0	B3	40.41	0.20	51.20	9.89
WCSc05	B2	40.91	0.22	56.12	8.23
WCSc10	B1	41.32	0.70	59.18	3.96

W artykule P4 przedstawiono wyniki badania skurczu oraz pełzania wybranych kompozytów. Tak jak opisano w punkcie 4 badaniom poddano kompozyty z kruszywem przygotowanym z odpadów z ceramiki czerwonej. Do badań skurczu i pełzania wybrano kompozyty na bazie ceramiki czerwonej z uwagi na fakt, że kruszywo uzyskane z odpadów ceramicznych charakteryzuje się większą porowatością oraz nasiąkliwością [73]. Fakt ten potwierdzają badania prowadzone przez innych naukowców [74], [75]. Zgodnie z literaturą [76] porowatość zastosowanego kruszywa ma istotny wpływ na zjawisko skurcz oraz pełzanie betonu. Jak wykazały badania własne oraz innych autorów kompozyty na bazie ceramiki czerwonej posiadają niższe parametry mechaniczne a w szczególności moduł sprężystości [77], co również wpływa na wartość skurczu oraz pełzania [78]. Badanie skurczu oraz pełzania prowadzono przez 1 rok. Próbkę ustawiono w pełzarkach hydraulicznych po 3 sztuki w każdej. Urządzenia te umożliwiają przyłożenie stałego obciążenia, niezależnego od skrócenia się próbek, przez cały okres badania. Uzyskane rezultaty porównano z wynikami określonymi na podstawie polskiej normy [79] oraz Eurokodu 2 [51]. Krzywe odkształceń w czasie badanych materiałów oraz te określone na podstawie wspomnianych norm przedstawiono a rysunkach 6.7 i 6.8.



Rys 6.7. Odkształcenia skurczowe badanych mieszanek w porównaniu do norm [40]



Rys 6.8. Odształcenia spowodowane pełzaniem badanych mieszank w porównaniu do norm [40]

Na podstawie uzyskanych odształceń wywołanych pełzaniem kompozytów określono współczynnik pełzania i zestawiono go z wartościami określonymi na podstawie normy, przyjmując rzeczywiste parametry wytrzymałościowe kompozytów. Współczynniki przedstawiono w tabelicy 19.

Tabela 19. Współczynniki pełzania określone na podstawie pomierzonych odształceń oraz obliczone zgodnie z wytycznymi normy [40]

Mixture	ϵ_{cc} [%]	ϵ_{ce} [%]	Tests	Acc. to EC
0	1.84	1.37	1.34	1.98
E0,5	1.67	1.07	1.57	1.92
E1,0	1.65	0.93	1.78	1.85
K0,5	1.74	1.06	1.64	1.89
K1,0	1.82	1.00	1.82	1.89
B9 [3]	0.43	0.36	1.19	2.63
B10 [3]	0.63	0,48	1.31	1.89
JL-B [11]	0.17	0.25	0.68	1.32

Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości włókien w kompozytach wartość współczynnika pełzania nieznacznie wzrosła. Wartości współczynników są bardzo zbliżone dla włókien stalowych 50/0.8 i kordy stalowego. Analizując wyniki przedstawione w artykule P4 sformułowano następujące wnioski:

- Stosując kruszywo otrzymane z odpadów z produkcji pustaków ceramicznych można uzyskać kompozyt o parametrach zbliżonych do betonu zwykłego
- Odształcenia testowanych kompozytów wywołane skurczem są bardzo zbliżone do wyników obliczonych na podstawie procedury zawartej w Eurokodzie 2 [51].

- Wadą kompozytów cementowych na bazie kruszywa z odpadów z ceramiki czerwonej są zwiększone odkształcenia w stosunku do betonu zwykłego. Zaleca się intensywniejszą pielęgnację takich kompozytów oraz zastosowanie dodatków zmniejszających skurcz betonu

- Skurcz i pełzanie badanych kompozytów zależą głównie od zastosowanego kruszywa. Liczba zbadanych próbek była zbyt mała by jednoznacznie określić wpływ rodzaju i ilości zbrojenia na wartości odkształceń spowodowanych skurczem i pełzaniem kompozytów.

- Deformacje spowodowane skurczem oraz pełzaniem nie ustabilizowały się w ciągu 1 roku. Wymagane są dalsze badania.

Dalsze pomiary nieopublikowane w artykule P4 wykazały, że stabilizacja następuje po około 800 dniach co znajduje odzwierciedlenie w wynikach badania ugięcia belek z kompozytu na bazie kruszywa z ceramiki czerwonej.

6.4. Analiza wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych z wykorzystaniem nowatorskiego stanowiska badawczego. Zadanie 4.

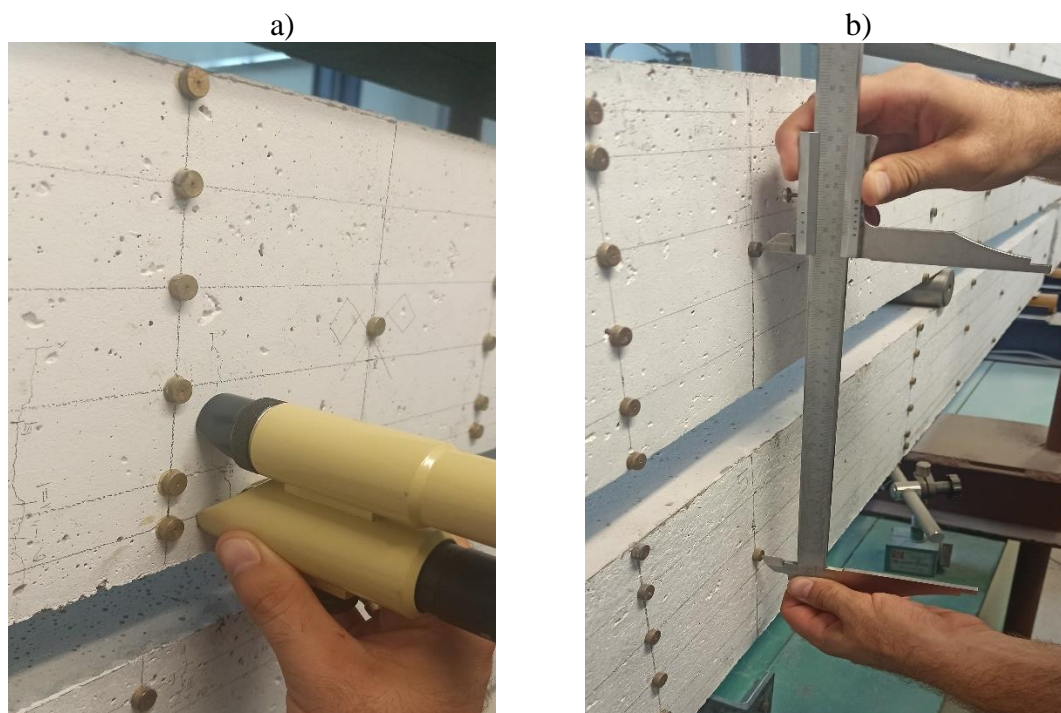
W Zadaniu 4 wyznaczono dwa cele. Pierwszym celem było określenie cech reologicznych wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych a drugim dostosowanie wybranej metody obliczeniowej do badanych kompozytów. Na podstawie uzyskanych wyników zarysowania określono współczynnik modyfikujący metodę obliczania szerokości rozwarcia rys zawartą w eurokodzie 2 [51]. Mając to na uwadze badania wykonano w dwóch etapach (I i II wg pkt. 3.3). W etapie I przeprowadzono badania na 4 stanowiskach, na których badano kompozyty RCf, RCc, WCf WCc. Na podstawie wyników określono współczynniki modyfikujące wzór na obliczanie szerokości rozwarcia rys dla elementów belkowych. W etapie II zbadano kolejne 4 stanowiska w celu potwierdzenia czy dobrane współczynniki są prawidłowe. Z uwagi na spostrzeżenia opisane w punkcie 3.1. dokonano korekty składu mieszanek w drugim etapie. W niniejszym punkcie przedstawiono jedynie najważniejsze wyniki wraz z wnioskami sformułowanymi na podstawie analiz wyników. Szczegółowy opis badań oraz sposób określania poszczególnych wartości przedstawiono w publikacjach P5 i P6.

6.4.1. Analiza wybranych cech kompozytów na bazie materiałów odpadowych pod obciążeniem długotrwałym

W artykułach P5 oraz P6 zaprezentowano analizy i wyniki głównych badań w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Analizie poddano ugięcie, zarysowanie oraz deformację belek pod obciążeniem długotrwałym. Belki badano przez 1000 dni.

W etapie I analizie poddano długotrwałe ugięcie określone za pomocą manualnych metod pomiarowych. Uzyskane wyniki porównano z wynikami obliczonymi na podstawie metody normowej zawartej w Eurokodzie 2 oraz na podstawie metod zaprezentowanych przez Tana i Bywalskiego. W tabeli 20 przedstawiono jedynie ugięcia długo-

trwałe. Doraźne wartości ugięcia nie zostały uwzględnione. Dzień obciążenia próbek traktowany jest jako początek badania. Wiek betonu w chwili obciążenia wynosił ponad 28 dni.

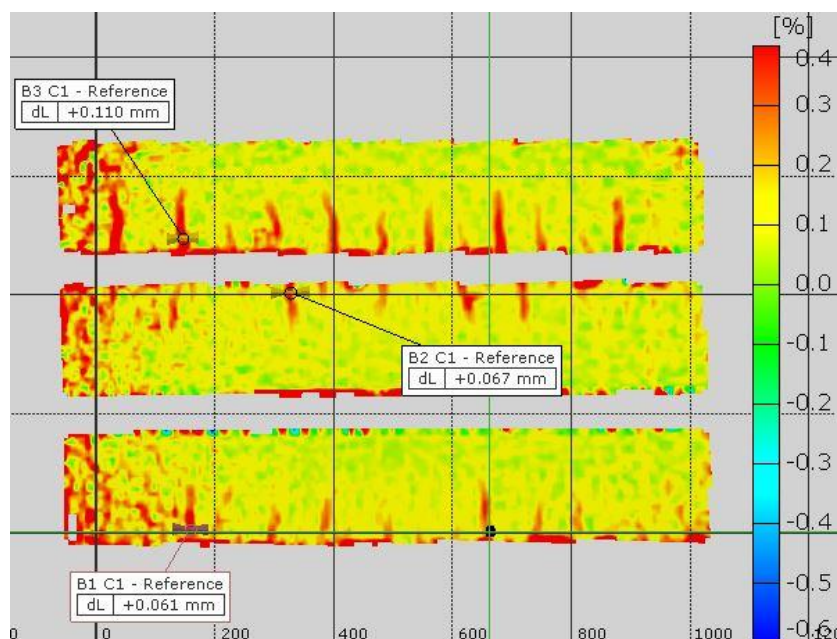


Rys 6.9. Pomiarzy za pomocą urządzeń manualnych: a) pomiar szerokości rozwarcia rys, b) pomiar odległości między belkami.

Tabela 20. Porównanie ugięć długotrwałych określonych na podstawie badań oraz metod obliczeniowych [68]

Mixture	Beam Number	Test	Calculation Methods			Δ (Deflection) [%]		
		Deflection after 1000 Days [mm]	Deflection after 1000 Days [mm]			EC2	Tan	Byw
			EC2	Tan	Byw			
Sc0	B3	4.35	5.05	-	-	-16.09	-	-
Sc05	B2	4.24	5.10	3.31	4.38	-20.28	21.93	-3.20
Sc10	B1	4.95	5.34	3.76	4.75	-7.88	24.04	4.21
RCf0	B3	18.07	6.32	-	-	65.02	-	-
RCf05	B2	16.90	6.32	5.89	6.58	62.60	65.15	156.84
RCf10	B1	17.58	7.99	7.44	9.60	54.55	57.68	83.13
RCc0	B3	12.30	6.27	-	-	49.02	-	-
RCc05	B2	8.95	6.44	5.64	5.85	28.04	36.98	52.99
RCc10	B1	10.80	7.03	6.62	6.38	34.91	38.70	69.28
RCSc0	B3	8.32	5.87	-	-	29.45	-	-
RCSc05	B2	6.97	5.88	4.81	5.61	15.64	30.99	24.24
RCSc10	B1	7.05	6.34	5.32	6.00	10.07	24.54	17.50
WCf0	B3	5.15	4.99	-	-	3.11	-	-
WCf05	B2	4.65	5.12	3.61	4.69	-10.11	22.37	-0.85
WCf10	B1	5.05	5.63	4.31	5.11	-11.49	14.65	-1.17
WCc0	B3	3.87	5.38	-	-	-39.02	-	-
WCc05	B2	3.77	5.48	3.73	4.42	-45.36	1.06	-14.71
WCc10	B1	3.95	5.54	4.23	4.82	-40.25	-7.09	-18.05
WCSf0	B3	3.87	4.83	-	-	-24.81	-	-
WCSf05	B2	3.77	4.80	3.36	4.27	-27.32	10.88	-11.71
WCSf10	B1	3.75	5.38	3.90	5.06	-43.47	-4.00	-25.89
WCSc0	B3	3.17	4.99	-	-	-57.41	-	-
WCSc05	B2	3.30	4.91	3.16	4.46	-48.79	4.24	-26.01
WCSc10	B1	3.85	5.47	3.79	5.12	-42.08	1.56	-24.80

Kolejną analizowaną cechą był przyrost szerokości rozwarcia rys w czasie (rys 6.10). W artykule P5 przedstawione zostały wyniki pomiaru szerokości rozwarcia rys, rozstawu oraz ilości rys. Wartości uzyskane podczas badań zostały porównane do wartości obliczonych na podstawie procedury zawartej w polskiej normie [79], Eurokodu 2 [51] i propozycji Vandewalle [56]. Wszystkie wspomniane wartości przedstawiono w tabeli 21.



Rys 6.10. Zarysowanie środkowych części belek analizowane w oprogramowaniu systemu optycznego

Tabela 21. Porównanie zarysowania belek określonego manualnie oraz za pomocą metod obliczeniowych [68]

Mixture	Beam Number	Crack Spacing [mm]				Max Crack Width [mm]					Number of Cracks
		Tests	PN-B	Van.	EC2	Instantaneous	After 1000 Days			Van.	
							EC2	PN-B	Van.		
Sc0	B3	93.8	76.18	69.25	95.50	0.09	0.12	0.074	0.097	0.054	10
Sc05	B2	72.9	77.64	70.58	97.99	0.09	0.14	0.069	0.092	0.049	14
Sc10	B1	64.1	78.28	71.16	99.08	0.05	0.08	0.082	0.108	0.059	14
RCf0	B3	46.6	70.00	63.69	85.11	0.09	0.12	0.063	0.090	0.047	19
RCf05	B2	47.7	70.32	63.93	85.54	0.09	0.12	0.063	0.090	0.047	19
RCf10	B1	48.8	69.68	63.35	84.46	0.10	0.10	0.073	0.103	0.055	19
RCc0	B3	44.3	72.48	65.89	89.22	0.08	0.10	0.064	0.090	0.047	22
RCc05	B2	58.1	72.17	65.61	88.68	0.09	0.10	0.062	0.089	0.046	15
RCc10	B1	49.6	78.60	65.66	88.79	0.10	0.12	0.075	0.112	0.055	21
RCSc0	B3	67.7	72.29	65.72	88.90	0.09	0.12	0.067	0.091	0.05	13
RCSc05	B2	52.3	73.50	66.76	90.85	0.06	0.12	0.066	0.091	0.049	19
RCSc10	B1	46.4	74.14	67.40	92.04	0.07	0.14	0.08	0.106	0.059	13
WCf0	B3	66.5	77.20	70.18	97.24	0.02	0.08	0.07	0.091	0.051	14
WCf05	B2	71.2	76.69	69.72	96.37	0.02	0.08	0.069	0.093	0.05	13
WCf10	B1	69.8	77.00	69.25	95.5	0.03	0.08	0.079	0.107	0.057	14
WCc0	B3	63.3	77.14	70.12	97.13	0.02	0.06	0.068	0.092	0.049	14
WCc05	B2	77.8	77.20	70.18	97.24	0.04	0.08	0.067	0.091	0.048	11
WCc10	B1	61.1	77.71	70.64	98.1	0.07	0.10	0.079	0.106	0.057	14
WCSf0	B3	76.9	77.83	70.76	98.32	0.08	0.10	0.069	0.092	0.05	12
WCSf05	B2	66.1	77.90	70.82	98.43	0.05	0.08	0.068	0.092	0.049	15
WCSf10	B1	57.6	78.02	70.93	98.64	0.03	0.04	0.081	0.105	0.058	14
WCSc0	B3	90.3	77.20	70.18	97.24	0.03	0.06	0.071	0.095	0.052	11
WCSc05	B2	71.8	77.52	70.47	97.78	0.04	0.08	0.07	0.093	0.05	11
WCSc10	B1	64.8	77.77	70.7	98.21	0.04	0.08	0.082	0.108	0.059	14

Analizując uzyskane wyniki ugięć belek sformułowano następujące wnioski:

- Dla mieszanek z kruszywem z czerwonych odpadów ceramicznych przewidywanie ugięcia wymaga odpowiednich korekt wszystkich metod obliczeniowych, ponieważ wartości uzyskane z obliczeń są zdecydowanie niższe od wartości uzyskanych w badaniach

- Ugięcie belek z odpadami porcelanowymi (WC, WSC) najlepiej obrazuje metoda przedstawiona przez Tan. Przy zastosowaniu tej metody obliczone wartości ugięcia po 1000 dniach są bardzo zbliżone lub nieznacznie niższe od uzyskanych wyników badań. Przy niewielkiej modyfikacji metody można ją wykorzystać do projektowania zoptymalizowanych konstrukcji.

W artykule P6 porównano szerokości rozwarcia rys, rozstaw rys a także ilość rys określona za pomocą dwóch metod pomiarowych. Wartości te określono za pomocą manualny urządzeń mikroskopu i suwmiarki oraz za pomocą systemu optycznego. Analizowano rysy w środkowej części belek, pomiędzy punktami przyłożenia obciążenia. Porównano wartości określone w trakcie obciążania belek (obciążenie doraźne) oraz określone po upływie 1000 dni. Zestawienie wartości przedstawiono w tabeli 22.

Tabela 22. Porównanie zarysowania belek określonego za pomocą metod manualnych oraz systemu optycznego [P6]

Stage	Mixture	Beam number	Average Crack spacing [mm]		Max. crack opening [mm]				Number of cracks	
			Manual	Optical system	Manual		Optical system		Manual	Optical system
					Instantaneous	After 1000 Days	Instantaneous	After 1000 Days		
I	RCf0	B3	46.6	49.34	0.09	0.12	0.094	0.112	19	18
	RCf05	B2	47.7	48.32	0.09	0.12	0.097	0.118	19	19
	RCf10	B1	48.8	49.68	0.10	0.10	0.073	0.103	19	19
	RCc0	B3	44.3	48.75	0.08	0.10	0.108	0.129	22	21
	RCc05	B2	58.1	56.09	0.09	0.10	0.081	0.090	15	15
	RCc10	B1	49.6	47.21	0.10	0.12	0.049	0.084	21	21
	WCf0	B3	66.5	64.86	0.02	0.08	0.011	0.057	14	14
	WCf05	B2	71.2	69.61	0.02	0.08	0.043	0.100	13	13
	WCf10	B1	69.8	65.21	0.03	0.08	0.055	0.083	14	14
	WCc0	B3	63.3	66.92	0.02	0.06	0.051	0.051	14	14
WCc05	B2	77.8	82.64	0.04	0.08	0.084	0.084	11	11	
WCc10	B1	61.1	74.75	0.07	0.10	0.108	0.108	14	13	
II	RCS0	B3	67.7	63.93	0.09	0.12	0.078	0.122	13	13
	RCS05	B2	52.3	51.82	0.06	0.12	0.081	0.115	19	19
	RCS10	B1	46.4	49.50	0.07	0.14	0.110	0.138	13	13
	WCSf0	B3	76.9	71,36	0.08	0.10	0.038	0.110	12	12
	WCSf05	B2	66.1	69.58	0.05	0.08	0.027	0.067	15	14
	WCSf10	B1	57.6	67.18	0.03	0.04	0.041	0.059	14	13
	WCS0	B3	90.3	89.15	0.03	0.06	0.071	0.083	11	11
	WCS05	B2	71.8	70.38	0.04	0.08	0.07	0.067	11	11
	WCS10	B1	64.8	67.18	0.04	0.08	0.082	0.079	14	14
	Sc0	B3	93.8	90.61	0.09	0.12	0.096	0.111	10	10
Sc05	B2	72.9	71.63	0.09	0.14	0.092	0.126	14	13	
Sc10	B1	64.1	58.62	0.05	0.08	0.047	0.063	14	14	

Kolejną badaną cechą kompozytów była deformacja strefy ściskanej pod wpływem długotrwanie działającego obciążenia. Z uwagi na brak zbrojenia w strefie ściskanej zjawisko pełzania i skurczu w tej strefie było przede wszystkim zależne od składu kompozytów. Odkształcenia powierzchni określono na podstawie pomiarów wykonanych ekstensometrem nasadowym oraz systemem optycznym. Uzyskane wartości odkształceń pozwoliły na wyznaczenie współczynnika pełzania środkowej części belki. Wymienione wyżej wartości przedstawiono w tabeli 23. Wartości te odbiegają od obliczeń wykonanych zgodnie z EC2. Niemniej są to rezultaty odzwierciedlające rzeczywistą pracę elementów belkowych

Tabela 23. Odkształcenia strefy ściskanej belek oraz określone na ich podstawie współczynniki pełzania [73]

Stage	Mixture	Beam number	Instantaneous deformation [‰]		Deformation after 1000 days [‰]		ϕ exp		ϕ EC2	
			Optical system	Manual	Optical system	Manual	Manual	Optical system		
I	RCf0	B3	-1.308	-1.244	-2.045	-1.932	1.56	1.56	2.85	
	RCf05	B2	-1.348	-1.388	-1.896	-1.604	1.16	1.41	2.78	
	RCf10	B1	-1.309	-1.236	-1.804	-1.932	1.56	1.38	2.69	
	RCc0	B3	-0.547	-0.588	-1.905	-2.04	3.45	3.48	2.21	
	RCc05	B2	-0.534	-0.564	-1.847	-1.872	3.32	3.46	2.14	
	RCc10	B1	-0.692	-0.756	-1.783	-1.676	2.22	2.58	2.10	
	WCf0	B3	-0.242	-0.168	-0.625	-0.748	2.79	2.58	1.92	
	WCf05	B2	-0.375	-0.300	-0.912	-0.808	2.69	2.43	1.85	
	WCf10	B1	-0.477	-0.708	-1.098	-0.876	1.23	2.30	1.69	
	WCc0	B3	-0.185	-0.212	-0.477	-0.644	3.02	2.58	1.71	
	WCc05	B2	-0.218	-0.280	-0.642	-0.78	2.79	2.94	1.56	
	WCc10	B1	-0.275	-0.288	-0.601	-0.628	2.19	2.19	1.48	
	RCSc0	B3	-0.459	-0.444	-1.231	-1.472	3.30	2.68	2.54	
	RCSc05	B2	-0.440	-0.408	-1.193	-1.128	2.75	2.71	2.20	
	RCSc10	B1	-0.671	-0.732	-1.276	-1.028	1.41	1.90	2.15	
	II	WCSf0	B3	-0.201	-0.192	-0.444	-0.548	2.85	2.21	1.73
		WCSf05	B2	-0.197	-0.200	-0.598	-0.62	3.10	3.04	1.59
		WCSf10	B1	-0.292	-0.288	-0.545	-0.592	2.06	1.87	1.56
WCSc0		B3	-0.173	-0.148	-0.618	-0.536	3.59	3.57	2.01	
WCSc05		B2	-0.186	-0.196	-0.523	-0.224	2.31	2.81	1.86	
WCSc10		B1	-0.197	-0.236	-0.603	-0.536	2.29	3.06	1.77	
Sc0		B3	-0.288	-0.244	-0.739	-0.668	2.74	2.57	2.34	
Sc05		B2	-0.432	-0.764	-0.859	-0.736	1.59	1.99	1.70	
Sc10		B1	-0.459	-0.480	-0.908	-0.796	1.66	1.98	1.59	

Analiza rezultatów zaprezentowanych w artykule P5 pozwoliła na sformułowanie poniższych wniosków:

- Kruszywa produkowane z białych odpadów ceramicznych oraz z piasku odpadowego mogą być wykorzystywane do produkcji betonu o właściwościach odpowiadających zwykłemu betonowi.
- Dla mieszanek z kruszywami na bazie piasku odpadowego i odpadów z czerwonej ceramiki (Sc, RC, RSC) szerokość rys można obliczyć metodą zawartą w normie PN-B; jednak uzyskane w ten sposób wartości były, w większości przypadków, nieco zaniżone. Ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych, należy stosować tę metodę obliczeniową z uwzględnieniem odpowiednich współczynników.
- Dla mieszanek z kruszywem na bazie białej ceramiki (WC, WSC) najlepsze wyniki obliczeń szerokości rozwarcia rys uzyskano metodą wg EC2. Natomiast dla mieszanek z kruszywem na bazie ceramiki czerwonej uzyskane tą metodą wartości odbiegają od wyznaczonych w badaniach średnio o ponad 50%. W przypadku belek wykonanych na bazie kruszyw odpadowych, metoda wg normy PN-B daje zawyżone wartości szerokości rozwarcia rys w porównaniu z wynikami uzyskanymi z badań laboratoryjnych.
- Obliczenia średniego rozstawu rys najlepiej przeprowadzać metodą przedstawioną przez Vandewalle, która daje wartości najbardziej zbliżone do uzyskanych w badaniach. Niemniej wartości te nadal były zawyżone. Oznacza to, że analizując rozstaw rys, ze względów bezpieczeństwa konstrukcji, nie należy preferować tej metody bez odpowiednich poprawek.

W artykule P6 sformułowano kolejne wnioski dotyczące badań głównych niniejszej dysertacji:

- Zaproponowane stanowisko może być z powodzeniem wykorzystywane do badania długoterminowych właściwości kompozytów cementowych i betonów. Różnice w obciążeniu poszczególnych belek są stosunkowo niewielkie, stąd porównanie właściwości badanych mieszanek jest zasadne.
- Układ optyczny znacznie ułatwia pomiar szerokości rozwarcia rys i ich lokalizację. Dokładność pomiaru jest większa niż w przypadku mikroskopu. Zaletą układu optycznego jest możliwość analizy odwrotnej. Po wykryciu rysy przez system optyczny, znając jej lokalizację, można przeanalizować poprzednie obrazy, aby dokładnie określić, kiedy się pojawiła. Dokładność systemu jest wystarczająca do określenia odkształceń powierzchni belek.
- Analizowane kompozyty cementowe z kruszywem z surowców odpadowych posiadają podstawowe parametry wytrzymałościowe odpowiadające betonom z kruszyw naturalnych.

6.4.2. Modyfikacja metody obliczeniowej szerokości rozwarcia rys zawartej w PN-EN 1992-1-1

Na podstawie studiów literaturowych oraz po analizie uzyskanych wyników zdecydowano się na modyfikację metody zawartej w normie PN-EN 1992-1-1 [51]. Metoda zaproponowana w normie Eurokod 2 dotycząca obliczania szerokości rys uwzględnia podstawowe parametry obliczanych elementów betonowych takie jak wymiary, ilość zbrojenia oraz działające na element obciążenie. Efekt długotrwanie działającego obciążenia jest uwzględniany poprzez określenie efektywnego modułu sprężystości uzależnionego od wielkości współczynnika pełzania. Metoda ta jednak daje zaniżone wartości szerokości rozwarcia rys przy zastosowaniu jej do obliczania belek wykonanych z kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Do zastosowania badanych kompozytów cementowych w rzeczywistych konstrukcjach wymagana jest korekta opisanej metody obliczeniowej. Z uwagi na zaobserwowaną tendencję, że wyniki uzyskane dla grup kompozytów z zastosowanym podobnym kruszywem były zbliżone do siebie, zdecydowano się na zastosowanie współczynnika korygującego wartość szerokości rozwarcia rys w zależności tylko od zastosowanego kruszywa.

W końcowym wzorze procedury obliczeniowej wg PN-EN 1992-1-1 [51] szerokość rozwarcia rysy:

$$w_k = \varepsilon \cdot s_{r,max}, \quad (1)$$

należy zastosować współczynnik korygujący wartość szerokości rozwarcia rysy:

$$w_k = a_c \cdot \varepsilon \cdot s_{r,max}. \quad (2)$$

W celu wyznaczenia współczynnika zaplanowano badania na czterech stanowiskach w ramach I etapu zgodnie z tabelą 3. Badane kompozyty podzielono na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią kompozyty cementowe na bazie ceramiki czerwonej (RCf, RCc), a drugą kompozyty na bazie ceramiki białej (WCf, WCc). W celu potwierdzenia prawidłowości wyznaczonych współczynników przeprowadzono II etap badań, w którym zgodnie z pkt. 3 dokonano niewielkiej korekty w składzie kompozytów (nadal większość kruszywa stanowiły odpady ceramiczne). Kompozyt na bazie piasków i żwirów odpadowych pochodzenia naturalnego został pominięty w analizie ze względu na niewystarczającą liczbę elementów próbnych.

W analizie stanu granicznego zarysowania belek za maksymalną szerokość rysy, dla każdej belki, przyjęto większą wartość uzyskaną z pomiarów metodami opisanymi wcześniej. Przyjęto, że obie zastosowane metody odpowiednio określają pomierzoną szerokość rys, a różnice między nimi mogą wynikać z faktu, że mierzone są różne powierzchnie belek.

Tabela 24. Pomierzona szerokość rozwarcia rys oraz wyniki obliczenia szerokości rys metodą zawartą w Eurokodzie 2

Etap	Oznaczenie kompozytu	Wartość pomierzona	Eurokod 2	$ \Delta $ [%]	Średni $ \Delta $ [%]
I	RCf0	0.120	0.063	-90.48%	68.43%
	RCf05	0.120	0.063	-90.48%	
	RCf10	0.103	0.073	-41.10%	
	RCc0	0.100	0.064	-56.25%	23.02 %
	RCc05	0.100	0.062	-61.29%	
	RCc10	0.129	0.075	-72.00%	
	WCf0	0.080	0.070	-14.29%	23.02 %
	WCf05	0.100	0.069	-44.93%	
	WCf10	0.083	0.079	-5.06%	
	WCc0	0.060	0.068	11.76%	23.02 %
	WCc05	0.084	0.067	-25.37%	
	WCc10	0.108	0.079	-36.71%	

Na podstawie analizy średnich odchyień szerokości rozwarcia rys od wartości obliczonej zgodnie z wytycznymi normowymi wyznaczono w sposób empiryczny następujące wartości współczynników:

- Współczynnik dla kompozytów cementowych na bazie kruszywa odpadowego z ceramiki czerwonej:

$$a_{rc} = 1.686 \quad (4)$$

- Współczynnik dla kompozytów cementowych na bazie kruszywa odpadowego z ceramiki białej:

$$a_{wc} = 1.191 \quad (5)$$

W tabeli 25 przedstawiono wyniki II etapu badań oraz rezultat obliczeń wykonanych za pomocą normowej oraz zmodyfikowanej metody obliczeniowej.

Tabela 25. Porównanie wyników obliczenia szerokości rys metodą zawartą w Eurokodzie 2 oraz zmodyfikowaną metodą

Etap	Oznaczenie kompozytu	Wartość pomierzona	Eurokod 2	Etap	$ \Delta $ [%]	Mod. Eurokod 2	Δ [%]	Average $ \Delta $ [%]
II	RCS _c 0	B3	0.140	0.067	-108.96%	0.113	19.31%	12.38
	RCS _c 05	B2	0.120	0.066	-81.82%	0.111	7.27%	
	RCS _c 10	B1	0.122	0.08	-52.50%	0.135	10.56%	
	WCS _f 0	B3	0.110	0.069	-59.42%	0.082	25.29%	19.70
	WCS _f 05	B2	0.080	0.068	-17.65%	0.081	1.24%	
	WCS _f 10	B1	0.059	0.081	27.16%	0.096	63.51%	
	WCS _c 0	B3	0.083	0.071	-16.90%	0.085	1.88%	
	WCS _c 05	B2	0.080	0.070	-14.29%	0.083	4.21%	
	WCS _c 10	B1	0.080	0.082	2.44%	0.098	22.08%	

W drugim etapie badań potwierdzono, że zaproponowane współczynniki przybliżają obliczone wartości szerokości rozwarcia rys w belkach wykonanych z odpowiednich kompozytów, do wartości pomierzonych w badaniach. Ostatecznie sformułowano następujący wniosek:

- Zastosowanie współczynników korekcyjnych pozwoli na dokładniejsze przewidywanie szerokości rozwarcia rys w elementach konstrukcyjnych a tym samym umożliwi projektowanie bardziej zoptymalizowanych konstrukcji. Współczynniki korekcyjne mogą być stosowane przy zawartości kruszywa odpadowego powyżej 50%.

7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania oraz analizy zaprezentowane w cyklu artykułów potwierdzają postawione w niniejszej dysertacji tezy:

1. *Możliwe jest opracowanie takiego kompozytu cementowego, wytworzonego na bazie odpadów pochodzących z fabryk porcelany, pustaków ceramicznych oraz piasku odpadowego, którego właściwości doraźne oraz długotrwałe będą odpowiadały betonowi zwyklemu.*
2. *Możliwe jest skuteczne zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych w elementach belkowych obciążonych długotrwałe.*

Wyniki uzyskane ze wszystkich badań potwierdziły, że zaproponowany skład kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych pozwala na otrzymanie materiałów o parametrach wytrzymałościowych odpowiadających betonom zwykłym. Zarówno piasek odpadowy, odpady porcelanowe jak i kord stalowy mogą zostać wykorzystane do produkcji kompozytu o odpowiednich parametrach wytrzymałościowych. W przypadku odpadów uzyskanych z produkcji pustaków ceramicznych, badania należy kontynuować w celu poprawy niektórych cech. M.in. należałoby poprzez zastosowa-

nie odpowiednich dodatków lub wzmożoną pielęgnacją zredukować odkształcenia powodowane skurczem oraz pęczaniem.

Zastosowanie systemu optycznego w badaniach długotrwałych dało zadowalające rezultaty. Wyniki uzyskane tą metodą nie odbiegały od wartości uzyskanych za pomocą mikroskopu czy ekstensometru nasadowego. Niedogodnością takiego rozwiązania jest każdorazowe dostosowanie parametrów systemu do pomiarów tj. ustawianie pozycji kamer, kąta ich nachylenia oraz kalibracja systemu. Mimo to łączny czas pomiaru za pomocą systemu optycznego był krótszy w porównaniu do pomiarów ręcznych. Istotną zaletą pomiarów wykonanych systemem optycznym jest możliwość wstecznej analizy oraz graficzne przedstawienie wyników. W trakcie analizy można powrócić do dowolnego momentu pomiarowego. Przykładem jest analiza rys, które początkowo są trudne do dostrzeżenia w systemie. Po znalezieniu miejsca zarysowania łatwo określić, w którym dokładnie momencie doszło do pojawienia się rys na elemencie.

Zaprojektowane i wykonane stanowisko do obciążania długotrwałego belek w skali naturalnej jest skuteczną propozycją badania cech reologicznych. Elementy stalowe stanowiska nie uległy nadmiernym deformacjom przez cały okres badania. Odpowiednio dobrane obciążenie doprowadziło do zarysowania na wszystkich badanych elementach. Ugięcia belek były wyraźne, a dystans pomiędzy nimi umożliwiał kontynuowanie badań.

Kontynuacja badań

Wyniki w niniejszej dysertacji uzyskano dla ograniczonej liczby próbek. W celu dalszej weryfikacji zaproponowanych współczynników należałoby przeprowadzić badania zwiększając ilość badanych elementów badawczych skupiając się już na konkretnych kompozytach z danych grup np. na kompozytach cementowym z piaskiem odpadowym (frakcje 0,125-2,0mm) ze względu na aspekt ekonomiczny przygotowania kruszywa z odpadów. Ponadto stanowisko badawcze posiada potencjał do zwiększenia jego możliwości badawczych poprzez wprowadzenie usprawnień, które pozwolą na łatwiejszą obróbkę wyników oraz uzyskanie dodatkowych rezultatów. Do stanowiska należy zamontować dodatkowe elementy, pionowe i poziome (kątowniki lub rury kwadratowe) niezależne od układu obciążenia i badanych belek. Element poziomy powinien przebiegać przez całą długość stanowiska a pionowe powinny być umieszczone możliwie blisko środka pola pomiarowego (w każdej pozycji) systemu optycznego. Elementy te powinny być umiejscowione możliwie jak najbliżej powierzchni belek. Spowoduje to, że będą one zasłaniały możliwie najmniejsze pole powierzchni badanych belek. Dodatkowo zastosowane elementy powinny mieć dostateczną sztywność i szerokość umożliwiającą umieszczenie na nich markerów. Takie usprawnienie stanowiska badawczego umożliwi pomiar ugięć wszystkich belek za pomocą systemu optycznego.

8. Bibliografia

- [1] W.-T. Tsai, “Environmental Policy for the Restriction on the Use of Plastic Products in Taiwan: Regulatory Measures, Implementation Status and COVID-19’s Impacts on Plastic Products Recycling,” *Environments*, vol. 9, no. 1, p. 7, Jan. 2022, doi: 10.3390/environments9010007.
- [2] M. D. C. Troya, O.-P. Power, and K. Kopke, “Is It All About the Data? How Extruded Polystyrene Escaped Single-Use Plastic Directive Market Restrictions,” *Front Mar Sci*, vol. 8, Feb. 2022, doi: 10.3389/fmars.2021.817707.
- [3] Dz.U. z 2019r. poz.1065, *OBWIESZCZENIE MINISTRA INWESTYCJI I ROZWOJU*) z dnia 8 kwietnia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie .
- [4] P. G. Palafox-Alcantar, D. V. L. Hunt, and C. D. F. Rogers, “The complementary use of game theory for the circular economy: A review of waste management decision-making methods in civil engineering,” *Waste Management*, vol. 102, pp. 598–612, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.11.014.
- [5] 2021/C 465/03 Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 10 lutego 2021 r. w sprawie nowego planu działania dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym (2020/2077(INI)).
- [6] https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (dostęp 1.07.2023r.).
- [7] E. Contreras-Marín *et al.*, “Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 13, p. 6159, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11136159.
- [8] S. A. Hosseini, “Application of various types of recycled waste materials in concrete constructions,” *Advances in concrete construction*, vol. 9, no. 5, pp. 479–489, 2020.
- [9] Y. J. Kim and Y. W. Choi, “Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement,” *Constr Build Mater*, vol. 30, pp. 500–504, May 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042.
- [10] J. Kong *et al.*, “Recycling of waste oyster shell and recycled aggregate in the porous ecological concrete used for artificial reefs,” *Constr Build Mater*, vol. 323, p. 126447, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126447.
- [11] A. Pappu, M. Saxena, and S. R. Asolekar, “Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials,” *Build Environ*, vol. 42, no. 6, pp. 2311–2320, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.04.015.

- [12] H. Şahan Arel, "Recyclability of waste marble in concrete production," *J Clean Prod*, vol. 131, pp. 179–188, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.052.
- [13] <https://llplastic.co.uk/llplastic-products-home> (dostęp 1.07.2023r.).
- [14] <https://www.lauridsen.pl/produkty/pierscienie-dystansowe-stozki-odciazajace-pokrywy-i-ramy-kwadratowe> (dostęp 09.08.2023r.).
- [15] J. Laskowska-Bury, "Selected physico-mechanical properties fiber reinforced composite produced on waste aggregate (in Polish).," 2009.
- [16] Ö. Zeybek *et al.*, "Influence of Replacing Cement with Waste Glass on Mechanical Properties of Concrete," *Materials*, vol. 15, no. 21, p. 7513, Oct. 2022, doi: 10.3390/ma15217513.
- [17] J.-X. Lu, H. Zheng, S. Yang, P. He, and C. S. Poon, "Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products," *Constr Build Mater*, vol. 223, pp. 210–220, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.231.
- [18] A. İ. Çelik *et al.*, "Mechanical Behavior of Crushed Waste Glass as Replacement of Aggregates," *Materials*, vol. 15, no. 22, p. 8093, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15228093.
- [19] J. Domski and M. Zakrzewski, "Deflection of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Based on Waste Sand," *Materials*, vol. 13, no. 2, p. 392, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13020392.
- [20] W. Głodkowska and M. Ziarkiewicz, "Cracking behavior of steel fiber reinforced waste sand concrete beams in flexure – Experimental investigation and theoretical analysis," *Eng Struct*, vol. 176, pp. 1–10, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.097.
- [21] M. Lehmann and W. Głodkowska, "Shear Capacity and Behaviour of Bending Reinforced Concrete Beams Made of Steel Fibre-Reinforced Waste Sand Concrete," *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 2996, Jun. 2021, doi: 10.3390/ma14112996.
- [22] N. Flores Medina, D. Flores-Medina, and F. Hernández-Olivares, "Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete," *Constr Build Mater*, vol. 129, pp. 25–36, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007.
- [23] L.-J. Li, G.-R. Tu, C. Lan, and F. Liu, "Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled-aggregate concrete," *J Clean Prod*, vol. 124, pp. 325–338, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.003.
- [24] N. Flores Medina, D. Flores-Medina, and F. Hernández-Olivares, "Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acous-

- tical properties of rubberized concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 129, pp. 25–36, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.007.
- [25] S. M. S. Pereira, J. R. M. Oliveira, E. F. Freitas, and P. Machado, “Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes,” *Constr Build Mater*, vol. 41, pp. 209–215, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.005.
- [26] S. R. Salimbahrami and R. Shakeri, “Experimental investigation and comparative machine-learning prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete,” *Soft comput*, vol. 25, no. 2, pp. 919–932, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00500-021-05571-1.
- [27] W. Kubissa and R. Jaskulski, “Improving of Concrete Tightness by Using Surface Blast-cleaning Waste as a Partial Replacement of Fine Aggregate,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Dec. 2019, doi: 10.3311/PPci.14512.
- [28] M. Hornakova, J. Katzer, J. Kobaka, and P. Konecny, “Lightweight SFRC Benefitting from a Pre-Soaking and Internal Curing Process,” *Materials*, vol. 12, no. 24, p. 4152, Dec. 2019, doi: 10.3390/ma12244152.
- [29] W. Głodkowska, J. Laskowska-Bury, and J. Kobaka, “Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego,” *Materiały Budowlane*, vol. 9, pp. 28–30, 2013.
- [30] D. S. Vijayan *et al.*, “A Comprehensive Analysis of the Use of SFRC in Structures and Its Current State of Development in the Construction Industry,” *Materials*, vol. 15, no. 19, p. 7012, Oct. 2022, doi: 10.3390/ma15197012.
- [31] P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, and P. Krausz, “Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum,” *J Mater Sci*, vol. 45, no. 3, pp. 793–803, Feb. 2010, doi: 10.1007/s10853-009-4002-x.
- [32] Salahaldeen Alsadey, “Utilization of Plastic Bottle Waste in Concrete,” *Journal of Biological and Environmental Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2016.
- [33] T. Akshaya, G. Manikandan, J. Esther Baby, and I. Jaambavi, “WITHDRAWN: Experimental study on bending behaviour of fibre reinforced concrete by using lathe waste fiber,” *Mater Today Proc*, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.324.
- [34] F. Alrshoudi *et al.*, “Drying shrinkage and creep properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101522, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101522.

- [35] D. Nakov, "Experimental and Analytical Analysis of Creep of Steel Fibre Reinforced Concrete," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Sep. 2017, doi: 10.3311/PPci.11184.
- [36] A. Domingo, C. Lázaro, F. L. Gayarre, M. A. Serrano, and C. López-Colina, "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete," *Mater Struct*, vol. 43, no. 8, pp. 1147–1160, Oct. 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9573-0.
- [37] S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, and I. González-Taboada, "Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage," *Constr Build Mater*, vol. 122, pp. 95–109, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.050.
- [38] F. L. Gayarre, J. S. González, C. L.-C. Pérez, M. A. Serrano López, P. S. Ros, and G. Martínez-Barrera, "Shrinkage and creep in structural concrete with recycled brick aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 228, p. 116750, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116750.
- [39] K. H. Tan and M. K. Saha, "Ten-Year Study on Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams," *ACI Struct J*, pp. 472–480, 2005.
- [40] M. Zakrzewski, A. Sanok, and J. Domski, "Rheological Properties of Concrete Based on Waste Materials," 2023, pp. 175–184. doi: 10.1007/978-3-031-26879-3_14.
- [41] C. Miàs, L. Torres, A. Turon, and I. A. Sharaky, "Effect of material properties on long-term deflections of GFRP reinforced concrete beams," *Constr Build Mater*, vol. 41, pp. 99–108, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.055.
- [42] S. Hong and S.-K. Park, "Long-term behavior of fiber-reinforced-polymer-plated concrete beams under sustained loading: Analytical and experimental study," *Compos Struct*, vol. 152, pp. 140–157, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.05.031.
- [43] P. Chen, X. Zhou, W. Zheng, Y. Wang, and B. Bao, "Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams," *Journal of Building Engineering*, vol. 30, p. 101241, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101241.
- [44] L. Peng, Y. Zhao, and H. Zhang, "Flexural behavior and durability properties of recycled aggregate concrete (RAC) beams subjected to long-term loading and chloride attacks," *Constr Build Mater*, vol. 277, p. 122277, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122277.

- [45] W. Cao, Y. Liu, Q. Qiao, Y. Feng, and S. Peng, "Time-Dependent Behavior of Full-Scale Recycled Aggregate Concrete Beams under Long-Term Loading," *Materials*, vol. 13, no. 21, p. 4862, Oct. 2020, doi: 10.3390/ma13214862.
- [46] N. Tošić, S. Marinković, N. Pecić, I. Ignjatović, and J. Dragaš, "Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete," *Constr Build Mater*, vol. 176, pp. 344–358, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.002.
- [47] A. S. Ezeldin and Shiah T.W., "Analytical immediate and long-term deflections of fibereinforced concrete beams," *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 727–738, 1995.
- [48] A. S. Ezeldin and P. N. Balaguru, "Normal- and High-Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 415–429, Nov. 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:4(415).
- [49] K. H. Tan, P. Paramasivam, and K. C. Tan, "Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Struct J*, vol. 91, no. 4, 1994, doi: 10.14359/4144.
- [50] C. Z. BYWALSKI and M. KAMIŃSKI, "Estimation of the bending stiffness of rectangular reinforced concrete beams made of steel fibre reinforced concrete," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 553–571, Jan. 2011, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60101-0.
- [51] PN-EN 1992-1-1, "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings."
- [52] O. T. Ibrahim and A. R. Luxmore, "Control of cracks width by inclusion of fibres in conventionally reinforced concrete," *International Journal Cement Comp.*, pp. 77–89, 1979.
- [53] D. Nemegeer, L. Wandewalle, D. Van Nieuwenburg, A. Van Gysel, J. Vyncke, and E. Deforche, "Dramix guideline: Design of concrete structures – Steel wire fibre reinforced concrete structures with or without ordinary reinforcement," *Infrastructuur in het leefmilieu*, vol. 4, pp. 227–239, 1995.
- [54] NBN B 15-238:1992 Tests on fibre reinforced concrete - Bending test on prismatic samples.
- [55] R. J. Frosch, "Modeling and control of side face beam cracking," *ACI Struct J*, pp. 276–385, 2002.
- [56] L. Vandewalle, "Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers," *Mater Struct*, vol. 33, no. 3, pp. 164–170, Apr. 2000, doi: 10.1007/BF02479410.

- [57] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [58] Lafarge, "Karta Charakterystyki dla cementu CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R."
- [59] PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu -- Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu."
- [60] Sika ViscoCrete 5-600, "Karta informacyjna produktu."
- [61] PN-EN 13263-1:2010, Pył krzemionkowy do betonu. Część 1. Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
- [62] Karta charakterystyki pyłu krzemionkowego.
- [63] PN-EN 14889-1:2007 Włókna do betonu -- Część 1: Włókna stalowe -- Definicje, wymagania i zgodność.
- [64] PN-EN 1766:2017, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Reference concretes for testing."
- [65] M. Pająk, M. Krystek, M. Zakrzewski, and J. Domski, "Laboratory Investigation and Numerical Modelling of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fibers," *Materials*, vol. 14, no. 8, p. 1828, Apr. 2021, doi: 10.3390/ma14081828.
- [66] <https://gumeko.pl/>.
- [67] K. N. Hylands and V. Shulman, *Civil Engineering Applications of Tyres*. Civil Engineering Applications of Tyres, 2003.
- [68] M. Zakrzewski and J. Domski, "Cracking Behavior and Deflections in Recycled-Aggregate Beams Reinforced with Waste Fibers Subjected to Long-Term Constant Loading," *Materials*, vol. 16, no. 10, p. 3622, May 2023, doi: 10.3390/ma16103622.
- [69] M. Zakrzewski, M. Gancarz, K. Tvrdá, J. Laskowska-Bury, and J. Domski, "Comparative Analysis of Waste, Steel, and Polypropylene Microfibers as an Additive for Cement Mortar," *Materials*, vol. 16, no. 4, p. 1625, Feb. 2023, doi: 10.3390/ma16041625.
- [70] J. Domski, J. Katzer, M. Zakrzewski, and T. Ponikiewski, "Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete," *J Clean Prod*, vol. 158, pp. 18–28, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.165.
- [71] EN 14651:2005, "Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)." 2005.

- [72] Ł. Krawczyk, M. Gołdyn, and T. Urban, “O NIEDOKŁADNOŚCIACH SYSTEMÓW CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU,” *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 2017, doi: 10.7862/rb.2017.120.
- [73] Mateusz Zakrzewski and Jacek Domski, “Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials,” *Rocznik Ochrony Środowiska*, 2023.
- [74] A. A. Aliabdo, A.-E. M. Abd-Elmoaty, and H. H. Hassan, “Utilization of crushed clay brick in concrete industry,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 151–168, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.aej.2013.12.003.
- [75] D. M. Sadek, “Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates,” *J Adv Res*, vol. 3, no. 3, pp. 253–260, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jare.2011.08.001.
- [76] F. H. Wittmann, “Creep and Shrinkage Mechanisms,” in *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons Ltd.
- [77] A. E. B. Cabral, V. Schalch, D. C. C. D. Molin, and J. L. D. Ribeiro, “Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 4, pp. 421–430, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011.
- [78] H. Dondalewski and M. Januszewski, *Betony cementowe zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2008.
- [79] PN-B-03264:2002, “Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone -- Obliczenia statyczne i projektowanie.”

SPIS POZOSTAŁYCH PUBLIKACJI NIE WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU W
RAMACH PRACY DOKTORSKIEJ

1. Zakrzewski, M., (2015). Badanie drobnowymiarowych wyrobów stalowych poddanych próbie dwukierunkowego przeginięcia, Monografia: *Nowoczesne projektowanie i realizacja konstrukcji budowlanych*, Kraków, SKNKŻ KONKRET, s. 173-180.
2. Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M., (2016). Mechanical characteristics of used bent rebars as a factor limiting their reuse, The 9th International Concrete Conference 2016 Environment, Efficiency and Economic Challenges for Concrete, 4-6 July 2016, pp. 123-130, Dundee, Scotland.
3. Zakrzewski, M., Polek, K., (2017). Zastosowanie systemu fotogrametrycznego do trójwymiarowych pomiarów przemieszczeń w badaniach statycznych, Monografia: *Współczesne budownictwo w badaniach młodych naukowców*, s. 40-52.
4. Polek, K., Zakrzewski, M., (2017). Optyczny pomiar przemieszczeń elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonu, Monografia: *Współczesne budownictwo w badaniach młodych naukowców*, s. 73-84.
5. Wesółowski, M., Ludewicz, J., Zakrzewski, M., Domski, J., (2017) Shear properties evaluation of a truss core of sandwich beams, IOP Conference Series : *Materials Science & Engineering*, vol. 251, s. 1-7. Article Number: 012085, 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST), SEP 27-29, 2017 Riga, Latvia;
6. Polek, K., Zakrzewski, M., Piekarski, P. (2019) Wpływ włókien stalowych na wybrane właściwości kompozytów cementowych na bazie regranulatu EPS. *Materiały budowlane*, 6, 72-73. DOI 10.15199/33.2019.06.11
7. Domski, J., Zakrzewski, M., & Laskowska-Bury, J. (2019). Bending moment of the waste fine aggregate concrete beams. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 21, 1505-1514.
8. Domski, J., & Zakrzewski, M. (2020). Deflection of steel fiber reinforced concrete beams based on waste sand. *Materials*, 13(2), 392. <https://doi.org/10.3390/ma13020392>
9. Sanok, A., Zakrzewski, M., Lehmann, M., & Domski, J. (2023). Effect of the Addition of Waste Fibers on Some Properties of Concrete. In *Environmental Challenges in Civil Engineering II* (pp. 185-196). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-26879-3_15