

dr inż. Agnieszka Michalik

mgr inż. Piotr Kupisz

inż. Łukasz Zacharski

Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie

mgr inż. Edyta Gosk

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

Mrozoodporność betonu lekkiego zbrojonego włóknem stalowym

Streszczenie

Betony lekkie kruszywowe, ze względu na możliwość osiągnięcia wysokich wytrzymałości przy niskim ciężarze (niskiej gęstości), mogą być szeroko stosowane zarówno w prefabrykacji jak i w budownictwie monolitycznym, gdzie znaczenie ma szybkie i ekonomiczne budownictwo. Analiza literatury wskazała, że znaczącym ograniczeniem jego zastosowania jest niska wytrzymałość na rozciąganie (kruchość) a także niska mrozoodporność, co znacznie ogranicza jego zastosowanie w konstrukcjach zewnętrznych. Przy wykonywaniu betonu na kruszywie lekkim istotne jest wstępne nasączenie kruszywa oraz odpowiednie wymieszanie składników, z uwagi na wysoką porowatość i nasiąkliwość kruszyw lekkich. W pracy przedstawiono metodę wykonywania betonu na kruszywie lekkim z dodatkiem rozproszonych włókien stalowych. Przedstawiono również wyniki badań mrozoodporności oraz właściwości betonu związane z rozciąganiem i zbrojeniem betonu lekkiego tj. wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu do betonu lekkiego niezbrojonego, oraz dystrybucja włókien metodą tomografii komputerowej. W niniejszej pracy zastosowano wysokowytrzymałe kruszywo lekkie w dwóch frakcjach, powstałe ze spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni (m.in. popioły lotne). Jako zbrojenie zastosowano włókna stalowe haczykowate. Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe prawidłowo rozprawdzają się w betonie lekkim stanowiąc efektywne zbrojenie dla kruchej matrycy cementowej. Natomiast prawidłowe napowietrzenie zaprawy cementowej a następnie betonu na kruszywie lekkim jest istotne dla zapewnienia wysokiej mrozoodporności do zastosowania na zewnątrz. Praca przyczyni się do pozyskania nowej wiedzy w zakresie betonów lekkich i możliwościach ich zastosowania w konstrukcjach zewnętrznych.

Abstract

Lightweight aggregate concretes (LWAC), due to the possibility of achieving high strengths at low weight (low density), can be widely used both in prefabrication and in

monolithic construction, where fast and economical construction is important. Analysis of the literature has shown that a significant limitation of its use is low tensile strength (brittleness) and low frost resistance, which significantly limits its use in external structures. When making concrete on lightweight aggregate, it is important to pre-soak the aggregate and properly mix the components, due to the high porosity and water absorption of lightweight aggregates. The paper presents a method for making concrete on lightweight aggregate with the addition of dispersed steel fibers. The results of the frost resistance tests and concrete properties related to the tension and reinforcement of lightweight concrete are also presented, i.e. tensile strength in bending, tensile strength in splitting, residual tensile strength, compared to unreinforced lightweight concrete, and fibers distribution using the computed tomography method. In this work, high-strength lightweight aggregate in two fractions, resulting from the sintering of waste materials from power plants and combined heat and power plants (including fly ash), was used. Hooked steel fibers were used as reinforcement. The test results indicate that steel fibers distribute properly in lightweight concrete, constituting an effective reinforcement for the brittle cement matrix. On the other hand, proper aeration of the cement mortar and then concrete on lightweight aggregate is important for ensuring high frost resistance for outdoor use. The work will contribute to the acquisition of new knowledge in the field of lightweight concrete and the possibilities of their use in outdoor structures.

1. Wprowadzenie

Beton zwykły jest najczęściej wykorzystywanym materiałem konstrukcyjnym w budownictwie, stąd betony lekkie na kruszywach lekkich często są postrzegane jako materiał charakteryzujący się głównie niską gęstością i ograniczoną przydatnością konstrukcyjną, co ograniczało ich zastosowanie jedynie jako izolacja termiczna i akustyczna. Jednak wraz z rozwojem wysokowytrzymałych kruszyw lekkich, cementów i domieszek chemicznych, współczesne betony lekkie kruszywowe (ang. LWAC - Lightweight Aggregate Concrete) z powodzeniem mogą być stosowane jako wartościowy materiał konstrukcyjny. Ze względu na możliwość osiągnięcia wysokich wytrzymałości (nawet > 60 MPa) przy niskim ciężarze (niskiej gęstości), betony lekkie kruszywowe mogą być szeroko stosowane zarówno w prefabrykacji jak i w budownictwie monolitycznym [1-4], gdzie współczesna infrastruktura stoi w obliczu zwiększonego zapotrzebowania na szybkie i ekonomiczne budownictwo. Redukcja ciężaru własnego i wysoki stosunek wytrzymałości do masy to główne przewagi betonu LWAC nad betonem zwykłym, np. przy budowie wiaduktów, mostów o dużej rozpiętości, pływających platformach, wieżowcach, gdzie ciężar własny betonu zwykłego stanowi znaczną część obciążenia obliczeniowego [2]. Zmniejszając ciężar konstrukcji, lekki beton zmniejsza również obciążenia projektowe np. fundamentów i stropów, co może przyczynić się do obniżenia kosztów. Betony lekkie LWAC znajdują również zastosowanie w produkcji takich elementów jak: pustaki kominowe, pustaki wentylacyjne, pustaki ścienne, gazony, palisady, bloczki fundamentowe. Betony LWAC sprawdzą się również jako izolacja termiczna w ścianach piwnicznych i fundamentowych, a także jako warstwa podłogi betonowej (pełnią rolę podłoża betonowego i izolacji termicznej jednocześnie).

Analiza literatury wskazała, że ograniczeniem stosowania betonu na kruszywie lekkim w konstrukcjach jest jego kruchość, charakteryzująca się niską wytrzymałością na rozciąganie co ogranicza jego zastosowanie konstrukcyjne. Dodatkowo zapewnienie mrozoodporności betonu LWAC rozszerzy zakres jego stosowania na zewnątrz. Powyższe wady związane z kruchością można wyeliminować wprowadzając zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych, które stanowią będą zbrojenie rozproszone zwiększające energię pęknięcia betonu LWAC. Natomiast odporność na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie betonu lekkiego można podwyższyć poprzez wprowadzenie do receptury domieszek napowietrzających, gdyż stosowane kruszywo lekkie spiekane wykazuje dobrą mrozoodporność. Modyfikacja betonu na kruszywie lekkim spiekany w mrozoodporny fibrobeton na kruszywie lekkim przyczyni się do wzrostu jego zastosowania w budownictwie konstrukcyjnym oraz w zastosowaniach na zewnątrz.

W niniejszej pracy zastosowane będzie wysokowytrzymałe kruszywo lekkie powstałe ze spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni (m.in. popioły lotne) [5]. Kruszywo to pozwala wykonać betony lekkie wysokiej wytrzymałości (> 60 MPa). Stosowanie kruszyw lekkich powstałych z materiałów odpadowych jest zgodne z polityką zrównoważonego budownictwa, która wskazuje na oszczędność surowców naturalnych i jak największe zastosowanie surowców z recyklingu [11, 12]. Badania nad zastosowaniem kruszywa lekkiego w betonach konstrukcyjnych z powodzeniem prowadzone są m.in. na Politechnice Łódzkiej [6, 7], Politechnice Krakowskiej [4, 8] oraz w ostatnich latach w również w Instytucie Techniki Budowlanej [9,10].

Praca przyczyni się do poszerzenia wiedzy w zakresie technologii fibrobetonów na kruszywie lekkim. [1, 3, 13, 14]. Dotychczas prowadzone badania betonu na kruszywie lekkim spiekany wykazały, że znaczącym ograniczeniem jego zastosowania jest niska wytrzymałość na rozciąganie (kruchość) a także niska mrozoodporność, co znacznie ogranicza jego zastosowanie w konstrukcjach zewnętrznych. Badania fibrobetonów z włóknami wskazują, że dodatek włókien stalowych w odpowiedniej ilości przyczynia się do wzrostu cech wytrzymałościowych oraz mechanicznych, jednak istotna jest również dobrze zaprojektowana i mrozoodporna matryca cementowa, co stanowi problem naukowy w niniejszej pracy. Z uwagi na charakterystykę ziarn kruszywa lekkie odznaczają się wysoką porowatością i nasiąkliwością co może przyczynić się do problemów technologicznych przy wykonywaniu mieszanek betonowych i odpowiednim ich napowietrzeniu. Kluczowe jest zawartość wody w recepturze betonu z kruszywem lekkim taka, aby mogły efektywnie zajść reakcje hydratacji cementu, odpowiednie napowietrzenie zaczynu cementowego oraz zapewnienie otuliny kruszywa i włókien stalowych w recepturze fibrobetonu lekkiego. Również istotnym czynnikiem jest wcześniejsze nasączenie kruszywa lekkiego. Wszystkie te aspekty zostały przedstawione w niniejszym artykule.

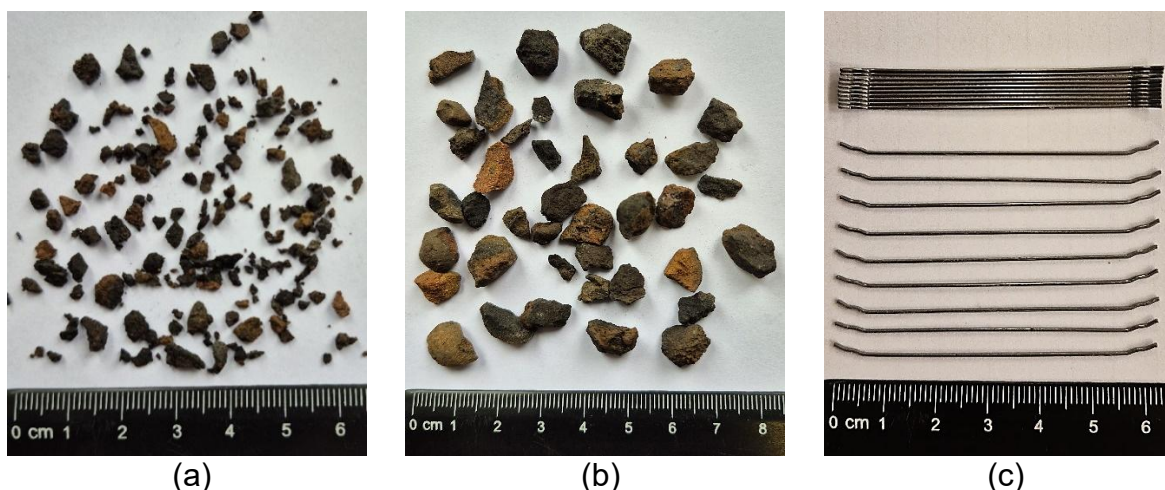
2. Materiały

2.1 Kruszywo lekkie, włókna stalowe

W niniejszej pracy do betonu lekkiego kruszywowego zastosowano ekologiczne, sztuczne kruszywo lekkie w dwóch frakcjach: 1-4 i 4-9 mm, powstałe w

wyniki spiekania materiałów odpadowych z elektrowni i elektrociepłowni takich jak popioły lotne. Sztuczne kruszywo lekkie produkowane jest w technologii bezodpadowej, proces spiekania jest autotermiczny – paliwo zewnętrzne potrzebuje jest jedynie do zainicjowania spiekania. Odzyskiwane jest ciepło procesowe (spaliny o temperaturze do 1000 °C), które częściowo wykorzystywane jest do celów produkcyjnych. Otrzymywane kruszywo lekkie jest produktem ekologicznym, którego cenne właściwości, takie jak trwałość, wytrzymałość i niska waga, determinują dalsze wykorzystanie w budownictwie jako kruszywo do betonów lekkich, w lekkich prefabrykowanych elementach budowlanych, w warstwach termoizolacyjnych, w drogownictwie, w geotechnice i ogrodnictwie (warstwy drenażowe).

Na fotografii 1 a i b przedstawiono wygląd kruszywa lekkiego o dwóch frakcjach. A w tabeli 1 i 2 przedstawiono właściwości kruszywa lekkiego zastosowanego w niniejszej pracy.



Fotografia 1 Kruszywo lekkie fibrobetonie lekkim kruszywowym, (a) kruszywo lekkie 1-4 mm, (b) kruszywo lekkie 4-9 mm, (c) włókna stalowe.

Tabela 1. Właściwości kruszywa lekkiego spiekanego frakcji 1-4 mm

Właściwości	frakcja 1-4 mm
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	650
Zawartość chlorków [%]	≤ 0,05
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie [%]	≤ 1,0
Zawartość siarki całkowitej [%]	≤ 1,0
Promieniowanie radioaktywne	$f_1 \leq 1,2$
	$f_1 \leq 240 \text{ Bq/kg}$
Uwalniane metale ciężkie	poniżej najwyższej dopuszczalnej wartości

Tabela 2. Właściwości kruszywa lekkiego spiekanego frakcji 4-9 mm

Właściwości	frakcja 4-9 mm
Gęstość ziarn [kg/m ³]	1300
Nasiąkliwość po 24h [%]	20
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	700
Zawartość pyłów [%]	1,9
Odporność na miażdżenie [MPa]	5,0

Zastosowano zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych o średnicy 0,75 mm, haczykowatym kształcie, długości 60 mm i smukłości (stosunek długości do średnicy) 80. Włókna charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie 2 200 MPa i modułem Younga 210 GPa.

2.2 Receptura betonu lekkiego

W tabeli 3 przedstawiono zaprojektowaną recepturę betonu lekkiego z włóknami stalowymi. Z założenia miał to być beton do zastosowań na zewnątrz (mrozoodporny) oraz zbrojony włóknami stalowymi, w celu poprawy odporności na kruche pękanie. Włókna stalowe o kształcie haczykowatym i długości 50-60 cm są najczęściej stosowane do zbrojenia betonu.

Tabela 3. Receptura betonu lekkiego z włóknami stalowymi

Składnik	Ilość na 1 m ³ [kg]
Cement CEM I 42,5 N	420
Kruszywo lekkie 1-4 mm	200
Kruszywo lekkie 4-9 mm	610
Piasek 0-2	400
Woda *)	115
Domieszka plastifikator	1% mc
Domieszka napowietrzająca	0,25% mc
Włókna stalowe	20

*) woda dodatkowa do wstępnego nasączenia kruszywa 15% masy kruszywa lekkiego (121,5 kg/m³) opisana w punkcie 2.3

W niniejszej pracy zastosowano następujące oznaczenia betonów:

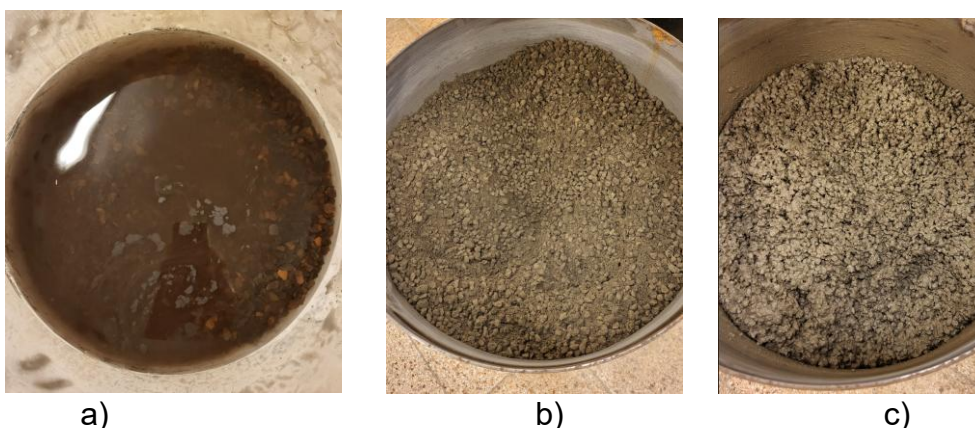
- **LK** – beton lekki kontrolny, zgodny z recepturą w Tabeli 1, bez włókien;
- **LW** – beton lekki z włóknami, zgodny z recepturą w Tabeli 1.

2.3 Wykonanie fibrobetonu na kruszywie lekkim

W projektowaniu i wykonaniu betonów na kruszywie lekkim najistotniejsza jest porowatość kruszywa lekkiego i jego zdolność do absorpcji znacznej ilości wody. Nasiąkliwość zastosowanego kruszywa lekkiego 4/9 wynosi około 20%, dlatego istotne

jest uwzględnianie wody wchłoniętej przez kruszywo w ilości całkowitej wody w mieszance betonowej. Analiza literatury oraz własne doświadczenia laboratoryjne wykazały, że wprowadzenie kruszywa lekkiego suchego do mieszanki wraz z innymi składnikami (piasek, cement, woda, domieszki) powoduje niestabilność parametrów mieszanki i stwardniałego betonu przez postępującą absorpcję wody i domieszek przez ziarna kruszywa lekkiego. Konieczne jest zatem wstępne nasączenie kruszywa lekkiego przed wprowadzeniem go do mieszanki. W pierwszych próbach kruszywo lekkie nasączano w plastikowym pojemniku, zalewając go całkowicie wodą (fotografia 2a), odczekano ok 20-30 minut i odlano wodę a następnie odczekano ok 30 min w celu powierzchniowego wyschnięciem. Kolejno wprowadzono kruszywo do mieszanki betonowej wraz z innymi składnikami betonu. Jednak taka procedura jest czasochłonna i sprawdza się dla betonów wykonywanych w skali laboratoryjnej, gdzie objętości betonów są niewielkie. Dlatego opracowano metodę wstępnego zwilżania kruszywa lekkiego bezpośrednio w mieszarce betonowej. Próby laboratoryjne pozwoliły ustalić, że do suchego kruszywa lekkiego należy dodać wodę dodatkową w ilości 15% masy całkowitej kruszywa lekkiego (drobnego i grubego) i przemieszać w mieszarce przez kilka minut (fotografia 2b). Taka ilość pozwoli na zaabsorbowanie odpowiedniej ilości wody przez kruszywo lekkie bez pozostawiania wodnej otoczki na ziarnach kruszywa. Na fotografii 2 przedstawiono widok kruszywa nasączonego przez zalewanie wodą (fotografia 2a) oraz kruszywa po dodaniu 15% wody dodatkowej (fotografia 2b).

Kolejnym czynnikiem jest odpowiednie napowietrzenie betonu lekkiego w celu zapewnienia mrozoodpornej matrycy cementowej. Zastosowane kruszywo lekkie wykazuje pełną mrozoodporność jednak jego porowata struktura może zaburzyć proces napowietrzania zaczynu cementowego poprzez absorpcję wody z domieszką napowietrzającą. Dlatego w niniejszej pracy zastosowano metodę wcześniejszego napowietrzania zaprawy cementowej (cement, piasek naturalny, woda, domieszka napowietrzająca, plastyfikator), a następnie dodanie do nasączonego kruszywa. Na fotografii 2c przedstawiono widok mieszanki betonowej.



Fotografia 2. Nasączenie kruszywa przed wykonaniem betonu, a) zalewanie wodą, b) dodanie odpowiedniej ilości wody do kruszywa, c) mieszanka betonowa z kruszywem lekkim.

Włókna stalowe dodano do mieszanki betonowej i kontynuowano mieszanie przez około 4 minuty w celu jednorodnego rozmieszczenia włókien.

3. Metody badań

Wykonano następujące badania mieszanek betonowych i lekkich betonów stwardniałych z włóknami:

- konsystencja mieszanki betonowej metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2:2019 [15]
- zawartość powietrza w mieszance metoda ciśnieniową wg PN-EN 12350-7:2019 [16]
- gęstość mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6:2019 [17]
- odporności na zamrażanie-rozmrażanie wg PN-B-06250:1988 [18].
- nasiąkliwość betonu stwardniałego wg PN-B-06250:1988 [18]
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-3 [19]
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach wg PN-EN 12390-5:2019 [20]
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach PN-EN 12390-6:2024 [21]
- moduł sprężystości betonu wg PN-EN 12390-13:2012 [22]
- wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu wg PN-EN 14651+A1:2007 [23]
- analiza dystrybucji włókien metodą tomografii komputerowej.

4. Wyniki badań

4.1 Właściwości mieszanki betonowej

W tabeli 4 przedstawiono właściwości mieszanki betonowej LK (beton lekki kontrolny) oraz LW (beton lekki z włóknami). Badano konsystencję metodą opadu stożka PN-EN 12350-2 [15], zawartość powietrza metodą ciśnieniową PN-EN 12350-7 [16] oraz gęstość mieszanki PN-EN 12350-6 [17].

Tabela 4. Wyniki badań mieszanek betonowych z kruszywem lekkim

Oznaczenie betonu	Konsystencja metodą opadu stożka [mm]	Zawartość powietrza [% obj.]	Gęstość mieszanki betonowej [kg/m ³]
Beton LK (kontrolny)	70	6,5	1850
Beton LW (z włóknami)	60	7,0	1875

Z Tabeli 2 wynika, że dodatek 20 kg/m³ włókien stalowych spowodował niewielki spadek urabialności (mniejszy opad stożka) i zwiększenie gęstości mieszanki. Na fotografii 3 przedstawiono widok badania konsystencji mieszanki kontrolnej LK metodą opadu stożka. Mieszanka jest jednorodna, zwarta, nie wystąpiło zjawisko segregacji ani nadmiernego bleedingu.



Fotografia 3. Badanie konsystencji betonu lekkiego metodą opadu stożka

2.4.2 Właściwości stwardniałego betonu lekkiego

Mrozoodporność betonów lekkich z włóknami stalowymi

Badanie mrozoodporności zostało wykonane w celu analizy możliwości zastosowania fibrobetonu na kruszywie lekkim na zewnątrz. Mrozoodporność betonów osiąga się poprzez napowietrzenie mieszanki betonowej przez co w zaczynie tworzą się pory kuliste zapewniające ochronę przed zamarzaniem wody i zwiększaniem swojej objętości w betonie. Dla betonów na kruszywie lekkim, porowatym napowietrzenie mieszanki jest ryzykowne, gdyż może dodatkowo osłabić parametry wytrzymałościowe betonu. Dla betonu LK i LW zgodnego z recepturą w tabeli 1, wykonano serię próbek sześciennych o boku 100 mm i wykonano badanie odporności na zamrażanie-rozmrażanie wg PN-B-06250:1988 [18]. Po każdych 25 cyklach sprawdzano wygląd próbek pod kątem obecności złuszczeń i spękań, odprysków. Badanie przerwano po 200 cyklach zamrażania-rozmrażania, która wskazuje na pełną mrozoodporność betonów LK i LW. Dodatkowo przeprowadzono badanie mrozoodporności również na zaprawie (cement, woda, piasek) bez kruszywa lekkiego, aby sprawdzić mrozoodporność samej zaprawy. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badania mrozoodporności po 200 cyklach zamrażania - rozmrażania

Rodzaj betonu	Spadek wytrzymałości na ściskanie F200	Zmiana masy po badaniu F200
	[%]	[g]
LK	8,2	0,8
LW	1,3	1,4
zaprawa	6,2	-0,1

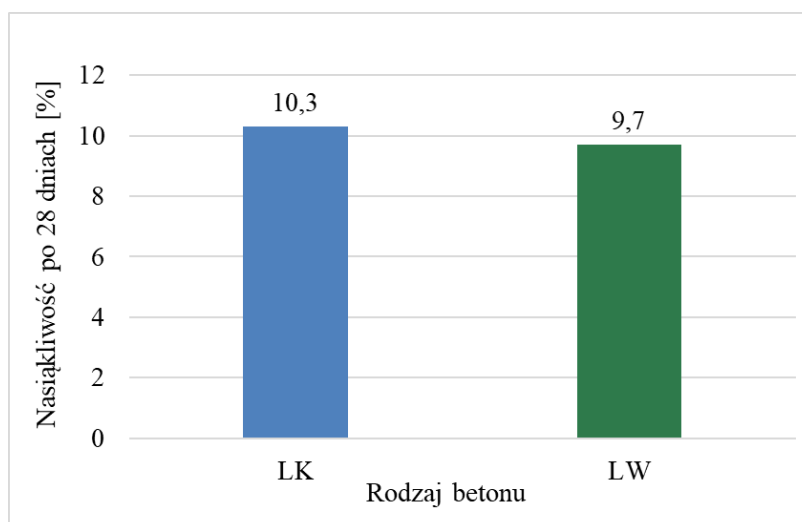
Aby beton spełniał dany stopień mrozoodporności postawione są następujące kryteria [18]:

- próbki nie wykazują pęknięć,
- masa ubytków betonu w postaci złuszczeń i odprysków nie przekracza 5% masy próbek nie zamrażanych,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek nie zamrażanych nie jest większe niż 20%.

Wyniki badań wskazują, że zarówno beton lekki LK jak i z dodatkiem włókien stalowych LW oraz zaprawa spełniają stopień mrozoodporności F200 i mogą być stosowane na zewnątrz.

Nasiąkliwość

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań nasiąkliwości po 28 dniach betonów LK i LW badanej wg PN-B-06250:1988 Beton zwykły [18].



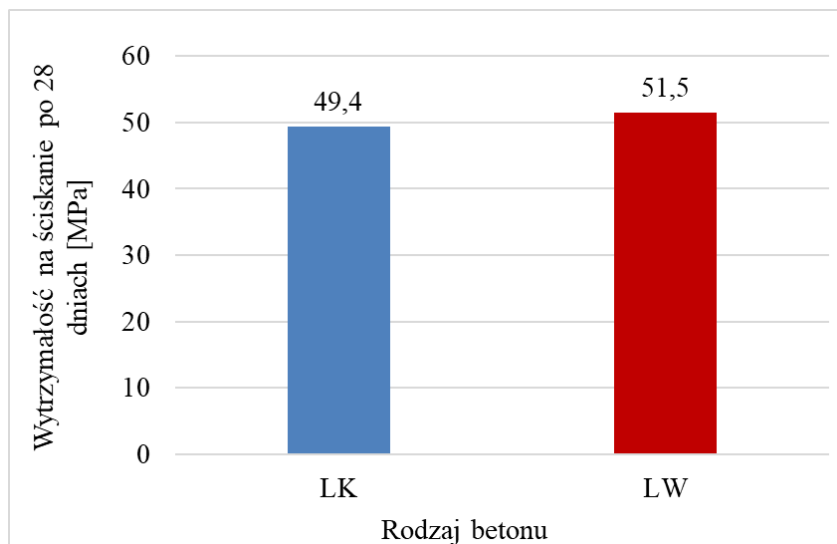
Rysunek 1. Wyniki badania nasiąkliwość betonu LK i LW

Nasiąkliwość betonów LK i LW jest na podobnym poziomie. Wysoka nasiąkliwość spowodowana jest obecnością porowatego kruszywa lekkiego i napowietrzenia

matrycy cementowej w celu zapewnienia mrozoodporności betonu lekkiego i może wpłynąć na późniejsze cechy wytrzymałościowe betonu lekkiego.

Wytrzymałość na ściskanie

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach.

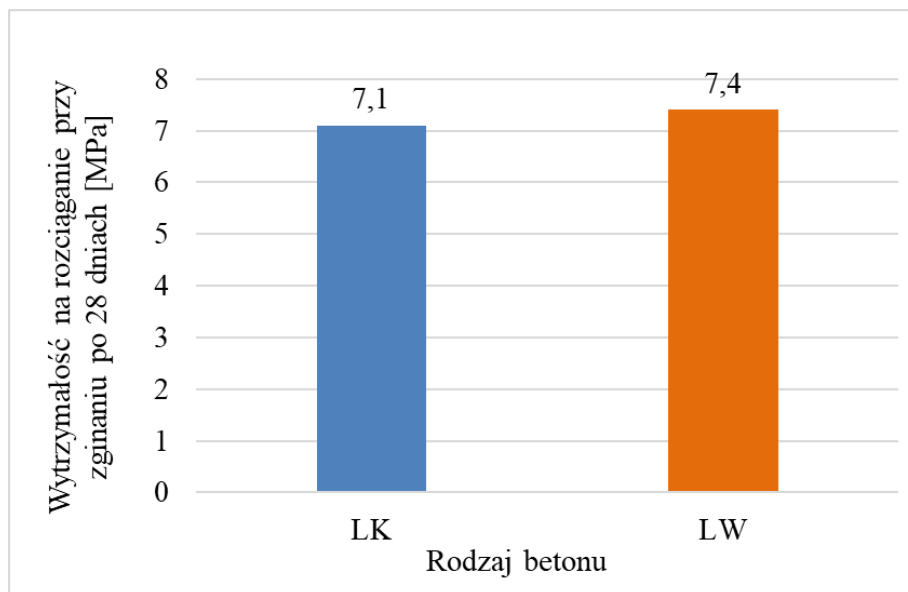


Rysunek 2. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonu LK i LW

Wyniki badań analizowanych betonów lekkich wskazują, że dodatek 20 kg/m² włókien stalowych do betonu lekkiego podnosi wytrzymałość na ściskanie o ok. 5%. Zarówno beton LK jak i LW spełniają wymagania dla klasy wytrzymałości na ściskanie LC40/44 wg 206+A2:2021-08 [20].

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach.

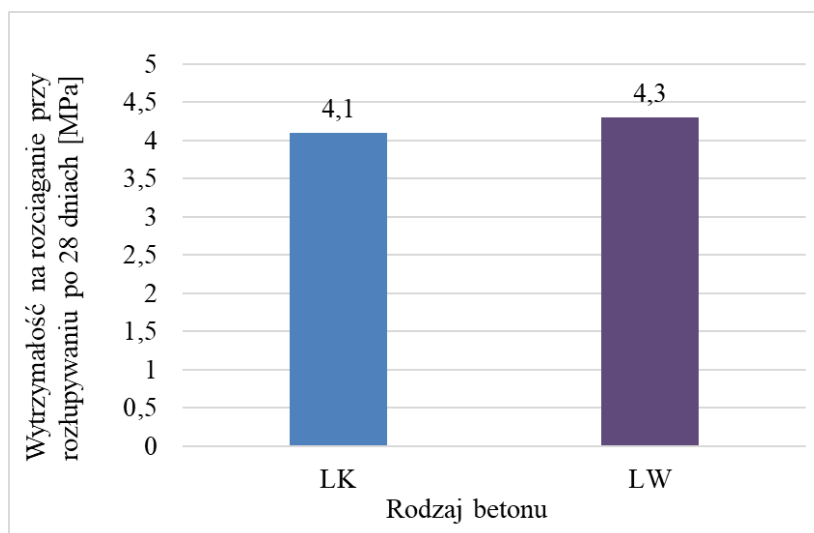


Rysunek 3. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie betonu LK i LW

Wyniki badania wytrzymałości na zginanie badanych betonów LK i LW są porównywalne, beton LW osiągnął ok. 4.% wyższą wytrzymałość na zginanie niż beton LK, co daje perspektywy w zastosowaniu betonu LW w betonach konstrukcyjnych.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wytrzymałość na rozłupywanie przeprowadzony wg normy PN-EN 12390-6:2024 [22], na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań.



Rysunek 4. Wyniki badania wytrzymałości na rozłupywanie betonu LK i LW

Wyniki badań wskazują, że analizowany beton LW ma o ok. 5% wyższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu niż beton LK.

Moduł sprężystości betonu

Moduł sprężystości betonu wykonano po 90 dniach wg PN-EN 12390-13:2021 [23], na fotografii 4 przedstawiono próbki przygotowane do badania, a na fotografii 5 badanie modułu sprężystości. W tabeli 6 przedstawiono wyniki badania modułu sprężystości przy ściskaniu.



Fotografia 4. Próbki na badanie modułu sprężystości



Fotografia 5. Badanie modułu sprężystości

Tabela 6. Wyniki badań modułu sprężystości przy ściskaniu

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie próbek towarzyszących [MPa]	Moduł sprężystości przy ściskaniu [GPa]
Beton LK	51,4	26,8
Beton LW	53,0	26,2

Wyniki badania modułu sprężystości betonów LK i LW są zbliżone. Są to dosyć wysokie wartości jak dla betonu lekkiego, moduł betonu zwykłego wynosi w granicach 20 GPa.

Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu

Wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu wykonano po 28 dniach wg normy PN-EN 14651+A1:2007 [24] tylko dla betonu z włóknami LW. Na fotografii 6 przedstawiono betonową belkę o wymiarach 150x150x550 mm z nacięciem które stanowi miejsce propagacji pęknięcia próbki.

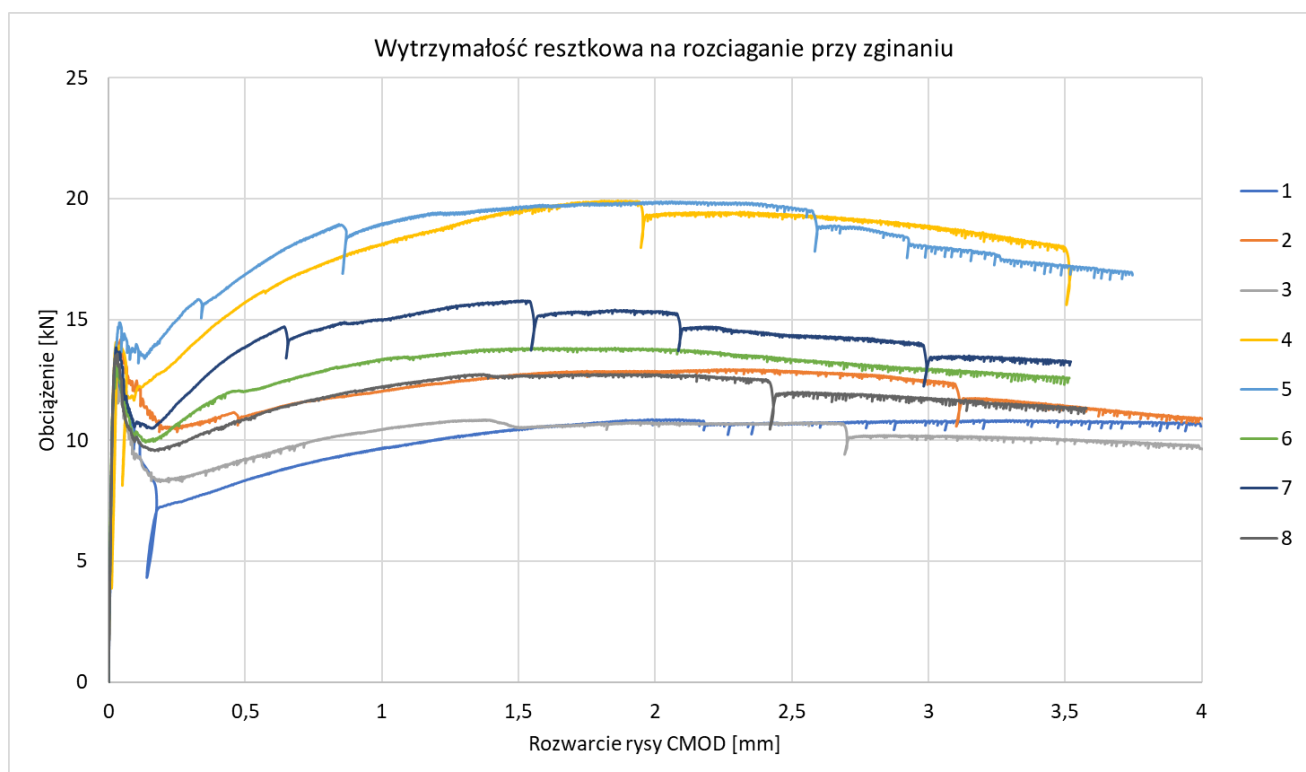


Fotografia 6. Próbka z betonu lekkiego po badaniu wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu. Strzałką zaznaczono nacięcie i pęknięcie próbki.

W tabeli 7 i na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu.

Tabela 7. Wyniki badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu

L.p.	Oznaczenie próbki	Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu [MPa]				
		Przy granicy proporcjonalności LOP $f_{f/ct, L}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
			CMOD ₁ = 0,5 mm	CMOD ₂ = 1,5 mm	CMOD ₃ = 2,5 mm	CMOD ₄ = 3,5 mm
1	LW_1	4,10	2,64	3,31	3,38	3,44
2	LW_2	4,49	3,48	4,02	4,05	3,64
3	LW_3	3,89	2,92	3,39	3,39	3,19
4	LW_4	4,46	4,97	6,16	6,13	5,70
5	LW_5	4,73	5,32	6,21	6,20	5,48
6	LW_6	4,17	3,85	4,38	4,28	4,00
7	LW_7	4,42	4,41	5,03	4,58	4,21
8	LW_8	4,32	3,44	4,01	3,78	3,59
wartość średnia		4,32	3,88	4,56	4,47	4,16



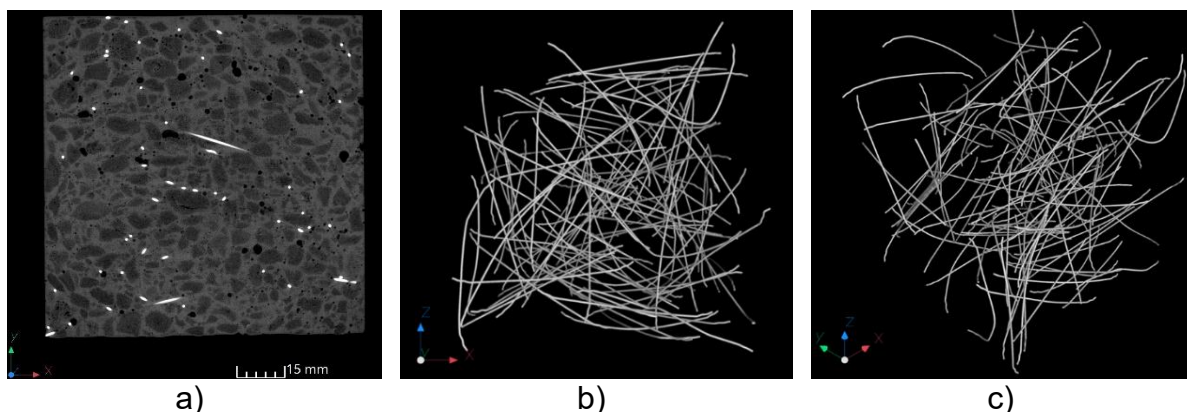
Rysunek 5. Wykresy obciążenie rozwarzenie rysy CMOD dla betonu LW

Badanie wytrzymałości resztkowej jest główną miarą efektywności zbrojenia betonu lekkiego. Po pęknięciu matrycy cementowej dalsze obciążenia przenoszone są przez włókna. W przypadku betonu lekkiego zbrojonego włóknami stalowymi wszystkie próbki z włóknami przeniosły obciążenia. Wyniki badań wskazują na wysokie

wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu, potwierdzając efektywność (skuteczność) zbrojenia betonu lekkiego przez włókna stalowe.

Analiza dystrybucji włókien metodą tomografii komputerowej

Analizę rozmieszczenia włókien w betonie przeprowadzono na betonowych próbkach sześciennych z betonu lekkiego o boku $100 \times 100 \times 100$ mm. Próbki zawierały włókna w ilości 20 kg/m^3 . Badanie wykonano w celu obserwacji dystrybucji włókien w stwardniałym betonie lekkim, oraz sprawdzenia czy włókna rozkładają się równomiernie w mieszance betonowej podczas mieszania. Badanie wykonano na tomografii komputerowej General Electric (GE V|TOME|X M300) na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Na fotografii 7 przedstawiono wyniki badań.



Fotografia 7. Obrazy dystrybucji włókien wygenerowane metodą tomografii komputerowej

Obrazy wygenerowane metodą tomografii komputerowej wskazują, że włókna stalowe w betonie rozkładają się równomiernie. Nie tworzą się skupiska włókien tzw. jeże. Dzięki równomiernemu rozmieszczeniu skuteczność zbrojenia włókien jest wysoka.

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano beton lekki zbrojony włóknami stalowymi, do zastosowań na zewnątrz. Istotne w procesie wykonywania betonu na kruszywach lekkich jest odpowiednie wcześniejsze nasączenie kruszywa w celu wchłonięcia pewnej ilości wody a bez pozostawiania warstwy wody na powierzchni ziaren. Wypróbowano metodę zalewania kruszywa lekkiego wodą a następnie zlewanie wody i osuszanie kruszywa, lecz metoda ta jest czasochłonna i nie praktyczna. Właściwą metodą wykonywania betonów na kruszywie lekkim jest wcześniejszy dodatek do samego kruszywa dodatkowej wody w ilości około 15% masy całkowitej kruszywa lekkiego. Drugą kwestią w wykonywaniu fibrobetonów lekkich jest zapewnienie mrozo odpornej matrycy cementowej. W pracy napowietrzona została zaprawa cementowa a następnie dodana do nasączonego kruszywa lekkiego. Na końcu dodano włókna stalowe, które rozmieściły się jednorodnie w mieszance.

Wyniki badania mrozoodporności, zarówno samej zaprawy jak i betonu kontrolnego bez włókien LK oraz betonu z włóknami LW potwierdzają, że możliwe jest osiągnięcie mrozoodpornej matrycy cementowej dla betonu lekkiego z włóknami. Przy znacznej porowatości kruszywa lekkiego oraz dodatkowym napowietrzeniu zaprawy cementowej uzyskano mrozoodporny i wytrzymały lekki fibrobeton. Nieco wyższe właściwości wytrzymałościowe betonu LW spowodowane są obecnością włókien, lecz efekt ten nie jest zbyt duży z uwagi na napowietrzoną matrycę i porowate kruszywo lekkie. Kluczowym badaniem skuteczności zbrojenia betonu lekkiego jest badanie wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu, w którym beton osiągnął wysokie wytrzymałości resztkowe, po pęknięciu matrycy cementowej włókna przenosiły dalsze obciążenia.

Z pracy wyciągnięto następujące wnioski główne:

- w celu prawidłowego nasączenia kruszywa lekkiego należy wcześniej dodać wody w ilości 15% masy kruszywa lekkiego i przemieszać, a następnie dodać resztę składników,
- w celu napowietrzenia betonu lekkiego proponuje się napowietrzyć wcześniej zaprawę a następnie dodać do nasączonego kruszywa lekkiego,
- włókna stalowe prawidłowo rozprowadzają się w betonie lekkim stanowiąc efektywne zbrojenie dla kruchej matrycy cementowej,
- prawidłowe napowietrzenie zaprawy cementowej a następnie dodanie do betonu na kruszywie lekkim jest istotne dla zapewnienia betonu o wysokiej mrozoodporności do zastosowania na zewnątrz,
- wyniki wytrzymałościowe betonu z włóknami stalowymi LW są wyższe o ok 5% od wyników betonu kontrolnego bez włókien LK. Tak niewielka różnica może być spowodowana porowatą strukturą betonu oraz porowatym kruszywem.
- planowane są dalsze badania w tym temacie między innymi analiza mikroskopowa strefy kontaktowej włókno-zaczyn, badania z innym rodzajem włókien stalowych w tym włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych.

6. Bibliografia

- [1] G. König, K. Holschemacher, D. Weiße, H. Schneider, Fibre reinforced lightweight aggregate concrete, 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB 2004, 20-22 September 2004, Varenna, Italy, s. 1321 – 1330,
- [2] J. Zivkovic, M. Lukovic, J. Arve Øverli, D.A. Hordijk, Brittleness of high-strength lightweight aggregate concrete, SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: 24-26 October 2018, Funchal, Madeira Island, Portugal,
- [3] Hugo Costa, Esteves D. Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, Simões T., Design and Characterization of Self-Compacting Fiber-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC) – BEFIB 2012, Guimarães, Portugal,
- [4] Domagała. L., Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe, Monografia 462, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014.

- [5] Łuczaj K., Urbańska P., Certyd - nowe, lekkie, wysokowytrzymałe kruszywo spiekane, *Materiały Budowlane* 12/2015, str. 42-45.
- [6] Krawczyk Ł., Urban T., Badania eksperymentalne na docisk lekkiego betonu kruszywowego wzmocnionego stalowym zbrojeniem rozproszonym, *Inżynieria i Budownictwo* 2021, r. 77, nr 8, str. 386—390.
- [7] Urban T., Gołdyn M., Współczesne konstrukcje z betonu lekkiego, *XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk 2019, Tom II, str. 453-554.
- [8] Domagała L. Durability of Structural Lightweight Concrete with Sintered Fly Ash Aggregate, *Materials* 2020, 13(20), 4565; <https://doi.org/10.3390/ma13204565>.
- [9] Lewiński P., Fedorczyk Z., Zacharski Ł., Rogowska A., Właściwości reologiczne betonu lekkiego na kruszywie spiekany, *Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone KS2021*, Kraków 12-13 maja 2022, s. 107-110.
- [10] Lewiński P., Fedorczyk Z., Zacharski Ł., Rogowska A. Właściwości reologiczne betonu lekkiego na kruszywie spiekany, *Przegląd Budowlany* 5-6/2022, t. 93, s. 70-75
- [11] A. Michalik, F. Chyliński, J. Bobrowicz, W. Pichór: Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres, *Materials* 2022, 15, 2444. <https://doi.org/10.3390/ma15072444>,
- [12] A. Michalik, F. Chyliński, A. Piekarczyk, W. Pichór: Evaluation of recycled tyre steel fibres adhesion to cement matrix, *Journal of Building Engineering* 68 (2023) 106146, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106146>,
- [13] Domagała, L., Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 17(1), 36-44. <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.553923>.
- [14] Mahmoud Hassanpour, Payam Shafigh, Hilmi Bin Mahmud. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials* 37 (2012) 452–461, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071>.
- [15] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka, 2019.
- [16] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe, 2019.
- [17] PN- EN 12350-6:2019 Test Badania mieszanki betonowej -- Część 6: Gęstość, 2019
- [18] PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- [19] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [20] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [21] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu -- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [22] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [23] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
- [24] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym -- Pomiar