

mgr inż. Daria Jasińska^{1*)}

ORCID: 0000-0002-9075-795X

dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBŚ¹⁾

ORCID: 0000-0001-7514-1834

Application of waste turbine blades in cementitious composite

Zastosowanie odpadów z łopat turbin wiatrowych w kompozytach cementowych

DOI: 10.15199/33.2025.12.06

Abstract. This article discusses issues related to cementitious composites with the addition of waste fibres and fibres produced during the manufacturing process. The benefits of using fibres, examples of waste fibres, and conclusions on the effectiveness of using shredded wind turbine blades in cement composites are presented. Fibers from waste wind turbine blades can serve as a component in cement composites (*Engineered Cementitious Composites* – ECC).

Keywords: modified cementitious composites; Engineered Cementitious Composite; fibers; turbine blades; strength.

The developing industry, along with its positive aspects, also has negative effects related to the generation of large amounts of waste. Many researchers around the world working on cement composites are conducting research on the use of various types of fibres, but there is still a small number of studies devoted to the use of fibres from wind turbine blade waste. In order to improve the tensile and flexural properties and reduce brittle fracture.

In order to improve tensile and flexural properties and reduce brittle fracture, so-called hybrid composites with fibres are used [1, 2]. Most often, studies present the use of plastic fibres, including polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP), polyethylene (PE), and steel [2]. Combining the former with steel fibres allows for more optimal properties [3]. Among the fibres used in cement composites are recycled fibres. An overview of solutions is provided in [4]. The rest of this article presents several examples of the application of fibres from waste materials in cement composites. The key issue in our research is fibres from wind turbine blades.

Steel fibres from car tyres can improve the properties of concrete, but an excess of them can have the opposite effect [5 – 9]. Concrete with recycled steel fibres is characterised by a higher air content than concrete with manufactured steel fibres [8]. Recycled fibres from tyres are not only steel fibres, but also fibres from other parts of the tyre, e.g. rubber, whose impact on the properties of concrete is described in [10]. Global

Streszczenie. W artykule omawiane są zagadnienia związane z kompozytami cementowymi z dodatkiem włókien odpadowych i wytwarzanych w procesie produkcji. Przedstawiono korzyści wynikające ze stosowania włókien, przykłady włókien odpadowych oraz przedstawiono wnioski z zakresu efektywności stosowania rozdrobnionych łopat turbin wiatrowych w kompozytach cementowych. Włókna z odpadów łopat turbin wiatrowych mogą stanowić składnik kompozytów cementowych (z ang. *Engineered Cementitious Composites* – ECC).

Słowa kluczowe: modyfikowane kompozyty cementowe; włókna; łopaty turbin wiatrowych; wytrzymałość.

Rozwijający się przemysł, wraz z pozytywnymi aspektami, powoduje także negatywne skutki związane z powstaniem dużej ilości odpadów. Wielu badaczy na świecie zajmujących się kompozytami cementowymi prowadzi badania nad zastosowaniem różnego rodzaju włókien, ale w dalszym ciągu zauważa się niewielką liczbę prac poświęconych zastosowaniu włókien z odpadów łopat turbin wiatrowych.

W celu poprawy właściwości związanych z rozciąganiem i zginaniem oraz ograniczeniem zjawiska kruchego zniszczenia stosuje się tzw. kompozyty hybrydowe z włóknami [1, 2]. Najczęściej w badaniach przedstawiane jest zastosowanie włókien z tworzyw sztucznych, m.in. poliwinylowego (PVC), polipropylenu (PP), polietylenu (PE), a także stali [2]. Połączenie tych pierwszych z włóknami stalowymi pozwala uzyskać bardziej optymalne właściwości [3]. Wśród włókien stosowanych w kompozytach cementowych są włókna z recyklingu. Przegląd rozwiązań zawarto w [4]. W dalszej części artykułu przedstawiono kilka przykładów aplikowania włókien z materiałów odpadowych w kompozytach cementowych. Kluczowym zagadnieniem naszych badań są włókna z łopat turbin wiatrowych.

Włókna stalowe z opon samochodowych mogą poprawić właściwości betonu, ale ich nadmiar może mieć odwrotny skutek [5 – 9]. Beton z włóknami stalowymi z recyklingu charakteryzuje się bowiem większą zawartością powietrza niż z włóknami produkcyjnymi stalowymi [8]. Recyklingowe włókna z opon to nie tylko włókna stalowe, ale także włókna z innych części opony, np. z gumy, których wpływ na właściwości betonu opisano w [10]. Źródłem dużej ilości materiałów odpadowych są również ogólnoświatowe kryzysy, jak np. pandemia

¹⁾ Politechnika Bydgoska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*)} Correspondence address: daria.jasinska@pbs.edu.pl

crises, such as the Covid-19 pandemic. Due to the polypropylene content in shredded rubber gloves [11] and protective masks [12, 13, 14], their use in building materials is being investigated, where a positive effect is also noted in terms of mitigating the brittle failure mechanism of samples. Waste polypropylene fibres from carpets were tested in [15]. According to Wang Y. [10], in 1994, concrete with such fibres was used in the construction of the Shaw Industries research and development centre in Dalton, achieving parameters comparable to standard concrete with a strength of 28 MPa. More than 20 tonnes of waste were used at that time [10].

PET fibres from bottles in cement composites and concrete are presented, among others, in works [16 – 20]. In [20], the use of fibres from *artificial turf* (AT) is also discussed, while the analysis of the compressive strength of concrete with waste plastic fibres from doors is described in [21]. The use of waste plastic fibres from doors in concrete is also discussed in [22].

Issues related to the recycling of turbine blades are presented in [22]. This material is primarily a polyurethane composite and fibres [23]. Due to the technical parameters and power of a wind turbine, its service life is estimated at 18, 20 or 25 years [24]. The dynamic development of wind energy is associated with the generation of large amounts of waste, which requires effective recycling and reuse. In the literature, we can note the diversity of forms of reused materials from turbine blades for concrete or cement composites. They may be in the form of:

- regular needles [25, 26];
- irregular fibres [27, 28, 29];
- regular cubic cubes [30];
- irregular ‘cubes’ [31];
- powder [32, 30].

The composites discussed are made using cement, the production of which has a negative impact on the environment due to significant CO₂ emissions. Since the beginning of the industrial era, CO₂ emissions have increased by approx. 48% [33, 34, 35], with approx. 12% emitted since 2000. Carbon dioxide emissions in 2023 from cement production accounted for 7 – 8% of total CO₂ emissions, which translates into almost 3 billion tonnes of CO₂ [36]. Cement production is trending upwards and is estimated to exceed 4.5 Gt [34, 37, 38]. Report [38] describes CO₂ emissions associated with cement and concrete production. The authors suggest that it is effective to present CO₂ emissions per unit of strength [MPa], considering this approach to be optimal due to the difference in their composition. The authors suggest that it is effective to present CO₂ emissions per unit of strength [MPa], considering this approach to be optimal due to the difference in their composition.

ECC (*Engineered Cementitious Composites*) cement composites are characterised by good properties related to deformability and failure behaviour, allowing for their widespread engineering application [1, 39, 40]. The addition of fibres allows for tensile strength to be achieved, which should exceed 4 MPa [39, 40]. Such composites should exhibit deformability under bending, eliminating sudden and brittle failure of the element with the simultaneous formation of

Covid-19. Ze względu na zawartość polipropylenu w rozdrobnionych rękawiczkach gumowych [11] i maseczkach ochronnych [12, 13, 14] badane jest ich zastosowanie w materiałach budowlanych, gdzie również zauważa się pozytywne działanie w kontekście złagodzenia mechanizmu kruche go zniszczenia próbek. Odpadowe włókna polipropylenowe z dywanów badano w [15]. Jak podaje Wang Y. [10], w 1994 r. beton z takimi włóknami wykorzystano przy budowie centrum badawczo-rozwojowego Shaw Industries w Dalton, osiągając parametry porównywalne ze standardowym betonem o wytrzymałości 28 MPa. Wykorzystano wtedy ponad 20 ton odpadów [10].

Włókna PET z butelek w kompozytach cementowych i betonie przedstawiono m.in. w pracach [16 – 20]. W [20] poruszono również zastosowanie włókien ze sztucznej murawy AT (*artificial turf*), natomiast analizę wytrzymałości na ściskanie betonu z odpadowymi włóknami z tworzyw sztucznych pochodzących z drzwi opisano w [21].

Zagadnienia związane z recyklingiem łopat turbin przedstawiono w [22]. Materiał ten to przede wszystkim poliuretanowy kompozyt i włókna [23]. Ze względu na parametry techniczne oraz moc turbiny wiatrowej, jej żywotność szacuje się na 18, 20 lub 25 lat [24]. Dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej wiąże się z powstawaniem dużych ilości odpadów, które wymagają skutecznego recyklingu i ponownego wykorzystania. W literaturze możemy zwrócić uwagę na różnorodność form ponownie wykorzystywanych materiałów z łopat turbin do betonu lub kompozytów cementowych. Występują one w postaci:

- regularnych igieł [25, 26];
- nieregularnych włókien [27, 28, 29];
- regularnych sześciennych kostek [30];
- nieregularnych „kostek” [31];
- proszku [32, 30].

Omawiane kompozyty wykonywane są z zastosowaniem cementu, którego produkcja ma negatywne oddziaływanie na środowisko przez znaczną emisję CO₂. Od początku ery przemysłowej poziom emisji CO₂ zwiększył się o ok. 48% [33, 34, 35], przy czym ok. 12% wyemitowano od 2000 r. Emisja dwutlenku węgla w 2023 r. pochodząca z produkcji cementu wyniosła 7 – 8% całkowitej emisji CO₂, co przekłada się na prawie 3 mld ton CO₂ [36]. Produkcja cementu ma tendencję wzrostową i szacuje się, że w 2050 r. przekroczy 4,5 Gt [34, 37, 38]. Raport [38] opisuje emisję CO₂ związaną z produkcją cementu i betonu. Autorzy sugerują jako efektywne przedstawianie emisji CO₂ w przeliczeniu na jednostkę wytrzymałości [MPa] uznając za optymalne takie podejście ze względu na różnicę w ich składzie.

Kompozyty cementowe ECC (z ang. *Engineered Cementitious Composites*) charakteryzują się dobrymi właściwościami, związanymi z odkształcalnością i pracą zniszczenia, pozwalającymi na ich powszechne zastosowanie inżynierskie [1, 39, 40]. Dodatek włókien pozwala uzyskać wytrzymałość na rozciąganie, która to powinna przekraczać 4 MPa [39, 40]. Takie kompozyty powinny wykazywać się odkształcalnością przy zginaniu, eliminując nagłe i kruche zniszczenie elemen-

microcracks. Ensuring resistance to freezing and thawing is an aspect that determines their widespread use [40, 41]. The composition of ECC is most often adapted to the specifics of certain engineering solutions [40].

Benefits of using fibres

Cement composites are characterised by brittleness and low flexural strength. These properties can be improved by adding fibres. Fibres improve the ductility of components [42]. It should be noted that the addition of fibres made of materials with low hardness may slightly weaken the compressive strength. This is particularly true in situations where an excessive amount of plastic fibres, including polypropylene fibres, has been used [43]. PE fibres improve deformability and limit crack propagation, but there is a risk of them detaching due to their hydrophobic properties [44]. In terms of adhesion, steel and PVA fibres are better [44]. Steel fibres effectively improve the properties of the brittle cement matrix in high-strength concretes. As the strength of concrete increases, its properties related to ductility and flexural strength deteriorate, which is a significant limitation in the practical application of this material. The addition of steel fibres allows these deficiencies to be compensated for [45]. Due to the diversity of fibres, their properties and their effect on cement composites, hybrid solutions are also used, employing two types of fibres in a single mixture [46].

Natural fibres are also used in construction, including bamboo, jute, flax, hemp and coconut fibres [47, 48]. In the case of cement composites with natural fibres, it is crucial to ensure their adequate adhesion to the cement matrix. The formation of air voids in the material structure may lead to a reduction in its strength and an increased risk of cracking [49].

Due to the constant demand for materials containing cement, the demand for synthetic fibres will increase in the coming years. Forecasts predict that in 2030 it will exceed 130 million tonnes, but this figure refers to total global demand, not just their use in construction [50]. It is widely believed that the addition of fibres has an indirect effect on reducing CO₂ emissions by reducing cement consumption per m³ and extending the service life of the finished element [33]. The production of synthetic fibres is very often carried out at high temperatures and is energy-intensive. CO₂ emissions associated with fibre production vary depending on the type of fibre. In the case of polypropylene (PP) fibres, it is 1.85 kg of CO₂ per kilogram of material, for polyvinyl (PVA) fibres it is 2.70 kg of CO₂/kg, while the production of glass fibres generates emissions of 2.04 kg of CO₂/kg [33, 51].

An alternative solution to reducing demand for newly produced fibres is to use waste materials. Examples include steel fibres recovered from used tyres, synthetic fibres from carpets, doors or artificial turf, polypropylene fibres from plastic bottles, and cotton fibres from old clothes. The use of these materials is becoming increasingly popular due to

tu przy jednoczesnym powstaniu mikrorys. Zapewnienie odporności na zamrażanie i odmrażanie jest aspektem determinującym ich szerokie wykorzystywanie [40, 41]. Skład ECC jest najczęściej przystosowany do specyfiki określonych rozwiązań inżynierskich [40].

Korzyści wynikające ze stosowania włókien

Kompozyty cementowe charakteryzują się kruchością i małą wytrzymałością na zginanie. Poprawę tych właściwości można uzyskać przez dodanie włókien. Włókna poprawiają ciągliwość elementów [42]. Trzeba mieć na uwadze, że dodanie włókien wykonanych z materiałów o małej twardości może nieznacznie osłabić wytrzymałość na ściskanie. Dotyczy to szczególnie sytuacji, w których zastosowano nadmierną ilość włókien z tworzyw sztucznych, w tym polipropylenowych [43]. Włókna PE poprawiają odkształcalność i ograniczają propagację rys, ale istnieje ryzyko ich odpajania ze względu na ich hydrofobowe właściwości [44]. Pod względem przyczepności lepsze są włókna stalowe oraz PVA [44]. Włókna stalowe skutecznie poprawiają właściwości kruchej matrycy cementowej w betonach wysokowytrzymałych. Wraz ze zwiększeniem wytrzymałości betonu pogarszają się jego właściwości związane z ciągliwością i odpornością na zginanie, co stanowi istotne ograniczenie w praktycznym zastosowaniu tego materiału. Dodatek włókien stalowych pozwala na kompensację tych niedoborów [45]. Ze względu na różnorodność włókien, ich właściwości oraz wpływ na kompozyty cementowe stosuje się również hybrydowe rozwiązania, wykorzystując dwa typy włókien w jednej mieszance [46].

W budownictwie wykorzystywane są również włókna naturalne, m.in. z bambusa, juty, lnu, konopi czy kokosowe [47, 48]. W przypadku kompozytów cementowych z włóknami naturalnymi kluczowe jest zapewnienie ich odpowiedniej przyczepności do matrycy cementowej. Powstawanie pustek powietrznych w strukturze materiału może prowadzić do osłabienia jego wytrzymałości i zwiększonego ryzyka pęknięć [49].

W związku z ciągłym zapotrzebowaniem na materiały z udziałem cementu, w kolejnych latach nastąpi zwiększenie zapotrzebowania na włókna syntetyczne. Prognozy przewidują, że w 2030 r. przekroczy ono 130 mln ton, ale wielkość ta dotyczy całkowitego światowego popytu, nie tylko ich zastosowania w budownictwie [50]. Powszechnie uważa się, iż dodatek włókien ma pośredni wpływ na ograniczenie emisji CO₂, przez ograniczenie zużycia cementu w przeliczeniu na m³ oraz wydłużenie żywotności gotowego elementu [33]. Produkcja włókien syntetycznych jest bardzo często prowadzona w wysokiej temperaturze i jest energochłonna. Emisja CO₂ związana z produkcją włókien różni się w zależności od ich rodzaju. W przypadku włókien polipropylenowych (PP) wynosi 1,85 kg CO₂ na każdy kilogram materiału, włókien poliwinylowych (PVA) jest to 2,70 kg CO₂/kg, natomiast produkcja włókien szklanych generuje emisję na poziomie 2,04 kg CO₂/kg [33, 51].

their low cost and environmental benefits. Examples include steel fibres obtained from used tyres, synthetic fibres from carpets, doors and artificial turf, polypropylene fibres obtained from protective masks and food packaging, as well as fibres recovered from shredded wind turbine blades. As part of recycling processes (resulting, among other things, from restrictions on the storage of composite materials), they can be converted into waste fibres suitable for reuse.

Research aim and method

The aim of the analyses is to present selected research results related to the strength of cement composites modified with fibres from wind turbine blades and to compare them with cement composites with polypropylene fibres and without fibre additives. The innovative aspect of the presented solution lies in obtaining a composite with strength parameters corresponding to or similar to ECC. The originality of the presented solution is the use of waste, shredded wind turbine blade elements in cement composites. The use of this type of fibre, their shape and geometry (photo 1), which are the result of mechanical processing of wind turbine blades, is innovative.

In addition, a hybrid solution was proposed, consisting in the combined use of waste fibres and primary fibres (produced during the manufacturing process, hereinafter referred to as production fibres), both to reduce the amount of fibres from the manufacturing process the amount of fibres from the production process and to obtain optimal strength properties. The results presented in the article indicate the great potential for the application of the tested material.

Materials used. The study examined cement composites using CEM I 42.5R, R cement, ordinary sand with a grain size of 0/2 mm and water (Table 1). The samples measuring 40 x 40 mm and 160 mm in length were tested, in accordance with standard PN-EN 196 [52]. In addition, the following samples were tested. Additionally, in subsequent samples, fibres from wind turbine blades and polypropylene fibres with a length of 25 mm and a density of 920 kg/m³ were added.

The fibres from wind turbine blades were produced by mechanically shredding the blades into fibres with a width and thickness of 1 – 5 mm and a length of 10 – 40 mm. In order to obtain fibres of similar dimensions, they were sorted on

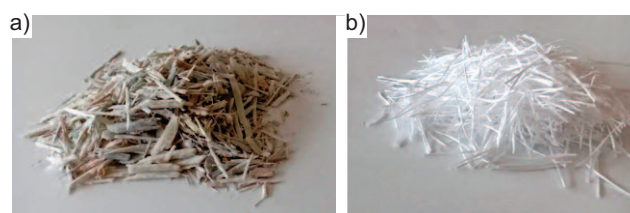
Alternatywnym rozwiązaniem ograniczenia popytu na nowo produkowane włókna jest wykorzystywanie materiałów odpadowych. Przykładami mogą być włókna stalowe pozyskiwane ze zużytych opon, włókna syntetyczne pochodzące z dywanów, drzwi czy sztucznych muraw, włókna polipropylenowe uzyskiwane z maseczek ochronnych i opakowań żywności, a także włókna odzyskiwane z rozdrobnionych łopat turbin wiatrowych. W ramach procesów recyklingu (wynikających m.in. z ograniczeń dotyczących składowania materiałów kompozytowych) można przekształcić je we włókna odpadowe, nadające się do ponownego wykorzystania.

Cel i metoda badań

Celem analiz jest przedstawienie wybranych wyników badań związanych z wytrzymałością modyfikowanych kompozytów cementowych włóknami z łopat turbin wiatrowych i porównanie z kompozytami cementowymi z włóknami polipropylenowymi oraz bez dodatku włókien. Innowacyjność prezentowanego rozwiązania polega na uzyskaniu kompozytu o parametrach wytrzymałościowych odpowiadających bądź zbliżonych do ECC. Oryginalnością przedstawionego rozwiązania jest zastosowanie odpadowych, rozdrobnionych elementów łopat turbin wiatrowych w kompozytach cementowych. Nowatorskie jest zastosowanie typu włókien, ich kształtu i geometrii (fotografia 1), będących wynikiem obróbki mechanicznej łopaty turbiny wiatrowej.

Dodatkowo zaproponowano rozwiązanie hybrydowe polegające na łącznym zastosowaniu włókien odpadowych i pierwotnych (wytwarzanych w procesie produkcji, zwanych dalej włóknami produkcyjnymi), zarówno w celu ograniczenia ilości włókien pochodzących z procesu produkcyjnego, jak i uzyskiwanych optymalnych właściwości wytrzymałościowych. Zaprezentowane w artykule wyniki wskazują na duże możliwości zastosowania badanego materiału.

Zastosowane materiały. Badaniu poddano kompozyty cementowe, w których zastosowano cement CEM I 42,5R, R, piasek zwykły o uziarnieniu 0/2 mm oraz wodę (tabela 1). Badano próbki o wymiarach 40 x 40 mm oraz długości 160 mm, zgodnie z normą PN-EN 196 [52]. Dodatkowo w kolejnych próbkach dodawa-



Poto 1. Materials used for testing: a) WT – fibres from wind turbine blades; b) LPPF – polypropylene fibres

Fot. 1. Materiały zastosowane do badań: a) WT – włókna z rozdrobnionych łopat turbin wiatrowych; b) LPPF – włókna polipropylenowe

Table 1. Composition of tested cement composites

Tabela 1. Skład badanych kompozytów cementowych

Sample type/ Typ próbki	Composites [kg/m ³]/Składniki [kg/m ³]				
	cement CEM I 42,5	sand/ piasek	water/ woda	WT	LPPF
C	651,04	1757,81	315,10		0,00
WT2%	651,04	1757,81	315,10	13,02	0,00
WT6%	651,04	1757,81	315,10	39,06	0,00
WT10%	651,04	1757,81	315,10	65,10	0,00
LPPF2%	651,04	1757,81	315,10	0,00	13,02
LPPF6%	651,04	1757,81	315,10	0,00	39,06
LPPF10%	651,04	1757,81	315,10	0,00	65,10
WT1%+LPPF1%	651,04	1757,81	315,10	6,51	6,51
WT3%+LPPF3%	651,04	1757,81	315,10	19,53	19,53
WT5%+LPPF5%	651,04	1757,81	315,10	32,55	32,55

sieves. Waste larger than 4 mm was discarded from the sieves. In this way, waste with irregular shapes and excessive dimensions was separated. No individual measurements of the length or thickness of individual fibre fragments were taken, nor were they sorted in detail according to these parameters and selected in terms of dimensions. The length given is an average value, determined on the basis of a randomly selected sample of material. In order to obtain information on the effect of the fibres used in order to obtain information on the impact of the fibres used on the parameters of cement composites, tests were carried out on samples measuring 40 x 40 x 160 mm with polypropylene fibres obtained from production. In addition, samples containing waste and production fibres were made to assess the possibility of partially replacing newly produced fibres with waste fibres. Samples were made with fibre contents of 2, 6, 10% in relation to the mass of cement, respectively 1%+1%, 3%+3%, and 5%+5%, respectively. Samples containing fibres from wind turbine blades were labelled WT (referring to *waste turbine blades*), with the corresponding percentage content indicated, and samples with polypropylene fibres were labelled LPPF (referring to long polypropylene fibre).

Laboratory testing method. The prepared samples were deformed after 24 hours and placed in a water chamber and seasoned for 7, 14, 28 and 56 days. The mixing and sampling process was carried out with great care to avoid fibre aggregation and local accumulation. The samples were seasoned in water. After the expected maturation period, they were removed from the water and weighed. **The samples were then subjected to four-point bending using** an INSTRON device which allows the measurement of the variability of the applied force and displacement over time. The sample was placed centrally between the support points, loaded with two forces at a spacing of 33.3 mm and supported at the bottom by rollers at a spacing of 100 mm.

The samples, created after the bending test as a result of breaking, were subjected to a compression test in accordance with PN 196-1 [52] and PN-EN 1015-1 [53], commonly used in tests [54 – 56]. The compression surface is 40 x 40 mm. For each period and sample type, 4 measurements were recorded.

The compressive strength of samples with turbine blade fibres shows higher values at 7 and 14 days than samples without fibres (Figure 1). At 28 days, they had slightly lower compressive strength than the control sample, while the values of the other samples exceeded those recorded for the sample without fibres. The strength value of the WT10% sample after 56 days was similar to that of the control sample (difference of 0.04 MPa; 0.1%). These are the highest values from the entire set of samples in the tests after 56 days. In turn, in the case of the WT2% and WT6% samples, values lower than the control sample were obtained, by 13.71 MPa and 1.36 MPa (2.7%), respectively.

Tests on samples after 7, 14, 28 and 56 days of maturation showed that after 28 days there is a decrease in strength compared to both earlier and later stages of maturation. The results are presented as averages. The results are presen-

no włókna z łopat turbin wiatrowych oraz włókna polipropylenowe o długości 25 mm i gęstości 920 kg/m³.

Włókna z łopat turbin wiatrowych powstały w wyniku rozdrobnienia mechanicznego łopat do postaci włókien o szerokości i grubości 1–5 mm oraz długości 10–40 mm. W celu uzyskania włókien o zbliżonych wymiarach poddano je sortowaniu na sitach. Odrzucono odpady z sit większe od 4 mm. W ten sposób odseparowano odpady o nieregularnych kształtach oraz nadmiernych wymiarach. Nie prowadzono indywidualnych pomiarów długości ani grubości poszczególnych fragmentów włókien, jak również ich szczegółowego sortowania wg tych parametrów i doboru pod względem wymiarów. Podana długość stanowi wartość uśrednioną, wyznaczoną na podstawie losowo wybranej próbki materiału. W celu uzyskania informacji o wpływie zastosowanych włókien na parametry kompozytów cementowych, przeprowadzono badania na próbkach o wymiarach 40 x 40 x 160 mm z włóknami polipropylenowymi uzyskanymi z produkcji. Ponadto wykonano próbki z zawartością włókien odpadowych i produkcyjnych, aby ocenić możliwości częściowej zamiany włókien produkcyjnych nowo wytwarzanych na odpadowe. Wykonano próbki o zawartości włókien 2, 6, 10% w stosunku masy cementu odpowiednio 1%+1%, 3%+3%, 5%+5%. Próbkę zawierającą włókna z łopat turbin wiatrowych oznaczono jako WT (w nawiązaniu do ang. *waste turbine blades*), z podaniem odpowiedniej zawartości procentowej, a próbki z włóknami polipropylenowymi jako LPPF (w nawiązaniu do ang. *long polypropylene fiber*).

Metoda badań laboratoryjnych. Przygotowane próbki zformowano po upływie 24 h oraz umieszczono w komorze wodnej i sezonowano odpowiednio przez okres 7, 14, 28 oraz 56 dni. Proces mieszania oraz wykonania próbek przeprowadzono z ogromną starannością, aby uniknąć agregacji włókien i kumulowania się ich lokalnie. Próbkę sezonowano w wodzie. Po oczekiwanym okresie dojrzewania wyjęto je z wody i poddano ważeniu. Następnie **próbki poddano czteropunktowemu zginaniu** z zastosowaniem urządzenia INSTRON, które pozwala na pomiar zmienności przykładanej siły oraz przemieszczenia w czasie. Probka była umieszczona centralnie między punktami podparcia, obciążana dwiema siłami w rozstawie 33,3 mm oraz podparta na spodzie rolkami w rozstawie 100 mm.

Próbki, powstałe po badaniu na zginanie w wyniku przełamania, poddano badaniu na ściskanie wg norm PN 196-1 [52] i PN-EN 1015-1 [53], stosowanych powszechnie w badaniach [54 – 56]. Powierzchnia ściskania to 40 x 40 mm. W przypadku każdego okresu i typu próbki zarejestrowano 4 pomiary.

Wytrzymałość na ściskanie próbek z włóknami z łopat turbin wykazuje większe wartości w okresie 7 oraz 14 dni niż próbki bez włókien (rysunek 1). W okresie 28 dni próbka WT2% miała nieznacznie mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż próbka kontrolna, natomiast wartości pozostałych próbek przewyższały te odnotowane w przypadku próbki bez włókien. Wartość wytrzymałości próbki WT10% po 56 dniach była zbliżona do próbki kontrolnej (różnica 0,04 MPa; 0,1%). Są to największe wartości z całego zbioru próbek w badaniach po 56

ted as averages of four measurements, and the average standard deviation is 0.6 – 3.0 MPa. The highest deviation values were obtained for samples with the addition of waste fibres from wind turbine blades, which can be attributed to their complex structure, uneven surface and the presence of resin matrix residues. These factors can disrupt the hydration processes of the cement matrix, leading to irregularities resulting from the heterogeneity of the fibres. These factors may disrupt the hydration processes of the

cement matrix, leading to irregularities resulting from the heterogeneity of the fibres. This issue requires further in-depth analysis in order to determine the possibilities and methods of minimising the effect of structural heterogeneity of the fibres.

The temporary reduction in strength after 28 days of curing can be explained by the slowing down of the hydration reaction and the dominant influence of internal processes at that time, which temporarily weaken the structure. After this stage, further hydration leads to sealing and strengthening of the matrix, resulting in a renewed increase in strength at a later stage. Detailed compressive strength values are presented in Table 2.

Comparing the effect of adding fibres from wind turbine blades and polypropylene fibres on compressive strength, it was found that for a content of:

- 2%, the highest strength was achieved by samples with polypropylene fibres;
- 6%, samples with fibres from turbine blades;
- 10%, samples with fibres from wind turbine blades were rated most favourably in the case of 14 and 56 days of curing. (values greater than 9 MPa and greater than (values greater than 9 MPa and over 16 MPa, respectively), in the case of 7 days, the value was lower by 0.14 MPa, treated as a similar value, and in the case of 28 days, it was lower by 6.12 MPa.

When analysing the impact of fibre content on changes in compressive strength, the most effective content is 6 – 10% fibres from wind turbine blades. In relation to the control sample without fibres, it was found that wind turbine blade fibres in the tested percentage do not reduce compressive strength and therefore do not weaken

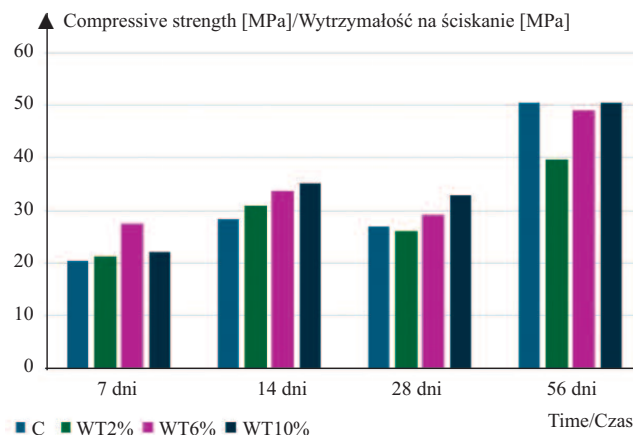


Fig. 1. Variability of compressive strength in time in samples with fibres from turbine blades and samples without fibres

Rys. 1. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w czasie próbek z włóknami z łopat turbin oraz próbki bez włókien

nia uzyskano w przypadku próbek z dodatkiem włókien odpadowych pochodzących z łopat turbin wiatrowych, co można wiązać z ich złożoną strukturą, nierówną powierzchnią oraz obecnością pozostałości osnowy żywicznej. Czynniki te mogą zaburzać procesy hydratacji matrycy cementowej, prowadząc do ich nieregularności wynikających z niejednorodności włókien. Zagadnienie to wymaga dalszej, pogłębionej analizy w celu określenia możliwości oraz metod minimalizacji efektu niejednorodności strukturalnej włókien.

Chwilowe zmniejszenie wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania można tłumaczyć wyhamowaniem tempa reakcji hydratacyjnych i dominującym w tym czasie wpływem procesów wewnętrznych, które przejściowo osłabiają strukturę. Po tym etapie dalszy rozwój hydratacji prowadzi do uszczelnienia i wzmocnienia matrycy, czego efektem jest ponowne zwiększenie wytrzymałości w okresie późniejszym. Szczegółowe wartości wytrzymałości na ściskanie zaprezentowano w tabeli 2.

Porównując wpływ dodatku włókien z łopat turbin wiatrowych oraz włókien polipropylenowych na wytrzymałość na ściskanie stwierdzono, że w przypadku zawartości:

- 2% największą wytrzymałość uzyskały próbki z włóknami polipropylenowymi;
- 6% próbki z włóknami z łopat turbin;
- 10% najkorzystniej ocenia się próbki z włóknami z łopat turbin wiatrowych w przypadku 14 i 56 dni dojrzewania (wartości większe odpowiednio o ponad 9 MPa i ponad 16 MPa), w przypadku 7 dni wartość mniejsza o 0,14 MPa, traktowana jako wartość zbliżona, a w przypadku 28 dni mniejsza o 6,12 MPa.

Table 2. Compressive strength [MPa]

Tabela 2. Wytrzymałość na ściskanie [MPa]

Sample type/ Typ próbki	Puberty period [days]/Okres dojrzewania [dni]			
	7	14	28	56
C	20,30	28,23	26,81	50,33
WT2%	21,32	30,92	26,01	39,62
WT6%	27,46	33,66	29,10	48,97
WT10%	22,07	35,25	32,80	50,29
LPPF2%	31,36	31,77	36,83	44,28
LPPF6%	24,09	31,06	30,64	40,23
LPPF10%	22,21	25,92	38,92	33,41
WT1%+LPPF1%	27,69	27,94	34,75	36,73
WT3%+LPPF3%	25,87	37,20	27,18	45,33
WT5%+LPPF5%	26,17	28,16	25,01	38,92

the internal structure of the cementitious composite, e.g. by reducing stiffness or creating air voids. Furthermore, visual observations indicate that the fibres bond coherently with the structure of the mixture and do not change their position during the curing process, e.g. they do not settle at the bottom of the sample.

Flexural strength. Samples with fibres from turbine blades are characterised by greater flexural strength compared to the control sample. Based on a preliminary visual and tactile assessment, they were found to be harder than polypropylene fibres, which are characterised by greater elasticity and cause a more plastic bending of the samples and their contents. The rapid decrease in force allows the composite with polypropylene fibres to be assessed as a brittle material, but the destructive force is greater than in the case of composites with polypropylene fibres.

Figure 2 shows the impact of using commercial polypropylene fibres and the benefit of partially replacing them with fibres obtained from shredding wind turbine

Analizując wpływ zawartości włókien na zmianę wytrzymałości na ściskanie najefektywniejsza jest zawartość 6 – 10% włókien z łopat turbin wiatrowych. W odniesieniu do próbek kontrolnej bez włókien stwierdzono, że włókna z łopat turbin wiatrowych w badanej ilości procentowej nie zmniejszają wytrzymałości na ściskanie, a więc nie osłabiają struktury wewnętrznej kompozytu cementowanego, np. zmniejszając sztywność czy tworząc pustki powietrzne. Ponadto, obserwacje wizualne wskazują, że włókna spójnie łączą się ze strukturą mieszanki i podczas procesu dojrzewania nie zmieniają swojego położenia, np. nie osiadają na dnie próbki.

Wytrzymałość na zginanie. Próbki z włóknami z łopat turbin charakteryzują się większą wytrzymałością na zginanie w porównaniu z próbką kontrolną. Na podstawie wstępnej oceny wizualno-dotykowej stwierdzono, że są one bardziej twarde niż włókna polipropylenowe, które charakteryzują się większą ciągliwością i powodują bardziej plastyczny przebieg zginania próbek wraz z ich zawartością. Gwałtowne zmniejszenie siły pozwala ocenić kompozyty z włóknami łopat turbin jako materiał kruchy, ale siła niszcząca jest większa niż w przypadku kompozytów z włóknami polipropylenowymi.

Rysunek 2 przedstawia wpływ stosowania produkcyjnych włókien polipropylenowych i korzyść wynikającą z częściowego zastąpienia ich włóknami pozyskanymi z rozdrobnienia łopat turbin wiatrowych. Połączenie obu typów włókien pozwoliło na osiągnięcie efektów zginania bardzo zbliżonych do próbki z włóknami polipropylenowymi mimo ograniczenia ich ilości z 6% do 3% i dodatku 3% włókien z łopat turbin wiatrowych. Na rysunku 3 przedstawiono wartość przemieszczeń poszczególnych próbek w przypadku wartości siły odpowiadającej ich zniszczeniu. W momencie zniszczenia próbki kontrolnej z siłą 1,79 kN zanotowana wartość przemieszczenia wyniosła 0,82 mm. Przy tej sile zbliżoną wartość przemieszczenia wykazała również próbka polipropylenowa, a w przypadku pozo-

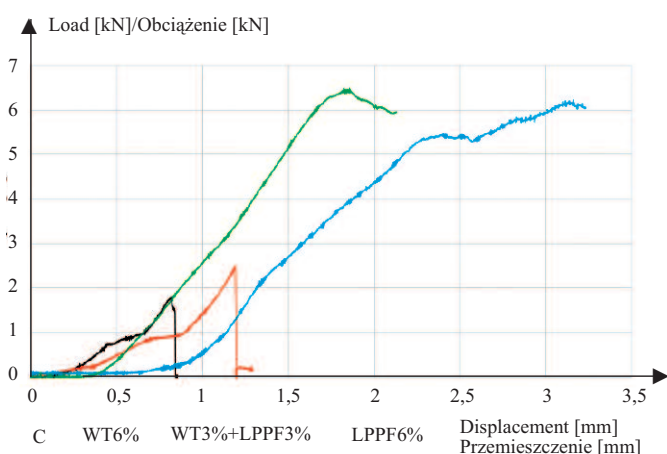


Fig. 2. Displacement-load relationship

Rys. 2. Zależność przemieszczenie – obciążenie

blades. The combination of both types of fibres allowed achieve bending results very similar to those of the sample with polypropylene fibres, despite reducing their amount from 6% to 3% and adding 3% of fibres from wind turbine blades. Figure 3 shows the displacement values of individual samples for the force values corresponding to their failure. At the moment of failure of the control sample with a force of 1.79 kN, the recorded displacement value was 0.82 mm. At this force, a similar displacement value was also shown by the polypropylene sample, while in the case of the others, higher displacement values were recorded. A similar analysis is presented in Table 3, where the values of the corresponding load are indicated for displacements of 1 mm and 1.5 mm.

The damage to the samples is shown in photograph 2. In the case of the control sample, a fracture was found, which occurred suddenly and dynamically – the so-called brittle fracture

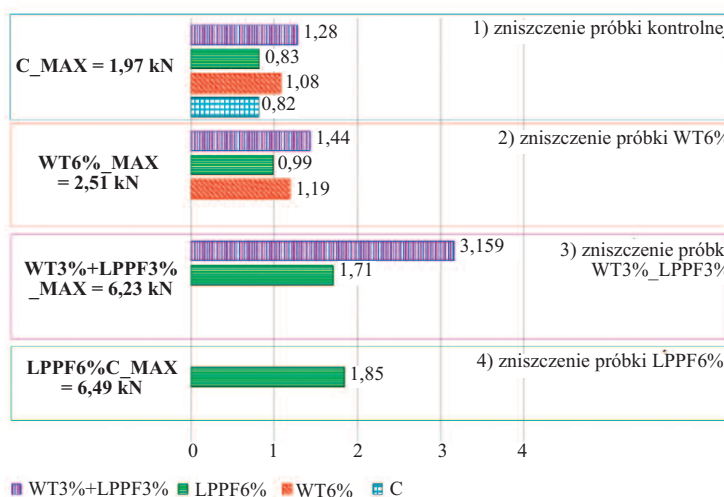


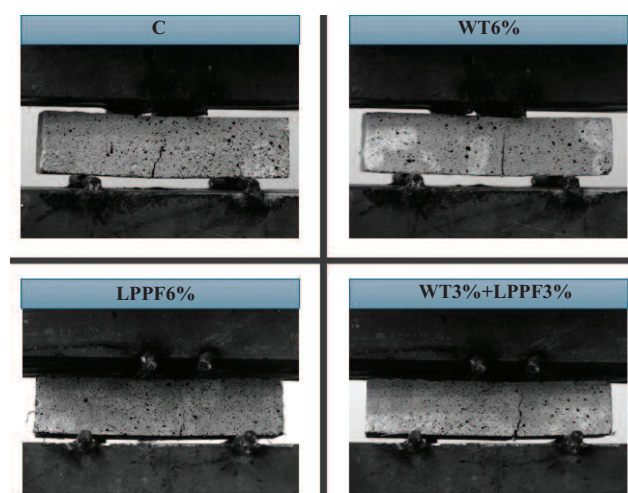
Fig. 3. Displacement of samples [mm] at their maximum load values

Rys. 3. Przemieszczenie próbek [mm] w przypadku maksymalnych wartości obciążenia

Table 3. Increase in load relative to displacement for given sample types

Tabela 3. Zwiększenie obciążenia względem przemieszczenia w przypadku danych typów próbek

Sample type/ Typ próbki	Obciążenie [kN] przy przemieszczeniu	
	1 mm	1,50 mm
WT6%	1,40	próbka zniszczona siłą 2,51 kN (przy przemieszczeniu 1,19 mm)
WT3%+LPPF3%	0,60	2,70 kN
LPPF6%	2,65	5,20 kN

**Photo 2. Destruction of samples after 28 days**

Fot. 2. Zniszczenie próbek po 28 dniach

phenomenon occurred. In the case of fibres from turbine blades, the deformation pattern resembles brittle destruction, but the process was less sudden. Polypropylene fibres are characterised by high deformability, which was also confirmed by the slow formation of cracks (no complete fracture occurred). The sample with both types of fibres demonstrated optimal behaviour during bending, combining the characteristics of both behaviours.

Conclusions

Cement composites with fibres from wind turbine blades offer many material, environmental and social benefits. They have comparable compressive strength to polypropylene fibres. Samples with wind turbine blade fibres generally exhibit higher compressive strength compared to the control sample, and after 56 days they achieved a similar value. The samples containing 6% and 10% wind turbine blade fibres perform best in comparison with the control sample. The addition of these fibres also has a positive effect on the destruction of the samples – greater load-bearing capacity is observed in comparison with the control sample, as well as better usability parameters.

Based on the analyses performed, it was concluded that it is beneficial to combine both fibres, as this results in better performance parameters and greater ability to absorb destructive energy. These arguments demonstrate the

stałych zanotowano większe wartości przemieszczeń. Podobną analizę przedstawiono w tabeli 3, gdzie przy przemieszczeniu 1 mm oraz 1,5 mm wskazano wartości odpowiedniego obciążenia.

Przemieszczenie o wartości 1 mm zanotowano w przypadku próbki WT6% przy sile 1,40 kN, próbki z włóknami mieszczymi WT3% + LPPF3% przy sile o ponad połowę mniejszej, tj. 0,6 kN, a próbki z włóknami polipropylenowymi przy sile 2,65 kN. Pokazuje to parametry użyteczności badanych próbek i ich nośności. W przypadku próbki WT6% odnotowano zniszczenie przy przemieszczeniu 1,19 mm i sile 2,51 kN, stąd brak w tabeli 3 wartości przy przemieszczeniu 1,5 mm.

Obraz zniszczenia próbek przedstawiono na fotografii 2. W przypadku próbki kontrolnej stwierdzono pęknięcie, które nastąpiło w sposób nagły i przebiegło dynamicznie – wystąpiło tzw. zjawisko kruchego pęknięcia. W przypadku włókien z łopat turbin schemat pracy odkształcenia przypomina kruche zniszczenie, natomiast proces ten był mniej nagły. Włókna polipropylenowe charakteryzują się dużą odkształcalnością, co potwierdziło również powolne powstawanie rys (nie doszło do całkowitego pęknięcia). Optymalnym zachowaniem podczas zginania wykazała się próbka z włóknami obu typów, łącząca cechy obu tych zachowań.

Wnioski

Kompozyty cementowe z włóknami z łopat turbin wiatrowych zapewniają wiele korzyści o charakterze materiałowym, środowiskowym i społecznym. Cechują się porównywalną wytrzymałością na ściskanie z włóknami polipropylenowymi. Próbki z włóknami z łopat turbin wiatrowych charakteryzują się na ogół większą wytrzymałością na ściskanie w porównaniu z próbką kontrolną, a po 56 dniach uzyskały wartość zbliżoną. Najkorzystniej w porównaniu z próbką kontrolną prezentują się próbki zawierające 6% oraz 10% włókien z łopat wiatrowych. Dodatek tych włókien wpływa także pozytywnie na zniszczenie próbek – obserwuje się większą nośność w porównaniu z próbką kontrolną oraz lepsze parametry użyteczności.

Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono, że korzystne jest połączenie obu włókien, ponieważ uzyskuje się lepsze parametry użyteczności i większą zdolność do pochłaniania energii zniszczenia. Argumenty te świadczą o możliwości zastąpienia włókien produkcyjnych badanymi włóknami pochodzącymi z łopat turbin wiatrowych, które stanowią źródło odpadów trudnych do poddania recyklingowi. Problematyka wielkogabarytowych odpadów, jakimi są łopaty turbin wiatrowych, jest szczególnie istotna również ze względu na zwiększającą się wagę łopat wycofywanych z eksploatacji. Wykorzystanie ich w kompozytach cementowych pozwoli na zmniejszenie zapotrzebowania na włókna produkcyjne, a tym samym ograniczy emisję CO₂ i gazów cieplarnianych powstających w procesach ich wytwarzania. Kolejną korzyścią środowiskową jest mini-

possibility of replacing production fibres with the tested fibres from wind turbine blades, which are a source of waste that is difficult to recycle. The issue of bulky waste, such as wind turbine blades, is also particularly important due to the increasing weight of blades being taken out of service. Their use in cement composites will reduce the demand for production fibres, thereby limiting CO₂ and greenhouse gas emissions generated in the processes of their production. Another environmental benefit is the minimisation of the amount of waste sent to landfill. All these activities also bring measurable social benefits – they reduce the negative perception of so-called green energy by reducing the amount of difficult-to-recycle by-products and have a positive impact on the health of society by reducing gas emissions into the atmosphere.

Badania zrealizowano w ramach projektu NCN „IMPRESS-U”, nr UMO-2023/05/Y/ST11/00261, na licencji CC-BY.

Received: 15.07.2025

Revised: 23.09.2025

Published: 23.12.2025

malizacja ilości odpadów składowanych na wysypiskach. Wszystkie te działania przynoszą również wymierne korzyści społeczne – ograniczają negatywne postrzeganie tzw. zielonej energii przez zmniejszenie ilości trudnych do recyklingu produktów ubocznych oraz wpływają pozytywnie na stan zdrowia społeczeństwa dzięki redukcji emisji gazów do atmosfery.

Badania zrealizowano w ramach projektu NCN „IMPRESS-U”, nr UMO-2023/05/Y/ST11/00261, na licencji CC-BY.

Artykuł wpłynął do redakcji: 15.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 23.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Krishnaraja AR, Kandasamy S. Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *Int. J. Chem. Tech. Res.* 2017; vol. 10, no. 8, pp. 341–347.
- [2] Krishnaraja AR, Kandasamy S. Flexural performance of engineered cementitious composite layered reinforced concrete beams. *Arch. Civ. Eng.* 2017, vol. 63, no. 4, pp. 173–189.
- [3] Ahmeda SFU, aMaalej M. Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. *Constr. Build. Mater.* 2009; vol. 23, no. 1, pp. 96–106.
- [4] Ming Y, Chen P, Li L, Gan G, Pan G. A Comprehensive Review on the Utilization of Recycled Waste Fibers in Cement-Based Composites. *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14133643.
- [5] Mohamad Ibrahim N et al. Investigating the Effect of Steel Wire and Carbon Black from Worn Out Tyre on the Strength of Concrete. *Int. J. Nanoelectron. Mater.* 2024. DOI: 10.58915/ijneam.v17i4.1286.
- [6] Augustino S, Onchiri RO, Kabubo C, Kanali C. Mechanical and durability performance of high-strength concrete with waste tyre steel fibres. *Adv. Civ. Eng.* 2022. DOI: 10.1155/2022/4691972.
- [7] Pilakoutas K, Neocleous K, Tlemat H. Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. *Proc. ICE Eng. Sustain.* 2004. DOI: 10.1680/ensu.2004.157.3.131.
- [8] Chen M, Si H, Fan X, Xuan Y, Zhang M. Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125896.
- [9] Michalik A. Efektywność zbrojenia betonu oczyszczonymi włóknami z recyklingu opon. Ph. D. dissertation, Instytut Techniki Budowlanej. 2023.
- [10] Wang Y, Wu H, Li V. Concrete Reinforcement with Recycled Fibers: A Review. *J. Mater. Civ. Eng.* 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314).
- [11] T. Ran, J. Pang, and D. Wu, “Experimental study on recycling rubber to increase the impact resistance of cement mortar,” *Sci. Rep.*, vol. 14, Art. no. 25230, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-73834-6.
- [12] Mirsadeghi MN, Masrouf FF, MolaAbasi H, Karakouzian M, Libre N. A feasible reuse of waste surgical face mask fibers in reinforcement of wide-range cemented sand with various porosities. *Int. J. Geosynthetics Ground Eng.* 2024. DOI: 10.1007/s40891-024-00570-2.
- [13] Kilmartin-Lynch S, Saberian M, Li J, Roychand R, Zhang G. Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete. *J. Clean. Prod.* 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126460.
- [14] Ningrum D, Soehardjono A, Suseno H, Wibowo A. Analysis of the effect of using COVID-19 medical mask waste with polypropylene on the compressive strength and split tensile strength of high-performance concrete. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2023. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.272529.
- [15] Awal ASMA, Mohammadhosseini H, Jumaat MZ. Concrete incorporating disposable mask fiber and nano-silica: Mechanical and microstructural properties. *Constr. Build. Mater.* 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.128661.
- [16] Ochi T, Okubo S, Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement & Concrete Composites*. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>.
- [17] Fraternali F, Ciancia V, Chechile R, Rizzano G, Feo L, Incarnato L. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*. 2011. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.03.025.
- [18] Marthong C, Sarma DK. Influence of PET fiber geometry on the mechanical properties of concrete: an experimental investigation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2015. DOI: 10.1080/19648189.2015.1072112.
- [19] Abdulateef LA, Hassan SH, Ahmed AM. Exploring the mechanical behavior of concrete enhanced with fibers derived from recycled plastic bottles. *Advances in Engineering Technology and Applied Sciences Research*. 2024. DOI: 10.48084/etasr.6895.
- [20] C. Signorini C, Volpini V. Mechanical performance of fiber reinforced cement composites including fully-recycled plastic fibers. *Fibers*. 2021. DOI: 10.3390/fib9030016.
- [21] Karanth SS, Ghorpade VG, Rao HS. Shear and impact strength of waste plastic fibre reinforced concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.2.173>.
- [22] Jasińska D, Dutkiewicz M. Waste management of wind turbine blades – A review of recycling methods and applications in cementitious composites. *Sustainability*. 2025. DOI: 10.3390/su17030805.
- [23] Cousins D, Suzuki Y, Murray R, Samaniuk J, Stebner A. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.
- [24] Liu P, Barlow CY. Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*. 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.
- [25] Yazdanbakhsh A, Bank LC, Rieder K-A, Tian Y, Chen C. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.005.
- [26] Abdo M, Toumpanaki E, Diambra A, Comandini G, Bank L. Evaluation of mechanical properties of concrete with recycled FRP wind blade waste material, in *Proc. 11th Int. Conf. Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering*, Rio De Janeiro, Brazil, 2023.
- [27] V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, V. Ortega-López, and J. M. Manso, “Raw-crushed wind-turbine blade: waste characterization and suitability for use in concrete production,” *Resources, Conservation and Recycling*, 2023. doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107160.

- [28] Ortega-López V, Faleschini F, Hurtado-Alonso N, Manso-Morato JM, Revilla-Cuesta V. Analysis of raw-crushed wind-turbine blade as an overall concrete addition: stress-strain and deflection performance effects. *Composite Structures*. 2024. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118170.
- [29] Revilla-Cuesta V, Manso-Morato J, Hurtado-Alonso N, Skaf M, Ortega-López V. Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.108383.
- [30] Baturkin D, Hisseine OA, Masmoudi R, Tagnit-Hamou A, Massicotte L. Valorization of recycled FRP materials, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105807>.
- [31] Sorathiya S, Patel, NR, Pitroda J. A techno economical study on wind turbine blade waste as replacement of natural coarse aggregates in concrete. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*. 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-8693.0301004>.
- [32] Plawecka K, Przybyła J, Korniejewski K, Lin W-T, Cheng A, Łach M. Recycling of mechanically ground wind turbine blades as filler in geopolymer composite. *Materials*. 2021. DOI: 10.3390/ma14216539.
- [33] Pepera R, Shafei B. Advancing Toward Net Zero: The Role of Fibers in Sustainable Concrete Construction, in *The 1st Int. Conf. on Net-Zero Built Environment*, NTZR 2024, M. Kioumars and B. Shafei, Eds. Cham: Springer. 2025, Lecture Notes in Civil Engineering. DOI: 10.1007/978-3-031-69626-8_31.
- [34] Kazemian M, Shafei B. Carbon sequestration and storage in concrete: A state-of-the-art review of compositions, methods, and developments. *J. CO₂ Util.* 2023. DOI: 10.1016/j.jcou.2023.102443.
- [35] NASA The atmosphere: Getting a handle on carbon dioxide, <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/greenhouse-gases/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/> [DOSTĘP 18.07.2025].
- [36] Wu S, Shao Z, Andrew RM et al. Global CO₂ uptake by cement materials accounts 1930–2023. *Sci Data*. 2024. DOI: 10.1038/s41597-024-04234-8.
- [37] Scrivener K, Vanderley J, Gartner E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
- [38] Krishnaraja AS, Anandakumar S, Jegan M. Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites. *Cement Wapno Beton*. 2018; vol. 23, no. 6, pp. 479–486.
- [39] Arivusudar N, S. Babu S. Mechanical properties of engineered cementitious composites developed with silica fume. *Cement-Wapno-Beton*. 2020. DOI: 10.32047/CWB.2020.25.4.3.
- [40] Zhang J, Li VC, Nowak A, Wang S. Introducing Ductile Strip for Durability Enhancement of Concrete Slabs. *ASCE J. Mater. Civ. Eng.*, accepted 2001.
- [41] Li VC, Wang S, Wu C. Tensile Strain-Hardening Behavior of PVAECC. *ACI J. Mater.*, submitted Jan. 2001.
- [42] Mukhopadhyay S, Khatana S. A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. *J. Ind. Text.* 2015. DOI: 10.1177/1528083714529806.
- [43] García Santos A, Ma. Rincón J, Romero M, Talero R. Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing. *Constr. Build. Mater.* 2005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.07.023.
- [44] Chen W, Ji X, Huang Z. Influence of fiber type on mechanical properties of lightweight cement-based composites. *Sci. Eng. Compos. Mater.* 2021. DOI: 10.1515/secm-2021-0021.
- [45] Du W, Yu F, Qiu L, Guo Y, Wang, J, Han B. Effect of Steel Fibers on Tensile Properties of Ultra-High-Performance Concrete: A Review. *Materials*. 2024. DOI: 10.3390/ma17051108.
- [46] Pakravan HR, Latifi M, Jamshidi M Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059.
- [47] Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000 – 2010. *Prog. Polym. Sci.* 2012. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [48] Kaith BS, Mittal H, Jindal R, Maiti MJ, Kalia S. Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites, in *Polymer Composites*. 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-17370-7_16.
- [49] Singh A, Yadav BP. Sustainable innovations and future prospects in construction material: a review on natural fiber-reinforced cement composites. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-35236-z.
- [50] Aydın H, Şenses M, Bayram Ş. Calcite Added PP Fiber Production. *Orclever Proceedings of Research and Development*. 2024. DOI: 10.56038/oprd.v5i1.591.
- [51] Joshi S, Drzal L, Mohanty A, Arora S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 2004. DOI: 10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- [52] PN-EN 196-1 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości, Polski Komitet Normalizacyjny.
- [53] PN-EN 1015-1 Badania zapraw – Część 1: Pobieranie próbek, przygotowanie i konserwacja próbek oraz określanie zgodności, Polski Komitet Normalizacyjny.
- [54] Akçaözöglü S, Adıgüzel AO, Akçaözöglü K, Deveci EÜ, Gönen Ç. Investigation of the bacterial modified waste PET aggregate VIA *Bacillus safensis* to enhance the strength properties of mortars. *Construction and Building Materials*. 2021; vol. 270, p. 121885.
- [55] Çelikten S, Sarıdemir M, Söloğlu M. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135857.
- [56] Marciniak B. Badania i analiza wytrzymałości na ściskanie betonów różnego rodzaju wyznaczanej na próbkach prostopadłościennych, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, luty 2017.