

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. UZ^{1*)}

ORCID: 0000-0002-1521-8681

mgr inż. Filip Szmatura¹⁾

ORCID: 0000-0001-9725-1540

Właściwości zapraw cementowych z dodatkiem rozdrobnionego GFRP z recyklingu łopatek turbin wiatrowych

Properties of cement mortars with the addition of minced GFRP from recycled wind turbine blades

DOI: 10.15199/33.2023.11.07

Streszczenie. W przyszłości największym wyzwaniem dla energetyki wiatrowej będzie recykling łopatek turbin wiatrowych. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem proszków pochodzących z recyklingu mechanicznego łopatek turbin wiatrowych wykonanych z kompozytów szklanych. Duży dodatek tych proszków powoduje zmniejszenie wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie, co jest związane z pogorszeniem urabialności mieszanki, zmniejszeniem gęstości pozornej oraz zwiększeniem porowatości i nasiąkliwości stwardniałych zapraw.

Słowa kluczowe: kompozyty; recykling; zaprawy cementowe; wytrzymałość.

Abstract. The recycling of wind turbine blades will be the biggest challenge for the wind power industry in the near future. This paper presents the results of a study of the physical and mechanical properties of cementitious mortars modified with the addition of powders from the mechanical recycling of wind turbine blades made from glass composites. Increased powder addition decreases the compressive and flexural strength of mortars, which is associated with a decrease in the workability of the mixture, a decrease in apparent density and an increase in the porosity and absorbability of the hardened mortars.

Keywords: composites; recycling; cement mortars; strength.

Zwykle wzmocnione włóknami FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), tworzywa termoutwardzalne oraz tworzywa termoplastyczne są powszechnie stosowane jako zamienniki metali w wielu zastosowaniach przemysłowych. Materiały kompozytowe w pewnych okolicznościach mają przewagę nad wieloma tradycyjnymi materiałami, takimi jak stal, beton oraz drewno. Ich zalety, to zazwyczaj mniejsza gęstość, lepsze właściwości mechaniczne w określonych kierunkach, łatwość produkcji wyrobów o różnym kształcie, łatwość montażu i duża trwałość w trudnych środowiskach chemicznych i wodnych. Obecnie znaczna część odpadów FRP, wytwarzanych na całym świecie, trafia na wysypiska śmieci lub jest spalana jako paliwo alternatywne.

Energia wiatru jest jednym z najważniejszych odnawialnych źródeł energii. Wszystkie prognozy wskazują, że będzie nadal szybko się rozwijać w ciągu następnej dekady. Łopaty turbin wiatrowych (WT) są wykonane z materiałów kompozytowych zawierających przede wszystkim żywicę termoutwardzalną i włókna szklane (GF), a także włókna węglowe (CF). Łopaty turbiny wiatrowej składają się z dwóch powierzchni poszycia o konstrukcji sandwichowej, połączonych ze sobą jednym lub kilkoma żebrami lub belką skrzynkową. Część konstrukcyjną łopaty stanowią kompozyty szklane lub węglowe, a część niekonstrukcyjną kompozyty szklane uzu-

pełnione lekkimi materiałami wypełniającymi, takimi jak balsa lub pianka poliuretanowa [1] – 80 – 90% masy łopaty to materiał kompozytowy, z czego 60 – 70% stanowią włókna wzmacniające, a pozostałe 30 – 40% żywica. W skład masy łopaty w niewielkim stopniu wchodzi również drewno, pianka, balsa, kleje, żelkot i farba [2].

Obecnie pierwsze turbiny wiatrowe zbliżają się do końca okresu eksploatacji, ponieważ ich żywotność wynosi 20 – 25 lat [3], a wkrótce ich liczba znacznie się zwiększy. Szacuje się, że ok. 25 tys. ton łopatek rocznie osiągnie koniec żywotności do 2025 r. [4], a do 2050 r. zostanie wygenerowanych 2 mln ton odpadów z łopatek turbin wiatrowych [5]. Recykling tych łopatek jest skomplikowany i kosztowny, ponieważ kompozyty szklane lub węglowe są trudne do przetworzenia i wymagają stosowania specjalistycznych urządzeń i technologii. Zużyte łopaty turbin wiatrowych mogą być również poddawane naprawie oraz regeneracji i wtedy są powtórnie wykorzystywane w siłowniach wiatrowych [6] lub po odpowiednim przygotowaniu mogą mieć alternatywne zastosowanie jako obiekty małej architektury, kładki dla pieszych, elementy budynków, ekranów akustycznych [7]. Coraz większa część odpadów FRP poddawana jest recyklingowi, a najczęściej stosowanymi metodami jest recykling: mechaniczny; termiczny (piroliza); chemiczny (solwoliza) oraz fragmentacja wysokonapięciowa [8, 9]. Recykling mechaniczny polega na dokładnym mieleniu materiałów po wstępnym etapie cięcia, kruszenia i rozdrabniania na mniejsze kawałki o różnych frakcjach. Efektem procesów

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

recyklingu jest degradacja matrycy kompozytowej, w wyniku czego powstają opady, które mogą być ponownie wykorzystane. Są to oleje, gazy i produkty stałe – włókna, ścier, pył.

Badania nad wykorzystaniem odpadów z recyklingu mechanicznego GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) w cementowych materiałach budowlanych są wielokierunkowe. Odpowiednio rozdrobnione odpady z kompozytów szklanych mogą być podawane do pieca jako surowiec do produkcji klinieru cementowego i jako paliwo wtórne, a w zależności od uzyskanej wielkości frakcji po rozdrobnieniu próbuje się zastąpić nimi cement, kruszywo drobne oraz kruszywo grube, a także wprowadzić te odpady do matrycy cementowej jako zbrojenie rozproszone [10, 11].

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku dwóch rodzajów odpadów pylistych, pochodzących z recyklingu mechanicznego łopat GFRP, na wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw cementowych.

Materiały i metody

Badane zaprawy cementowe modyfikowano różną ilością dwóch rodzajów proszków (pyłów) pozyskanych z instalacji odpylania podczas recyklingu mechanicznego łopat turbin wiatrowych wykonanych z kompozytów szklanych. Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania tego rodzaju dodatku do spoiwa cementowego pod kątem zachowania deklarowanej klasy wytrzymałości cementu. Badania zapraw cementowych obejmowały oznaczenie: wytrzymałości na ściskanie i zginanie po 2 i 28 dniach dojrzewania; gęstości pozornej i nasiąkliwości po 28 dniach dojrzewania oraz określenie konsystencji świeżej mieszanki.

Do wykonania zapraw zastosowano cement CEM I 42,5R, którego właściwości użytkowe przyjęto z deklaracji producenta, oraz piasek normowy CEN i wodę destylowaną o temperaturze 20°C, a także dwa rodzaje odpadów z recyklingu w postaci proszków, które opisano jako proszek biały (WP) i różowy (PP). Zaprawy wykonane na bazie proszku białego i proszku różowego oznaczono odpowiednio jako WPM i PPM.

Skład zarobów zapraw cementowych był następujący: cement – 450 g; woda – 225 ml; piasek normowy – 1350 g, a procentowa ilość proszków WP i PP w stosunku do stałej masy cementu wynosiła 5, 10, 15, 20, 30 i 40%, co stanowi wagowo odpowiednio 22,5, 45, 67,5, 90, 135 i 180 g. Wskaźnik wodno-cementowy zapraw $w/c = 0,5$. W zarobach nie stosowano plastyfikatorów. Badania wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie przeprowadzono na beleczkach 40 x 40 x 160 cm zgodnie z normą PN-EN 196-1:2016. *Metody badania cementu, Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.*

Wyniki badań

Właściwości fizyczne. Ważnym czynnikiem decydującym o właściwościach stwardniałych zapraw cementowych i betonów jest ich urabialność i konsystencja. Wykonano badania konsystencji zapraw cementowych, której wyznacznikiem jest średnica rozplywu na stoliku. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 1015-3:2000 *Metoda badania zapraw do murów – Określenie konsystencji zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)*. W tabeli zamieszczono wyniki przepro-

wadzonych badań konsystencji zapraw.

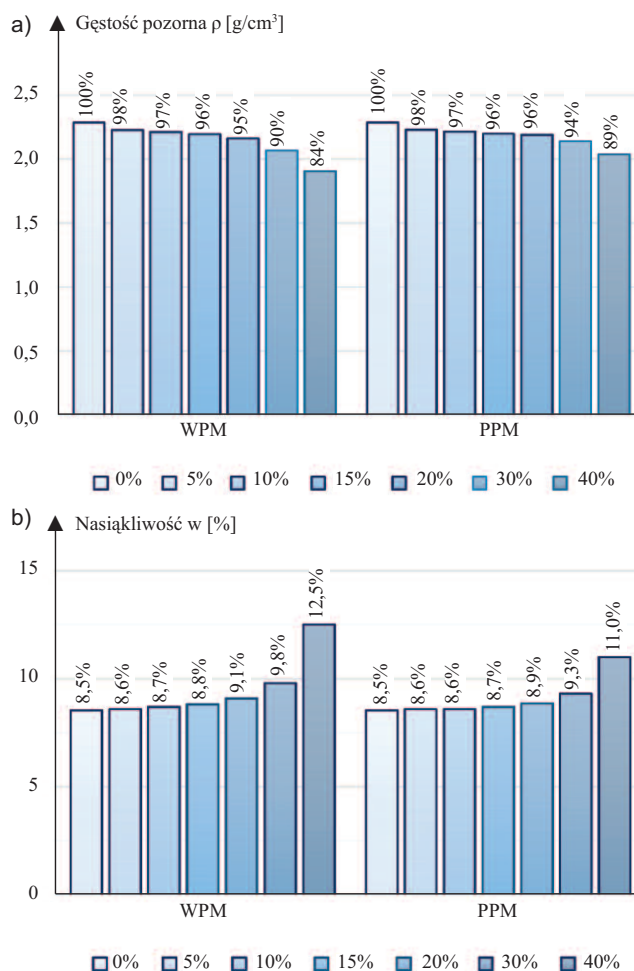
Średnica rozplywu mieszanki zaprawy referencyjnej, bez dodatku proszków, wynosiła 155 mm. Mieszanki z dodatkiem proszku PPM wykazywały się bardziej plastyczną konsystencją niż mieszanki z dodatkiem proszku WPM. Średnica rozplywu mieszanki PPM była większa niż mieszanki WPM.

W przypadku dodania 15% i więcej proszku białego oraz 20% i więcej proszku różowego, średnica rozplywu była taka sama jak bazowa średnica stożka. Uzyskane wyniki badań świadczą o dużej wodożądności zastosowanych proszków, co pogarszało w istotny sposób konsystencję i urabialność z mieszanki cementowych. Na rysunku 1a przedstawiono wyniki badania gęstości pozornej zapraw, a na rysunku 1b ich nasiąkliwości. Zgodnie z oczekiwaniami zwiększenie dodatku proszków WP i PP spowodowało zmniejszenie gę-

Wyniki badań konsystencji zapraw WPM i PPM

Consistency test results for WPM and PPM mortars

Zawartość WP i PP [%]	Średnica rozplywu [mm]	
	WPM	PPM
0	155	155
5	133	142
10	110	122
15	100	110
20	100	100
30	100	100
40	100	100



Rys. 1. Wpływ dodatku proszków WP i PP na: a) gęstość pozorną ρ ($\rho_{0\%} = 2,284 \text{ g/cm}^3$); b) nasiąkliwość

Fig. 1. Effect of the addition of WP and RP powders on: a) apparent density ρ ($\rho_{0\%} = 2,284 \text{ g/cm}^3$); b) saturation

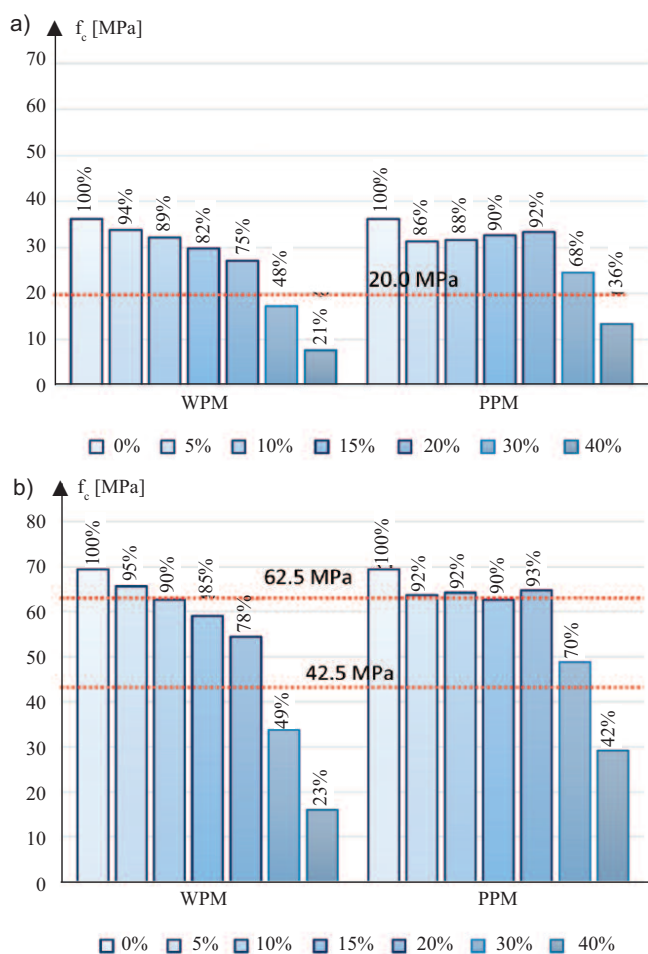
stości pozornej i zwiększenie nasiąkliwości zapraw. Przy ustalonej recepturze zarobów dodatek proszków WP i PP miał wpływ na konsystencję zapraw. W skrajnym przypadku stwierdzono zmniejszenie gęstości pozornej o 16%. Z kolei największa ilość dodanego proszku białego (40%) spowodowała zwiększenie nasiąkliwości zaprawy o prawie 50% w porównaniu z próbką referencyjną. Wynika to ze zwiększenia porowatości zapraw, będącej efektem pogarszającej się urabialności wraz ze wzrostem ilości dodawanych proszków.

Właściwości mechaniczne. Na rysunku 2 pokazano wpływ dodania do zaprawy proszków białego WP i różowego PP na dwudniową i 28-dniową wytrzymałość na ściskanie. W obu przypadkach dodatek proszków WP i PP powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami referencyjnymi bez dodatku proszków. Dodatek proszku WP w ilości 5 – 20% powoduje liniowy spadek wytrzymałości dwu- i 28-dniowej odpowiednio do 75 i 78% wytrzymałości referencyjnej. Dodatek proszku PP w ilości 5 – 20% powoduje natomiast, że jest mniej więcej stały spadek wytrzymałości wczesnej i normowej niezależnie od ilości dodawanego proszku, a wytrzymałość zmienia się o 90 – 93% w odniesieniu

do wytrzymałości próbek referencyjnych. Dodatek proszków WP i PP w ilości 30% i 40% skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości dwudniowej odpowiednio do 21 i 36%, a wytrzymałości 28-dniowej odpowiednio do 23 i 42%.

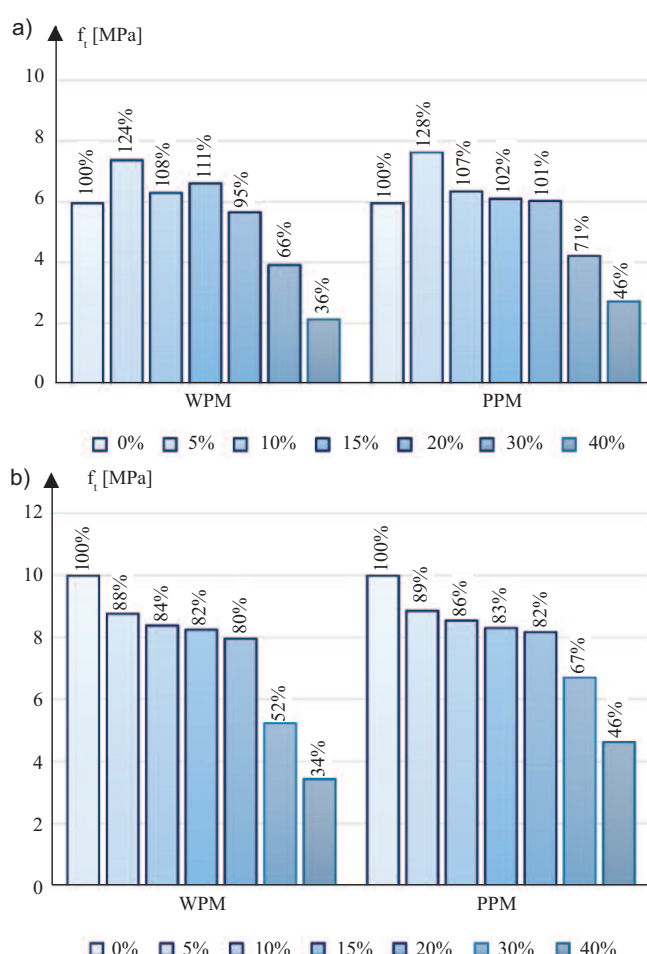
Stwierdzono, że zaprawy z dodatkiem PP mają większą wytrzymałość na ściskanie niż z dodatkiem proszku WP. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie jest efektem wzrostu porowatości zapraw w wyniku pogarszającej się urabialności mieszanek ze wzrostem ilości dodatku proszków. W przypadku dodatku 20% proszków WP i PP wytrzymałość na ściskanie nie jest mniejsza od 80% wytrzymałości referencyjnej i zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku* cement użyty w badaniach wraz z dodaniem proszków WP i PP ma wymagane cechy mechaniczne cementu klasy 42,5, ponieważ wczesna i normowa wytrzymałość na ściskanie zapraw spełniają wymagania normowe: $f_{c2,20\%} > 20 \text{ MPa}$ i $f_{c28,20\%} > 42,5 \text{ MPa}$ (rysunek 2).

Wpływ dodatku proszków WP i PP do zapraw na dwu- i 28-dniową wytrzymałość na rozciąganie podczas zginania przedstawiono na rysunku 3. Efektem dodania 5 – 20% prosz-



Rys. 2. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość na ściskanie f_c : a) wytrzymałość wczesna ($f_{c2,0\%} = 36,2 \text{ MPa}$); b) wytrzymałość normowa ($f_{c28,0\%} = 69,4 \text{ MPa}$)

Fig. 2. Effect of the addition of WP and PP powders on the compressive strength f_c : a) early strength ($f_{c2,0\%} = 36,2 \text{ MPa}$); b) normal strength ($f_{c28,0\%} = 69,4 \text{ MPa}$)

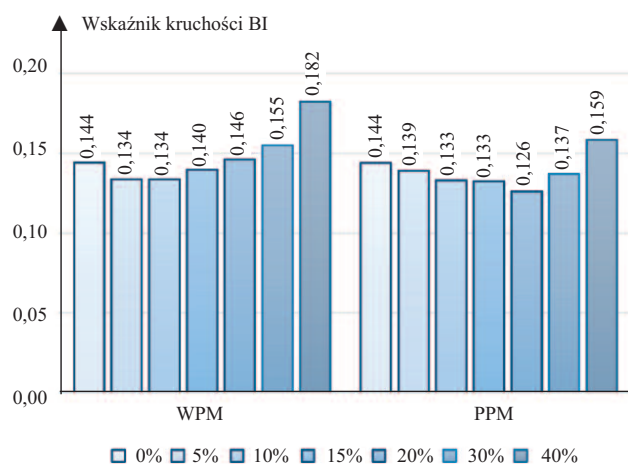


Rys. 3. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość na zginanie f_t : a) wytrzymałość wczesna ($f_{t12,0\%} = 5,95 \text{ MPa}$); b) wytrzymałość normowa ($f_{t28,0\%} = 9,99 \text{ MPa}$)

Fig. 3. Effect of the addition of WP and PP powders on the flexural strength f_t : a) early strength ($f_{t12,0\%} = 5,95 \text{ MPa}$); b) normal strength ($f_{t28,0\%} = 9,99 \text{ MPa}$)

ku WP i PP jest wzrost dwudniowej wytrzymałości na zginanie do 124% w przypadku proszku WP i do 128% proszku RP, a efektem dodatku proszków w ilości 30 i 40% jest spadek wytrzymałości do 36 i 46% wytrzymałości referencyjnej odpowiednio w przypadku WP i PP. Po 28 dniach dojrzewania mamy do czynienia ze zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem ilości dodanych proszków WP i PP. Charakter zmian wytrzymałości w przypadku obu proszków jest bardzo podobny. Dodatek proszków nieprzekraczający 20% powoduje, że wytrzymałość na zginanie stanowi nie mniej niż 80% wytrzymałości referencyjnej, a po przekroczeniu tej ilości wytrzymałość na zginanie zmniejsza się w przypadku WP i PP odpowiednio do 34 i 46%.

Pozytywny wpływ dodatku proszków WP i PP na wytrzymałość dwudniową na zginanie (rysunek 3a) jest zaskakujący, biorąc pod uwagę zmniejszenie wytrzymałości wczesnej na ściskanie (rysunek 2a). Stwierdzony wzrost wytrzymałości na zginanie może wskazywać na obecność bardzo drobnych frakcji włóknistych w proszkach białym i różowym, które mogły zadziałać jak mikrobrojenie rozproszone. Na rysunku 4 zamieszczono wykresy słupkowe ilustrujące wpływ dodatku proszku białego i różowego na wskaźnik kruchości BI (*Brittleness Index*) stwardniałych zapraw po 28 dniach dojrzewania, który jest zdefiniowany jako iloraz wytrzymałości na rozciąganie f_t i wytrzymałości na ściskanie f_c . Im mniejsza jest wartość wskaźnika BI, tym większa kruchość materiału. Wskaźnik kruchości betonów wynosi ok. $1/8 = 0,125$, a badanych zapraw zmienia się z ilością proszków WP oraz PP i osiąga pewne minimum, a jego wartość zależy od rodzaju proszku. W przypadku zapraw z proszkiem białym WPM różnica między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie jest mniejsza niż w przypadku zapraw z proszkiem różowym PPM.



Rys. 4. Wpływ dodatku proszków WP i PP na wskaźnik kruchości BI = $f_{t,28}/f_{c,28}$

Fig. 4. Effect of the addition of WP and PP powders on the brittleness index $BI = f_{t,28}/f_{c,28}$

Podsumowanie

Recykling łopat turbin wiatrowych staje się bardzo dużym wyzwaniem dla branży energetycznej ze względu na szybki rozwój farm wiatrowych. Podejmowane są więc intensywnie badania dotyczące recyklingu łopat turbin wiatrowych, w tym

zastosowania odpadów z recyklingu mechanicznego FRP w betonach cementowych.

Dodatki do betonów pochodzącymi z recyklingu kompozytów szklanych można modyfikować właściwości mechaniczne i fizyczne zapraw i betonu. Dodanie odpadów GFRP, w postaci proszków WP i PP, w ilości większej niż 20% masy cementu, pogarsza właściwości mechaniczne zapraw cementowych. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie jest bardzo duże. Zastosowanie tych odpadów w ilości do 20% masy cementu daje efekty w przypadku produkcji betonów do zastosowania w elementach konstrukcyjnych, takich jak ławy i ściany fundamentowe, ale przede wszystkim do wykonywania betonów niekonstrukcyjnych, takich jak beton architektoniczny, obiekty małej architektury oraz galanteria budowlana. Jednak konieczne są dalsze badania dotyczące między innymi mrozoodporności.

Dodatkiem proszków WP i PP można modyfikować właściwości fizyczne zapraw cementowych i betonu. Dodatek proszków WP i RP do zapraw cementowych obniża istotnie ich gęstość pozorną i zwiększa porowatość, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia współczynnika przewodzenia ciepła oraz zwiększenia nasiąkliwości.

Głównymi problemami związanymi z wykorzystaniem odpadów pochodzących z recyklingu w betonach cementowych są nieznane właściwości materiału źródłowego, który został poddany recyklingowi, oraz potencjalnie duże zróżnicowanie właściwości materiałów pochodzących z recyklingu dostarczanych do zakładu produkcji betonu.

Literatura

- [1] Mishnaewsky L, Beranner K, Petersen H, N. Beauson J, McGugan M, Sorensen B. F. Materials for wind blades: An overview. *Materials*. 2017; 10, 1285.
- [2] Cooperman A, Eberle A, Lantz E. Wind turbine blade material in the united states: quantities, costs, and end-of-life options. *Resources Conservation and Recycling*. 2021, 168, 105439.
- [3] Recykling albo budownictwo. Drugie życie łopat wiatrowych. Dostępne online: <https://zielonagospodarka.pl/recykling-albo-budownictwo-drugie-zycie-lop-at-wiatrowych-1766> (29.04.2023r.)
- [4] Newly Discovered Chemical Process Renders All Existing Wind Turbine Blades Recyclable. Dostępne online: <https://www.offshorewind.biz/2023/02/08/newly-discovered-chemical-process-renders-all-existing-wind-turbine-blades-recyclable/> 17.03.2023 r.)
- [5] Liu P, Barlow CY. Wind turbine blade waste in 2050 r. *Waste Management*. 2017; 62, 229 – 240.
- [6] Katnam KB, Comer AJ, da Silva LFM, Young TM. Composite repair in wind turbine blades: An overview. *The Journal of Adhesion*. 2015; 91 (1-2), 113 – 139.
- [7] Karavida S, Peponi A. Wind turbine blade waste circularity coupled with urban regeneration: a conceptual framework. *Energies*. 2022; 16, 1464.
- [8] Kwame A-F, Akinlabi ET. Recycling of Fibre Reinforced Composites: A Review of Current Technologies. *Proceeding of the DII-2017 Conference on Infrastructure Development and Investment – Strategies for Africa*, 30 August – 1 September 2017, Livingstone, Zambia, 157-167.
- [9] Oliveux G, Dandy LO, Leeke GA. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Scienc*. 2015; 71, 61 – 99.
- [10] Baturkin D, Hisseine OA, Masmoudi R, Hamou AT, Massicotte L. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources. Conservation & Recycling*. 2021, 174, 1055807.
- [11] Correia JR, Almeida NM, Figueira JR. Recycling of FRPcomposites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*. 2011; 19 (15), 1745 – 1753.

Przyjęto do druku: 23.10.2023 r.