RECYKLING ZUŻYTYCH ŁOPAT TURBIN WIATROWYCH – SKALA ZJAWISKA DLA POLSKI

Kacper Wronka, Krzysztof Badyda

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, odpady z łopat turbin wiatrowych, szacowanie ilości odpadów

Streszczenie. W artykule podjęto próbę oszacowania ilości odpadów pochodzących z łopat turbin wiatrowych w nadchodzących latach dla Polski. Na bazie istniejących modeli obliczeniowych podjęto próbę skonstruowania modelu jak najwierniej oddającego polskie realia. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch scenariuszy, które różnią się metodologią i założeniami. Pierwszy scenariusz bazował na rozkładzie łącznej mocy zainstalowanej turbin wiatrowych w latach 1997 – 2021 i prostym podejściu ilościowym, aby oszacować rozkład ilości odpadów w czasie. Drugi scenariusz bazował na dokładniejszych danych dotyczących farm wiatrowych w Polsce i bardziej rozwiniętym modelu ilościowym Liu i Barlow. Poruszono zagadnienia, które pomijane są przy obliczeniach tego typu, a w szczególności perspektywę przedłużenia czasu eksploatacji turbin wiatrowych ze względu na możliwy duży wpływ na ilość odpadów. Oszacowano wolumeny odpadów na bazie włókna szklanego i węglowego w poszczególnych latach do roku 2040. Wyróżniono materiał kompozytowy na bazie włókna szklanego jako dominujący materiał odpadowy. Uzyskane wyniki osadzono w kontekście literaturowym.

1. WSTĘP

Siłownie wiatrowe są dynamicznie rozwijającą się gałęzią energetyki. Według raportu WindEurope w 2020 roku europejskie farmy wiatrowe zaspokoiły 16% europejskiego zapotrzebowania na energię elektryczną [19]. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych pięciu lat, coroczny przyrost mocy zainstalowanej farm wiatrowych w Europie osiągnie poziom 25 GW z obecnych 15 GW [19].

Energetyka wiatrowa jest uważana za czyste źródło energii z minimalnym wpływem na środowisko naturalne [3]. Literatura wskazuje, że w przeciągu najbliższych lat dotkliwie odczujemy największy problem energetyki wiatrowej jakim jest utylizacja łopat turbin wiatrowych [3]. WindEurope podaje, że w 2020 roku wyłączone z eksploatacji w Europie zostało 388 MW mocy zainstalowanej turbin wiatrowych. W latach 2021-2025 prognozowane jest wyłączenie z eksploatacji 7000 MW [19]. Sprawia to, że problem utylizacji łopat staje się coraz bardziej dotkliwy i niemożliwy do pominięcia.

Materiały kompozytowe, które są głównym komponentem łopat turbin wiatrowych, nie są łatwe w utylizacji lub recyklingu [10]. Do konstrukcji łopat turbin wiatrowych wykorzystuje się głównie kompozyty na bazie włókna szklanego oraz węglowego [1-2,7-10,13,20-22]. Obecnie łopaty turbin zakopuje się lub składuje na wysypiskach z braku lepszej alternatywy [3,10-11,20-21]. Co prawda istnieją już komercyjne rozwiązania do utylizacji bądź recyklingu łopat turbin wiatrowych jednak instalacje te są nieekonomiczne bądź końcowy produkt nie jest na tyle dobrej jakości, aby był chętnie wykorzystywany przez końcowych odbiorców [7]. W dużej mierze opłacalność funkcjonowania takich instalacji uzależniona jest od wiedzy na temat wolumenów poszczególnych materiałów kompozytowych w najbliższych latach [7]. Stąd na przestrzeni lat zostały podjęte próby stworzenia modelu, za pomocą którego można by jak najdokładniej przewidywać strumienie poszczególnych materiałów kompozytowych na przestrzeni lat [1-2,8-10,13].

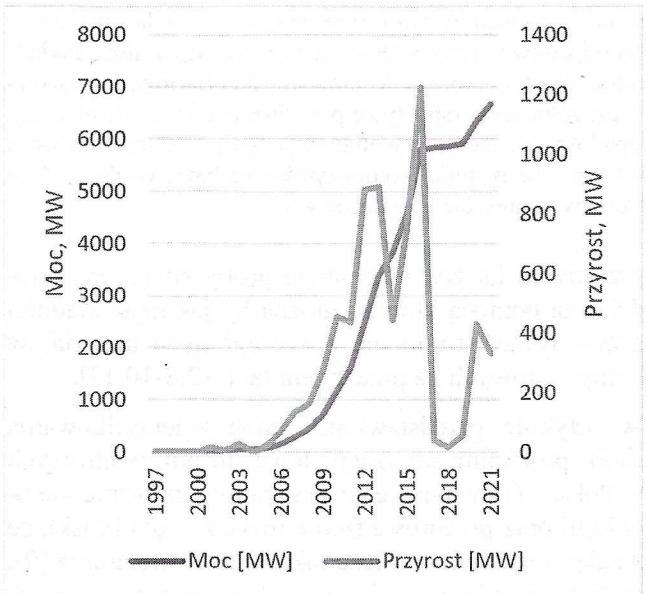
W artykule przedstawiono próbę zidentyfikowania skali problemu utylizacji łopat turbin wiatrowych w Polsce. Głównym celem jest zaproponowanie metodologii oraz przeprowadzenie rozważań dla Polski, ze względu na znikomą ilość takowych w literaturze [9]. Podjęta została próba jak najdokładniejszego oszacowania strumieni odpadów z poszczególnych materiałów kompozytowych: na bazie włókna szklanego oraz węglowego. Wyniki analiz zostały porównane z istniejącymi już szacunkami [9]. Zostały również wskazane zagadnienia, które zwyczajowo nie są uwzględniane w obliczeniach, ze względu na trudności w przełożeniu tych zjawisk na liczby bądź znikomą wiedzę na ich temat, a które w przyszłości mogą istotnie wpłynąć na rzeczywiste ilości odpadów z łopat turbin wiatrowych.

2. ENERGETYKA WIATROWA W POLSCE - CHARAKTERYSTYKA

Według danych Urzędu Regulacji Energetyki pod koniec roku 2021 łączna moc zainstalowana farm wiatrowych w Polsce osiągnęła 6680 MW [15]. Stanowi to największy odsetek spośród zainstalowanych odnawialnych źródeł energii i na początku 2021 roku odpowiadało za ok. 64% całkowitej mocy zainstalowanej OZE i ok. 13% całkowitej mocy zainstalowanej w krajowym systemie elektroenergetycznym [16-17]. Jest to znaczący udział, a znaczenie energetyki wiatrowej w najbliższych latach ma znacznie wzrosnąć w związku z planami budowy morskich farm wiatrowych [12,14,19]. Według raportu WindEurope z 2020 roku Polska zajmowała w Europie 9 miejsce pod względem łącznej mocy zainstalowanej farm wiatrowych [19]. W odniesieniu do reszty globu Polska pod

względem mocy zainstalowanej w 2020 roku plasowała się na 16 miejscu [18]. W zestawieniu mocy zainstalowanej per capita nasz kraj plasuje się dopiero na 26 miejscu. Na jednego mieszkańca przypada 164 W mocy zainstalowanej turbin wiatrowych. Jest to powyżej średniej światowej – 93 W [18].

Dynamika zmian mocy zainstalowanej farm wiatrowych w Polsce w latach 1997-2021 została przedstawiona na rys.1.



Rys. 1. Charakterystyka mocy zainstalowanej z farm wiatrowych w latach 1997 – 2021; opracowanie własne na bazie [14,16]

W ostatnich latach widoczne jest wyhamowanie wzrostu łącznej mocy zainstalowanej. Spowodowane jest to między innymi tzw. ustawą odległościową oraz nasycaniem rynku, przez co rozumiane jest zajęcie większości zdatnych terenów pod inwestycję w farmę wiatrową [4,21].

Na podstawie danych z bazy WindPower można przyjąć, że w Polsce działało na koniec roku 2021 ok. 2729 turbin wiatrowych w 295 farmach wiatrowych [14]. Średnia moc zainstalowana turbiny to 1,85 MW [14]. Dane prezentowane przez PSE wskazują na nieco wyższy poziom mocy siłowni wiatrowych od wskazanych powyżej. Na koniec roku 2021 moc zainstalowana lądowych elektrowni wiatrowych to 7306 MW.

3. SZACUNEK SKALI ZJAWISKA DLA POLSKI

3.1. Metodologia obliczeń i główne założenia

Jak wskazano we wstępie, celem artykułu jest jak najdokładniejsze oszacowanie ilości poszczególnych odpadów kompozytowych z łopat turbin wiatrowych w czasie, na podstawie dostępnych danych. Bazę rozważań stanowiły powszechnie stosowane w literaturze modele [1-2,7-10,13]. Podjęto próbę stworzenia modelu jak najlepiej oddającego Polskie realia. Największą przeszkodą w dokładnych szacunkach jest znikoma dostępność szczegółowych danych dotyczących farm wiatrowych działających w Polsce.

Konieczne jest uzupełnienie tych informacji i ich weryfikacja w zewnętrznym źródle. Posłużyła do tego niezależna baza danych WindPower [14]. Gromadzone są w niej dokładne informacje na temat jednostek wytwórczych, takie jak: lokalizacja, liczba turbin na danej farmie wiatrowej, ich producent, typ, moc zainstalowana i inne. Niestety, bezpłatny dostęp do danych jest tylko częściowy. W ramach bezpłatnego dostępu pozyskano informacje takie jak:

- moc zainstalowana od 1997 do 2020 roku,
- liczba turbin zainstalowanych w poszczególnych województwach,
- dane dotyczące farm wiatrowych takie jak: lokalizacja, liczba turbin, moc zainstalowana, producent, status oraz rok pierwszego uruchomienia,
- dane dotyczące kompletności bazy.

Mając na uwadze jakość, ilość dostępnych danych i mnogość możliwych założeń i modeli do zastosowania przedstawiono dwa scenariusze obliczeniowe.

Scenariusz 1

- wykorzystano w nim dane z URE i WindPower dotyczące mocy zainstalowanej w poszczególnych latach [14,16],
- szacunek Albers'a do obliczenia całkowitej masy odpadów z łopat [1],
- czas eksploatacji turbin wynoszący 20 lat [1-2,8-10],
- przyjęto, że awariom ulegnie 2% wszystkich zainstalowanych łopat corocznie [9],
- roczne tempo wzrostu mocy zainstalowanej turbin wiatrowych to 7% [5-6,12],
- kompozyty stanowią 93% masy całkowitej łopaty [10],
- kompozyty na bazie włókna węglowego stanowią ok. 2% całkowitej masy odpadów kompozytowych [13].

Scenariusz 2

- wykorzystano w nim dane z URE i WindPower dotyczące mocy zainstalowanej w poszczególnych latach, liczby farm wiatrowych, mocy zainstalowanej poszczególnych farm wiatrowych, liczbę turbin zainstalowaną na poszczególnych farmach oraz rok pierwszego uruchomienia farmy wiatrowej [14,16],
- obliczono dla każdej farmy, dla której jest to możliwe, średnią moc zainstalowaną pojedynczej

turbiny i dopasowano do każdej farmy odpowiednią jednostkową masę łopaty z modelu Liu i Barlow [10],

- pozostała moc zainstalowana w danym roku zostanie wykorzystana jako baza do obliczenia masy odpadów według szacunku Albers'a [1],
- czas eksploatacji turbin przyjęto na 17 lat [13],
- awariom ulegnie 2% wszystkich zainstalowanych łopat corocznie [9],
- roczne tempo wzrostu mocy zainstalowanej turbin wiatrowych to 7% [5-6,12],
- kompozyty stanowią 93% masy całkowitej łopaty [10],
- turbiny zainstalowane do 2010 r. nie mają w łopatach włókna węglowego [8], a po 2010 r. kompozyty na bazie włókna węglowego stanowią ok. 2% całkowitej masy odpadów kompozytowych [13].

Założenie co do rocznego tempa wzrostu mocy zainstalowanej turbin wiatrowych może się zdezaktualizować. W trakcie redakcji tego artykułu roczne tempo na poziomie 7% było zgodne z założeniami Polityki Energetycznej Polski do 2040 r., co do rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce [12]. W raporcie na rok 2022 przewidywania Global Wind Energy Council zostały zrewidowane na 6,6% [6]. Szacunki te nie uwzględniają wpływu agresji rosyjskiej na Ukrainę, w wyniku której roczny przyrost mocy zainstalowanej farm wiatrowych najprawdopodobniej znacznie wzrośnie. Również założenia PEP2040 zostaną poddane zmianom, a obecnie dyskutuje się nad nowelizacją tzw. „ustawy odległościowej". Na poziomie Unii Europejskiej opracowuje się nową politykę energetyczną. Wszystkie te czynniki wpłyną na rozbieżność wyników analizy przedstawionej w tym artykule z rzeczywistością.

3.2. Przebieg obliczeń i wyniki

Jako dane wejściowe do obliczeń w obydwu scenariuszach przyjęto dane o mocy zainstalowanej z URE z lat 2005 - 2021 [16], rozszerzone o dane o mocy zainstalowanej z WindPower w latach 1997 – 2004 [14]. Na tej podstawie wyznaczono przyrost mocy zainstalowanej w poszczególnych latach, który to stanowi bazę dalszych rozważań.

W scenariuszu pierwszym powyższe dane zostały przetworzone w następujący, opisany poniżej sposób. Do danego roku dodano 20 lat tak, aby wynik końcowy przedstawiał datę wyłączenia z eksploatacji danej ilości MW. Przykładowo, dla roku 2021 z eksploatacji wyłączono 17 MW mocy zainstalowanej turbin. Następnie wartość przyrostu w danym roku została pomnożona przez szacunek Albers'a, czyli 10 t/MW – jest to masa odpadów w danym roku. Zgodnie z założeniem, corocznie awarii ulegnie 2% wszystkich zainstalowanych łopat, które trzeba będzie poddać utylizacji. Wartość ta jest obliczana zgodnie ze wzorem

$$M_{awarie}(x) = 0{,}02 * [(P_{zainst.}(x) - P_{wył.}(x)) * m_{Albers}]$$

gdzie: $M_{awarie}(x)$ – masa odpadów wynikająca z awarii łopat w roku x, $P_{zainst.}(x)$ – moc zainstalowana w roku x obliczana zgodnie z założeniami, $P_{wył.}(x)$ – moc zainstalowana turbin wyłączanych z eksploatacji w roku x, m_{Albers} – masa jednostkowa odpadów z szacunków Albers'a (10 t/MW).

Do masy odpadów wynikającej z zakończenia eksploatacji dodawana jest masa odpadów wynikająca z awarii w danym roku, a następnie, zgodnie z założeniami, obliczana jest masa i strumienie poszczególnych odpadów kompozytowych zgodnie z założeniami.

Wyniki dla scenariusza 1 przedstawiono w tabeli 1, gdzie CF oznacza odpady z materiałów kompozytowych na bazie włókna węglowego, a GF oznacza odpady z materiałów kompozytowych na bazie włókna szklanego.

W scenariuszu 2 skorzystano z niezależnej bazy danych WindPower dla Polski. Znajduje się w niej 378 rekordów dotyczących farm wiatrowych, zarówno działających jak i planowanych [14]. Działające farmy wiatrowe, według bazy mają łączną moc zainstalowaną 6278 MW w roku 2021. Jest to mniej niż deklaruje URE [15]. Autor podaje, że w przypadku 98% rekordów uzupełniona jest informacja na temat mocy zainstalowanej farmy wiatrowej, a w 83% przypadków podana jest liczba turbin znajdująca się na farmie. Tylko w 63% przypadków znana jest data pierwszego uruchomienia [14]. Niestety, w trakcie obliczeń okazało się, że dane w bazie różnią się od tych deklarowanych przez URE. Zdarzało się, że występowała istotna rozbieżność pomiędzy mocą zainstalowaną w danym roku deklarowaną przez URE, a wartością znajdującą się w bazie. Rozbieżność ta może wynikać z różnej metodologii co do zbierania danych przez obie te bazy. URE kompletuje dane dotyczące farm wiatrowych posiadających koncesję na wytwarzanie energii elektrycznej. Nie jest wiadome jaką metodologię co do zbierania danych przyjął autor bazy WindPower. Występowały lata, w których według bazy WindPower, moc zainstalowana w danym roku była istotnie większa niż wynika to z danych URE. W tym artykule przyjęto dane URE jako punkt odniesienia.

Tabela 1.
Wyniki dla scenariusza 1

Rok	Masa całkowita, t	Masa kompozytu, t	Masa CF, t	Masa GF, t
2017	1189	1106	22	1084
2018	1202	1118	22	1096
2019	1183	1101	22	1079
2020	1269	1181	24	1157
2021	1503	1397	28	1369
2022	1488	1384	28	1356
2023	1824	1696	34	1662
2024	1637	1522	30	1492
2025	1999	1859	37	1822
2026	2553	2374	47	2327
2027	3331	3098	62	3036
2028	3744	3482	70	3413
2029	4976	4628	93	4536
2030	6921	6437	129	6308
2031	6902	6419	128	6290
2032	11440	10639	213	10426
2033	11758	10935	219	10717
2034	7574	7043	141	6903
2035	10777	10023	200	9822
2036	15695	14596	292	14304
2037	4348	4044	81	3963
2038	4375	4069	81	3987
2039	5033	4681	94	4587
2040	9044	8411	168	8243
2041	8432	7842	157	7685

Zastosowano następujące podejście w celu uzgodnienia danych:

- obliczono masę odpadów dla każdego roku zgodnie z założeniami i modelem Liu i Barlow,
- w latach, w których okazywało się, że baza WindPower wykazuje większą niż w bazie URE moc zainstalowaną, proporcjonalnie zmniejszano obliczoną masę odpadów według wzoru

$$m_{odp_rzecz} = m_{odp} * \frac{P_{URE}}{P_{WP}},$$

gdzie: m_{odp_rzecz} – przeskalowana masa odpadów, m_{odp} masa odpadów wyznaczona dla danego roku według modelu Liu i Barlow, P_{URE} moc zainstalowana w danym roku z danych URE, P_{WP} – moc zainstalowana w danym roku z bazy WindPower,

- pozostałą masę odpadów, wedle pozostałej mocy zainstalowanej, obliczono zgodnie z szacunkiem Albers'a.

Obliczenia przeprowadzono następująco:

- do danego roku dodano 17 lat tak, aby wynik końcowy przedstawiał datę wyłączenia z eksploatacji danej ilości MW,
- na podstawie danych z bazy WindPower oraz szacunków Liu i Barlow obliczono moc jednostkową turbiny na danej farmie, przyporządkowano odpowiednią masę jednostkową i obliczono masę odpadów i przyporządkowano do odpowiedniego roku, w którym te odpady trzeba będzie poddać utylizacji,
- następnie zastosowano opisaną powyżej metodę uzgodnienia danych i obliczono masę odpadów,
- znając łączną masę odpadów na przestrzeni lat 2014 – 2038 (81137 t) oraz wiedząc, że będzie ona pochodziła z turbin o łącznej mocy zainstalowanej 6680 MW obliczono średnią masę jednostkową odpadów (12,15 t/MW),
- zgodnie z założeniem corocznie awarii ulegnie 2% wszystkich zainstalowanych łopat, które trzeba będzie poddać utylizacji, wartość ta jest obliczana zgodnie ze wzorem

$$M_{awarie}(x) = 0{,}02 * [(P_{zainst.}(x) - P_{wył.}(x)) * m_{jedn.}]$$

gdzie: M_{awarie} (x) – masa odpadów wynikająca z awarii łopat w roku x, $P_{zainst.}(x)$ – moc zainstalowana w roku x obliczana zgodnie z założeniami, $P_{wył.}(x)$ – moc zainstalowana turbin wyłączanych z eksploatacji w roku x, m_{jedn} – obliczona powyżej masa jednostkowa odpadów (12,15 t/MW),

- do masy odpadów wynikającej z zakończenia eksploatacji dodawana jest masa odpadów wynikająca z awarii w danym roku, a następnie, zgodnie z założeniami, obliczana jest masa odpadów kompozytowych i strumienie poszczególnych odpadów kompozytowych,
- przyjęto, że łopaty turbin zainstalowanych przed 2010 nie zawierają w swojej konstrukcji włókna węglowego. Aby poprawnie oszacować masę odpadów z materiałów kompozytowych na bazie włókna węglowego w latach 2014 – 2027 bazą do obliczenia tej masy jest tylko masa wynikająca z awarii. W kolejnych latach masa odpadów na bazie włókna węglowego obliczana jest na podstawie łącznej masy odpadów wynikających z zakończenia eksploatacji i wynikającej z awarii.

Wyniki dla scenariusza 2 przedstawiono w tabeli 2.

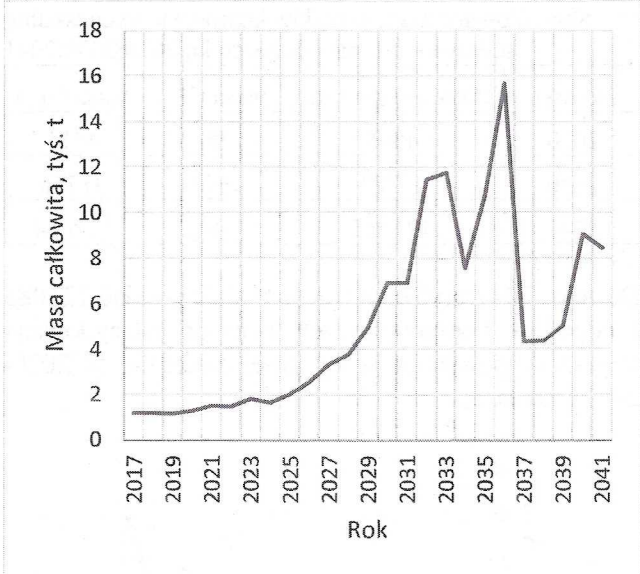
Tabela 2.
Wyniki dla scenariusza 2

Rok	Masa całkowita, t	Masa kompozytu, t	Masa CF, t	Masa GF, t
2014	948	882	17	864
2015	1142	1062	21	1042
2016	1411	1312	26	1286
2017	1421	1321	26	1295
2018	1590	1479	26	1453
2019	1516	1410	27	1383
2020	1937	1801	29	1773
2021	1623	1509	30	1479
2022	1968	1830	32	1798
2023	2759	2566	34	2532
2024	3736	3474	36	3438
2025	4159	3867	39	3829
2026	5864	5453	41	5412
2027	8042	7479	43	7435
2028	7956	7399	148	7251
2029	13211	12286	246	12040
2030	13695	12736	255	12482
2031	8394	7807	156	7651
2032	13245	12318	246	12071
2033	16343	15199	304	14895
2034	4453	4142	83	4059
2035	4391	4084	82	4002
2036	5013	4662	93	4569
2037	9787	9101	182	8919
2038	9363	8707	174	8533

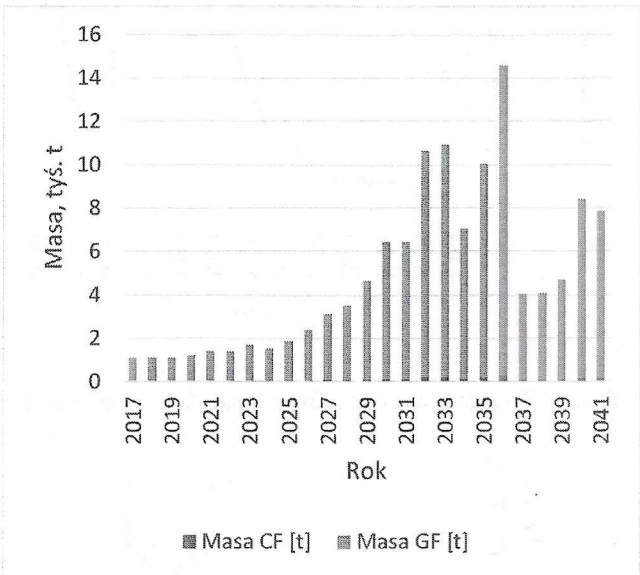
4. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wyniki obliczeń dla scenariusza 1 pokazano na rys 2.

Można zauważyć, że do roku 2025 dynamika wzrostu rocznej ilości odpadów jest znikoma. Dopiero po roku 2025 zaczyna ona gwałtownie rosnąć, aby uzyskać maksimum w roku 2036 i wartość 15695 ton. Później zauważyć można gwałtowny spadek spowodowany słabą dynamiką wzrostu mocy zainstalowanej w latach 2016-2019, zaczyna ona ponownie rosnąć w roku 2040 (rys.2).



Rys. 2. Roczna masa odpadów z łopat dla scenariusza 1



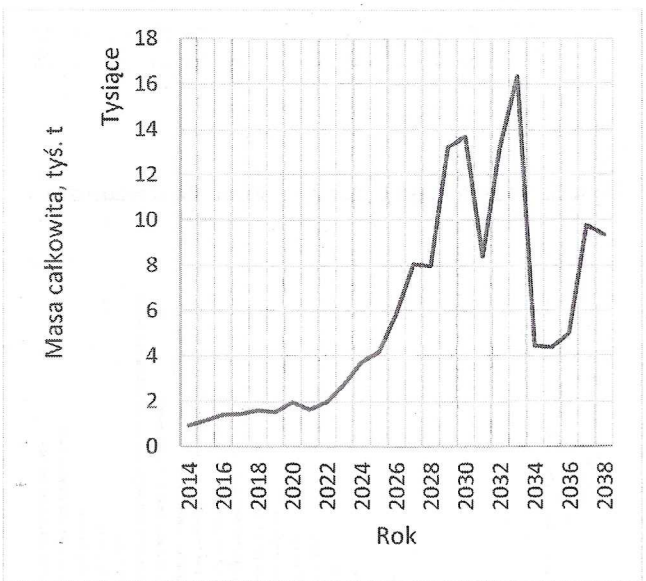
Rys. 3. Roczna masa odpadów kompozytowych dla scenariusza 1

Przeprowadzając rozróżnienie na poszczególne materiały kompozytowe, tzn. na bazie włókna szklanego (GF) i włókna węglowego (CF) można zauważyć, że dominującym problemem będzie kompozyt na bazie włókna szklanego. Największy roczny wolumen tego kompozytu wystąpi w roku 2036 i wyniesie 14304 t (rys.3).

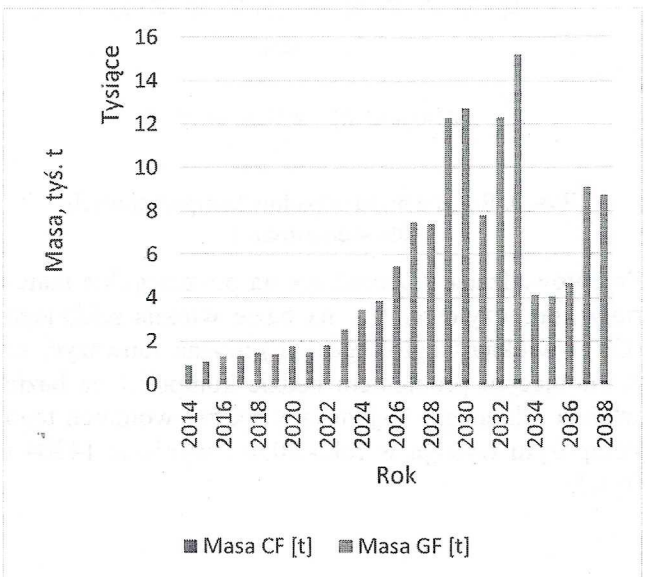
Tabela 3.
Skumulowana masa odpadów kompozytowych według scenariusza 1 sumowana do lat 2020;2030;2041

Do roku	Masa kompozytu, t	Masa CF, t	Masa GF, t
2020	4505	90	4415
2030	32383	648	31736
2041	121085	2422	118664

Do roku 2041 utylizacji trzeba będzie poddać 121085 t odpadów kompozytowych z czego zdecydowana większość powstanie w ostatniej dekadzie, tj. 2030-2040 (tabela 3).



Rys. 4. Roczna masa odpadów z łopat dla scenariusza 2



Rys. 5. Roczna masa odpadów kompozytowych dla scenariusza 2

Stwierdzić można oczywiste podobieństwo charakterystyki rocznej masy odpadów w scenariuszu 2 do scenariusza 1. Największą różnicą jest przesunięcie rozkładu o 3 lata spowodowane zastosowaniem innego założenia co do czasu eksploatacji turbin. W tym scenariuszu maksimum rocznej masy odpadów osiągnięte jest w 2033 roku i wynosi 16343 t (rys.4).

Na rys.5 można zauważyć, że zdecydowanie dominuje kompozyt na bazie włókna szklanego. Założenie co do braku włókna węglowego w łopatach turbin zainstalowanych przed 2010 rokiem niewiele wpłynęło na ostateczny stosunek masy odpadów ze względu na małą liczbę turbin zainstalowanych przed tym rokiem. Największy roczny wolumen kompozytu na bazie włókna szklanego wystąpi w 2033 roku i wyniesie 14895 t.

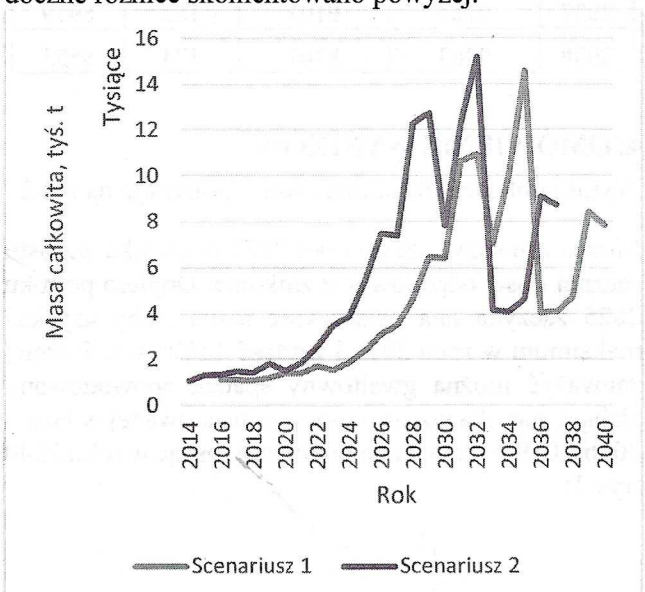
Tabela 4.
Skumulowana masa odpadów kompozytowych według scenariusza 2 sumowana do lat 2020;2030;2038

Do roku	Masa kompozytu, t	Masa CF, t	Masa GF, t
2020	9267	172	9095
2030	67868	1077	66791
2038	133888	2397	131491

Do roku 2038 utylizacji trzeba będzie poddać 133888 t odpadów kompozytowych z czego zdecydowana większość powstanie w ostatniej dekadzie, tj. 2030-2038. Jest to o 12803 t więcej niż w przypadku scenariusza 1.

4.1. Porównanie scenariuszy 1 i 2

Zestawienia wyników oszacowania masy odpadów kompozytowych z łopat turbin wiatrowych w obu rozpatrywanych scenariuszach dokonano na rys. 6. Widoczne różnice skomentowano powyżej.



Rys. 6. Porównanie całkowitej masy odpadów kompozytowych oszacowanej według obu rozpatrywanych scenariuszy

5. PORÓWNANIE Z SZACUNKAMI LICHTENEGGER'A

Warto przyjrzeć się jak uzyskane, podczas analizy w tym artykule, wyniki mają się do szacunków Lichteneggera. Podczas omawiania wyników warto mieć na uwadze dwie kluczowe kwestie:

- Lichtenegger korzystał podczas obliczeń z bazy WindPower, która ma inny rozkład mocy zainstalowanej w poszczególnych latach niż wynika z danych URE [9,16],
- Lichtenegger nie przedstawił w swojej pracy dokładnych liczb, a jedynie wykresy, na których podaje przewidywaną roczną ilość odpadów w skali Europy oraz szacunki, który kraj będzie odpowiadał jakiemu procentowi wszystkich odpadów w danym roku [9].

Zestawienie szacunków Lichteneggera oraz scenariuszy 1 i 2 pokazano w tabeli 5 [8].

Tabela 5.
Porównanie szacunków Lichteneggera z szacunkami ze scenariuszy 1 oraz 2 (opracowanie własne na bazie [8])

Rok	Masa odpadów wg Lichteneggera, t	Scenariusz 1, t	Scenariusz 2, t
2020	2700	1269	1937
2030	7500	6921	13695
2040	9675	9044	9363*
Suma	19875	17234	24995

*Dane dla roku 2038

Jak można zaobserwować, występują rozbieżności pomiędzy poszczególnymi latami. Wynika to najprawdopodobniej z innego rozkładu mocy zainstalowanej w poszczególnych latach przyjętej przez Lichteneggera oraz jego metody co do obliczania masy odpadów. Trudno jest stwierdzić czy wyniki obu tych analiz są rozbieżne, ponieważ podane zostały udziały procentowe tylko dla wybranych lat. Jak można dostrzec zsumowane wartości z tych trzech lat zaczynają się już do siebie zbliżać. Wynik ze scenariusza 1 jest mniejszy od szacunków Lichteneggera natomiast ten ze scenariusza 2 przewyższa jego szacunki. Pomiędzy Scenariuszem 2 a szacunkami Lichteneggera występuje różnica na poziomie 20%. Biorąc pod uwagę różnice w metodologii obliczeń, dokładność danych oraz porównanie ich tylko w kilku punktach różnica 20% nie wydaje się rażąca.

6. DYSKUSJA

Wszystkie założenia poczynione na potrzeby obliczeń są stosowane również u innych autorów i są ogólnie przyjętą praktyką przy analizach ilości odpadów w przypadku łopat turbin wiatrowych.

Wydłużanie czasu eksploatacji turbin jest bardzo obiecującym rozwiązaniem, jeśli chodzi o ograniczenie ilości odpadów, które mogłyby trafiać na wysypiska. Główną zaletą takiego rozwiązania jest odłożenie w czasie konieczności utylizacji odpadów co pozwala na dopracowanie metod ich potencjalnego recyklingu [11,20]. Jak wskazuje Ziegler, spowalniający postęp technologiczny w budowie turbin wiatrowych sprawia, że wydłużanie czasu ich eksploatacji staje się atrakcyjną alternatywą dla repoweringu [21]. Zdarza się również, że warunki pracy turbiny są bardziej korzystne niż pierwotnie przywidywano. Sprawia to, że turbina jest mniej zużyta i może bezpiecznie kontynuować pracę nawet po osiągnięciu wieku 20 lat [21]. Z obliczeń Zieglera dla turbin typu offshore wynika, że można przedłużyć ich bezpieczną eksploatacje o średnio 12,9 lat [22]. Istnieje jednak wiele czynników, które mogą skutecznie zatrzymać ten proces.

Pierwszym i najważniejszym jest brak metod oraz danych do szybkiego i efektywnego szacowania rzeczywistego stanu turbin. Bez tego ciężko jest podjąć właścicielom farm wiatrowych decyzję o bezpiecznym przedłużeniu eksploatacji lub wymianie turbin na nowe [21]. Kolejnym istotnym czynnikiem jest brak legislacji lub ich nieprzyjazny charakter. Jak wskazuje Ziegler obecne systemy wsparcia dla turbin wiatrowych obowiązują najczęściej tylko przez pierwsze 20 lat pracy turbiny albo obowiązywały do roku 2020 [21]. Sprawia to, że po tym czasie eksploatacja takiej farmy może być nieekonomiczna, ponieważ muszą one uczestniczyć w rynku energii. Ziegler szacuje, że wydłużanie czasu eksploatacji ma sens ekonomiczny wyłącznie wtedy, gdy ceny energii elektrycznej nie są niższe niż 3 eurocenty/kWh [21]. Wskazuje również, że nie istnieją mechanizmy co do przewidywania przyszłych cen energii. Nie ma również dokładnych wytycznych co do tego jakie kroki powinien podjąć właściciel, aby móc, w świetle prawa, kontynuować pracę turbin powyżej 20 lat. Także konieczność zdobywania pozwoleń, przedłużania dzierżawy terenu i przyłączy energetycznych i zdobywanie ponownej akceptacji lokalnej społeczności może utrudnić lub uniemożliwić funkcjonowanie tego mechanizmu [3,21].

Kolejnym czynnikiem mogącym wpłynąć na ilość odpadów jest repowering, czyli wymiana jednostek na danej farmie na nowsze, przed końcowym czasem życia starych jednostek. Jest to działanie przeciwne do wydłużania czasu eksploatacji. W literaturze brak jest jednoznacznych wskazań, czy jest to opłacalne [21]. Jako podstawowe trudności wskazuje się brak legislacji oraz konieczność zdobywania nowych pozwoleń [19,21]. W Polsce działanie utrudnia również Art. 4 ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych z dnia 20.05.2016 (tzw. ustawa odległościowa), która reguluje minimalną odległość w jakiej musi

znajdować się turbina wiatrowa od zabudowań mieszkalnych [4]. Nowe turbiny są z reguły wyższe i mają większy potencjał produkcyjny [10]. Może okazać się niemożliwym zamontowanie większych turbin ze względu na wspomniane ograniczenia. Konieczna byłaby wtedy zmiana ustawienia turbin z czym wiążą się koszty w postaci nowych pomiarów wiatru, przesuwania kabli i przyłącz etc. [21].

7. PODSUMOWANIE

W artykule wskazano na istotny problem energetyki wiatrowej jakim jest utylizacja łopat turbin wiatrowych po zakończeniu ich eksploatacji [3]. Problem ten wynika głównie z zastosowania materiałów kompozytowych do budowy łopat, które są trudne w recyklingu i utylizacji.

Na podstawie powszechnych w literaturze modeli [1-2,8-10,13] zostały przeprowadzone szacunki dla Polski w dwóch scenariuszach obliczeniowych. Pierwszy scenariusz charakteryzuje się bardziej ogólnym podejściem, opierając się tylko na rozkładzie mocy zainstalowanej na przestrzeni lat i podstawowych założeniach wykorzystywanych przez innych autorów [1-2,5,8-10,12-14,16]. Drugi scenariusz opiera się na nieco dokładniejszym modelu ilościowym stworzonym przez Liu i Barlow [10]. Uwzględnia on również najnowsze szacunki co do czasu eksploatacji turbiny wiatrowej [13] i wprowadza kilka uściśleń względem scenariusza pierwszego. Jak przedstawiono w tabelach 3 i 4 dotyczących skumulowanych mas odpadów z poszczególnych materiałów kompozytowych dominującym odpadem będzie ten na bazie włókna szklanego. Według scenariusza 1 do 2041 roku możemy spodziewać się około 121 tysięcy ton tego odpadu, a według scenariusza 2 do 2038 roku około 134 tysiące ton. Są to znaczne ilości materiału, które trzeba będzie poddać utylizacji. Według przewidywań ilości odpadów powinny być w Polsce znikome do 2025 – 2028 roku (w zależności od scenariusza), aby potem zacząć gwałtownie rosnąć. Pozostawia to niewielkie okno czasowe, aby znaleźć rozwiązanie problemu utylizacji i recyklingu kompozytu na bazie włókna szklanego [20].

LITERATURA

[1] Albers, H.: Recycling of wind turbine rotor blades – fact or fiction? DEWI Mag. 2009, Nr. 34, str. 32-41

[2] Andersen, N., Eriksson, O., Hillman, K., Wallhagen, M.: Wind Turbines' End-of- Life: Quantification and Characterisation of future waste materials on a national level. Energies 2016, Nr. 9 (12), 999. https://doi.org/10.3390/en9120999

[3] Andersen, P.D., Bonou, A., Beauson, J., Brønsted, P.: Recycling of wind turbines. DTU Int. Energy Rep. 2014, str. 91–98., https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052458531&origin=inward#metrics

[4] Art. 4 ustawy z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych (Dz. U. z 2016 r. poz. 961)

[5] Badyda K., Kaproń H.: „Eksploatacja i rozwój energetyki wiatrowej w Polsce". Rynek Energii 2013, Nr. 3, str. 61-67

[6] Global Wind Energy Council: Global Wind Report 2022, https://gwec.net/global-wind-report-2022/, (dostęp: 20.02.2022)

[7] Larsen, K.: Recycling wind turbine blades. Renew. Energy Focus, 2009, Nr. 9 (7), str. 70–73. https://doi.org/10.1016/S1755-0084(09)70045-6

[8] Lefeuvre, A., Garnier, S., Jacquemin, L., Pillain, B., Sonnemann, G.: Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. Resour. Conserv. Recycl. 2019, Nr. 141, str. 30–39. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.008

[9] Lichtenegger, G., Rentizelas, A.A., Trivyza, N., Siegl, S.: Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. Waste Manag. 2020, Nr. 106, str. 120–131. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.018

[10] Liu, P., Barlow, C.Y.: Wind turbine blade waste in 2050. Waste Manag. 2017, Nr. 62, str. 229–240. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007

[11] Liu, P., Meng, F., Barlow, C: Wind turbine blade end-of-life options: an eco-audit comparison. J. Clean. Prod. 2019, Nr. 212, str. 1268–1281. https://doi.org/10.1016/j. jclepro.2018.12.043

[12] Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r., (M.P. z 2021 r. poz. 264)

[13] Sommer, V., Stockschläder, J., Walther, G.: Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union. Waste Manag. 2020, Nr. 115, str. 83-94. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.043

[14] The WindPower, https://www.thewindpower.net/country_windfarms_en_27_poland.php, (dostęp: 19.01.2022)
[15] Urząd Regulacji Energetyki, Instalacje odnawialnych źródeł energii stan na 30 czerwca 2021 r., https://www.ure.gov.pl/pl/oze/potencjal-krajowy-oze/8108,Instalacje-odnawialnych-zrodel-energii-stan-na-30-czerwca-2021-r.html, (dostęp: 19.01.2022)
[16] Urząd Regulacji Energetyki, Moc zainstalowana MW stan na 31.12.2020, https://www.ure.gov.pl/pl/oze/potencjal-krajowy-oze/5753,Moc-zainstalowana-MW.html, (dostęp: 19.01.2022)
[17] Urząd Regulacji Energetyki, Charakterystyka Rynku https://ure.gov.pl/pl/energia-elektryczna/charakterystyka-rynku/9659,2020.html, (dostęp: 19.01.2022)
[18] Wikipedia, Wind power by country, https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_by_country, (dostęp: 20.01.2022)
[19] WindEurope, Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025,https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/, (dostęp: 19.01.2022)
[20] Wronka, K.: Recykling zużytych łopat turbin wiatrowych - skala zjawiska dla Polski oraz przegląd rozwiązań, Politechnika Warszawska, 2022 https://apd.usos.pw.edu.pl/diplomas/52105/
[21] Ziegler, L., Gonzalez, E., Rubert, T., Smolka, U., Melero, J.J.: Lifetime extension of onshore wind turbines: a review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, Nr. 82, str. 1261–1271. https://doi.org/10.1016/j. rser.2017.09.100
[22] Ziegler, L., Muskulus, M., Lifetime extension of offshore wind monopolies: Assessment proces and relevance of fatigue crack inspection. EAWE PhD Seminar on Wind Energy in Europe, Denmark2016.

RECYCLING OF WASTE TURBINE'S BLADES – SCOPE FOR POLAND

Key words: wind energy, wind turbine blade waste, waste quantification

Summary. In this paper attempt was made to calculate amount of waste generated from wind turbine blades in Poland. Based on existing knowledge an attempt was made to devise a model best suited for Poland. Calculations were made for two scenarios which differed in methodology and assumptions. First scenario was based on a distribution of installed capacity of wind turbines over the years from 1997 to 2021 and simple quantitative model to estimate the distribution of blade waste. Second scenario based on more detailed data regarding wind farms in Poland and more developed quantitative model by Liu and Barlow. Topics, often omitted in other calculations, were discussed, especially turbine lifetime extension which can greatly impact amount of blade waste in the future. Specific annual amounts of glass fibre reinforced plastics and carbon fibre reinforced plastics were calculated to year 2040. Glass fibre reinforced plastics were highlighted as the most dominant waste material. Calculations were compared with existing literature.

Kacper Wronka, inż., absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, członek Koła Naukowego Energetyków. kacper.wronka@icloud.com

Krzysztof Badyda, profesor zwyczajny na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Autor i współautor ponad 250 prac opublikowanych drukiem w monografiach, czasopismach naukowych i technicznych oraz materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych. E-mail: krzysztof.badyda@pw.edu.pl.