

Grzegorz Wągrowski, Andrzej Żarczyński, Marcin Zaborowski

„Grzegorz Wągrowski” 197588@edu.p.lodz.pl; andrzej.zarczynski@p.lodz.pl; marcin.zaborowski@p.lodz.pl
Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

Monitoring produkcji energii elektrycznej w przykładowej farmie wiatrowej na terenie województwa łódzkiego

Wstęp

Rozwój cywilizacji powoduje coraz większe zapotrzebowanie ludności na energię, wyczerpywanie się jej tradycyjnych źródeł w postaci paliw kopalnych oraz wzrost zanieczyszczenia środowiska. Problemy te zwiększają zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE), tj. siły wiatru [1-7], nurtu wody [8, 9], geotermii [10, 11], promieniowania słonecznego [12-14], biopaliw [15-17] oraz biomasy [18-22]. OZE faktycznie stanowią nieograniczone zasoby czystej energii pochodzące z naturalnych procesów przyrodniczych, które w porównaniu do nieodnawialnych źródeł energii są bardzo przyjazne dla środowiska naturalnego [22-25].

W społeczeństwie w przypadku energii wiatrowej, oprócz korzyści dostrzegane są mankamenty tego źródła energii, w praktyce zależnego od siły wiatru, czyli niestabilnego w czasie. Poza tym turbiny wiatrowe w większości generują hałas, zwłaszcza dokuczliwy przy usytuowaniu ich w pobliżu osiedli ludzkich. Ponadto energetyka wiatrowa powoduje zmiany w krajobrazie, uciążliwości zdrowotne dla ludzi, zagrożenia dla awifauny, a także obniża atrakcyjność rekreacyjną oraz wartość materialną danego terenu [5, 26-29].

Głównymi celami polskiej polityki energetycznej dla stałego i zrównoważonego rozwoju tego sektora jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju, zwiększenie konkurencyjności i efektywności energetycznej oraz ograniczenie oddziaływania na środowisko. Zakłada się zwiększenie udziału energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii do 15% do roku 2020. Takie wytyczne mają za zadanie przeciwdziałać zmianom klimatycznym, zmniejszać emisje gazów cieplarnianych oraz obniżyć emisję zanieczyszczeń do powietrza, wody i gleby [1, 3, 4, 6, 30]. Jedną z dróg prowadzących do osiągnięcia tego celu jest rozwój energetyki wiatrowej [1-4, 24, 30-32], niestety zahamowany zwłaszcza ustawą z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych [33].

Przedmiot i Metody Badawcze

Charakterystyka środowiska badanych turbin wiatrowych

Przedmiotem badań były turbiny farmy wiatrowej znajdującej się na terenie wiejskim w zachodniej części województwa łódzkiego¹. Badana farma składała się z siłowni wiatrowych produkcji firmy Enercon GmbH, posadowionych



Fot. 1. Przedmiot badań – turbiny o mocy po 0,5 MW produkcji firmy Enercon GmbH (fot. G. Wągrowski)

¹ Autorzy publikacji uprzejmie dziękują Właścicielowi farmy wiatrowej, który prosił o anonimowość, za umożliwienie wykonania badań na jej terenie Panu Grzegorzowi Wągrowskiemu w ramach realizacji pracy dyplomowej inżynierskiej, a także za zgodę na opublikowanie uzyskanych wyników w czasopiśmie Eliksir.



na dwóch działkach rolnych. Na południe od elektrowni wiatrowej w odległości około 680 m zlokalizowana jest luźna zabudowa wiejska, podobnie jak i w kierunku północnym, ale w odległości 1200 m. Na wschód od farmy znajduje się jedna zagroda wiejska w odległości około 320 m. Zabudowy te przedziela pas gruntów rolnych oraz zadrzewienia znajdujące się na sąsiednich działkach. Z kolei w kierunku południowo-wschodnim znajdują się tereny leśne. Omawiany teren położony jest na obszarze wzniesień polodowcowych na wysokości około 185 m n.p.m. Otwartość terenu, jego lekkie pofałdowanie, brak przeszkód terenowych oraz niewielki współczynnik aerodynamicznej szorstkości powierzchni pozytywnie wpływają na warunki pracy elektrowni wiatrowej. Fauna ograniczona jest praktycznie do awifauny, która ma w większości miejsca lęgowe na terenie Parku Krajobrazowego Międzyrzecza Warty i Widawki, znacznie oddalonego od badanej farmy wiatrowej.

Specyfikacja techniczna turbin wiatrowych firmy Enercon GmbH

Analizowana farma wiatrowa składa się z 4 turbin produkcji firmy Enercon GmbH, z których 3 turbiny wiatrowe posiadają moc znamionową po 0,5 MW, zaś czwarta jest od nich większa i ma moc 2 MW (fot. 1, tabela 1). Turbiny te posiadają pierścieniowy generator prądu przemiennego, który sprzęgnięty jest bezpośrednio z wirnikiem, a takie połączenie nie wymaga instalacji stacji przekładniowej. Wirnik składa się z 3 łopat wykonanych z żywic epoksydowych. W piaście wirnika umieszczony jest silnik, który pozwala na ustawienie odpowiedniego kąta nachylenia łopat. Gondola jako całość ma możliwość obracania się w kierunku wiatru, wyposażona jest bowiem w silniki służące do jej obrotu. Ustawianie łopat oraz odpowiednie zorientowanie

gondoli względem wiatru jest determinowane przez układ mikroprocesorowy, który uwzględnia dane z anemometru (wiatromierza). W gondoli znajdują się również specjalistyczne mechanizmy, jak układ hamulcowy, łożyska oraz liczne elementy elektroniczne.

Firma Enercon GmbH posiada zakłady produkcyjne w Niemczech oraz jeden na terenie Polski (Opole). Turbiny wiatrowe tej firmy są powszechnie użytkowane na całym świecie, dlatego ich działy serwisowe możemy znaleźć m.in. w Argentynie, Kanadzie, Polsce, Republice Południowej Afryki czy na Tajwanie. Głównymi producentami turbin wiatrowych na świecie w 2015 r. były firmy z poniższymi udziałami na rynku energetyki wiatrowej: Vestas (Dania) – 12,3%, Siemens (Niemcy) – 9,9%, GE (Stany Zjednoczone) – 9,1%, GoldWind (Chiny) – 9% oraz Enercon GmbH (Niemcy) – 7,8% [32].

Cel i zakres pracy

Celem pracy była analiza warunków funkcjonowania grupy turbin energetycznych znajdujących się w badanej farmie wiatrowej, następnie zebranie wyników technologicznych z dwóch wybranych siłowni należących do tej farmy, a dotyczących parametrów ich pracy i efektywności energetycznej. Badaniami objęto dwie turbiny wiatrowe ENERCON E-40 o mocy znamionowej po 0,5 MW. Analizowano pracę obu turbin pod względem efektywności energetycznej oraz innych parametrów związanych z produkcją energii elektrycznej w latach 2016-2017.

Wyniki i Dyskusja

Porównano dane technologiczne turbin, które oznaczono numerami 1 i 2, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2 oraz na rys 1-6.

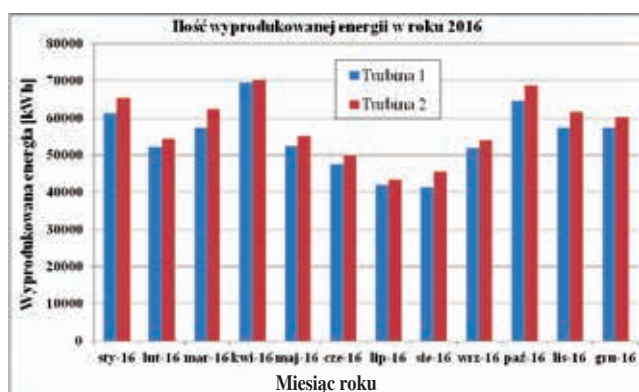
Tabela 1. Specyfikacja techniczna turbin wiatrowych [32, 34, 35]

Parametry techniczne badanych turbin wiatrowych	Enercon E-40 (trzy turbiny)	Enercon E-82 (jedna turbina)
Moc turbiny [kW]	500	2000
Średnica wirnika [m]	40,3	82
Liczba łopat	3	3
Wysokość wieży [m]	65	94
Wysokość całkowita [m]	85	135
Znamionowa prędkość wiatru [m/s]	12	13
Zakres prędkości wiatru [m/s]	2,5 do 25	2 do 28
Zakres prędkości obrotowej [obr/min]	6 do 38	6 do 18
Powierzchnia rotora [m ²]	1,275	5,281
Maksymalny poziom mocy akustycznej [dBA]	100,8	100,4

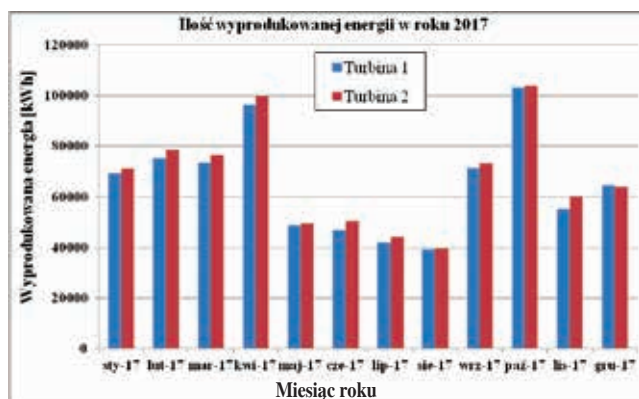
Wyniki produkcji energii przez badane turbiny wiatrowe

Tabela 2. Porównanie rocznej produkcji energii elektrycznej obydwu badanych turbin wiatrowych [32]

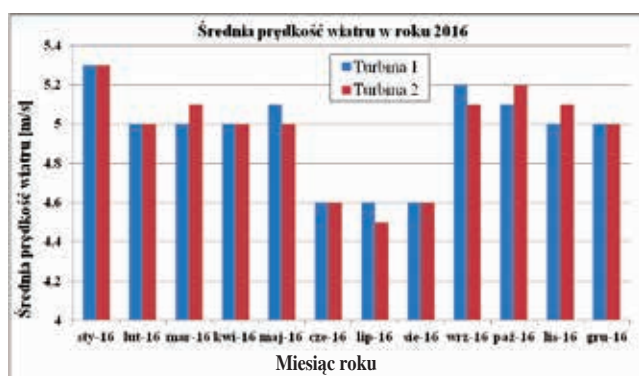
Okres czasu	Numer turbiny	Średnia prędkość wiatru [m/s]	Ilość wyprodukowanej energii [kWh]	Liczba godzin pracy turbiny [h]	Wydajność [%]
Rok 2016	1	4,96	654 839	6 965	79,51
	2	4,96	691 194	7 036	80,31
Rok 2017	1	5,43	786 295	7 171	81,86
	2	5,38	830 874	7 242	82,67



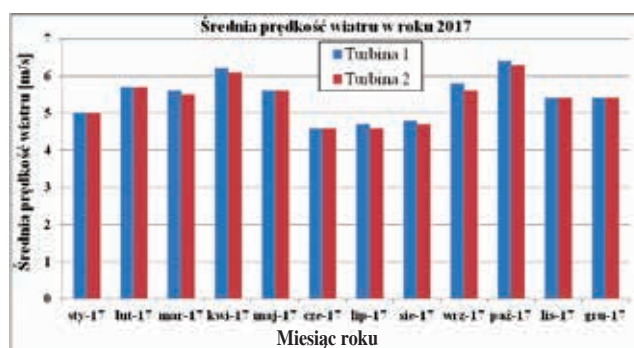
Rys. 1. Energia wyprodukowana w poszczególnych miesiącach 2016 roku przez dwie turbiny o mocy 0,5 MW każda



Rys. 2. Ilość wyprodukowanej energii w poszczególnych miesiącach 2017 roku przez dwie turbiny o mocy 0,5 MW każda



Rys. 3. Średnia prędkość wiatru w poszczególnych miesiącach 2016 roku



Rys. 4. Średnia prędkość wiatru w poszczególnych miesiącach 2017 roku

Dyskusja wyników

Dane zamieszczone na rys. 1 i 2 wykazały, jak zmienna w czasie była produkcja energii elektrycznej przez badane turbiny. Z kolei na rys. 3 i 4 przedstawiono średnią prędkość wiatru w poszczególnych miesiącach lat 2016 i 2017. W roku 2016 turbina 1 wyprodukowała 654 839 kWh energii, zaś turbina 2 – 691 194 kWh, różnica w ilości wytworzonej energii wynosiła więc 36 355 kWh, a średnia prędkość wiatru przez cały ten rok przyjęła wartość 4,96 m/s. Rok 2017 był o wiele bardziej efektywny, produkcja turbiny 1 to 786 295 kWh energii, a turbiny 2 – 830 874 kWh, różnica w ilości wyprodukowanej energii wyniosła 44 579 kWh. Średnia prędkość wiatru była wyższa niż w roku poprzednim i wynosiła około 5,4 m/s, co przyczyniło się do większej produkcji energii [32]. Wyniki z dwóch lat wskazują, że turbina 2 pracowała z lepszą skutecznością od turbiny 1. Patrząc na miesięczną produkcję energii elektrycznej stwierdzono, że zmieniała się ona dość znacznie. Najwięcej energii turbiny wygenerowały w październiku oraz kwietniu roku 2017 (max 103 846 kWh), gdy średnie prędkości miesięczne wiatru były największe i wynosiły nawet 6,3 m/s (rys. 4), pod tym względem również okres zimowy wypadł korzystnie. Miesiące letnie czyli czerwiec, lipiec i sierpień były okresem znacznie mniej efektywnym dla energetyki wiatrowej. Średnia prędkość wiatru była wtedy znacznie niższa od



notowanej w innych miesiącach, utrzymywała się bowiem na poziomie 4,5 m/s, czego skutkiem były skromniejsza produkcja energii mieszcząca się w zakresie 40 000-50 000 kWh, czyli ponad dwa razy niższa od uzyskanej w kwietniu i październiku [32].

Innym parametrem decydującym o produkcji energii elektrycznej, który był na bieżąco monitorowany, była liczba godzin pracy turbiny. Im więcej godzin pracowała turbina, tym więcej energii wyprodukowała. Analizowane turbiny wiatrowe pracowały w zakresie prędkości wiatru od 2,5 do 25 m/s. W pracy [32] podano maksymalne prędkości wiatru zarejestrowane przez anemometr. W niektórych miesiącach prędkości wiatru przekraczały 25 m/s, ale również prędkość 2,5 m/s nie zawsze była uzyskiwana.

System komputerowy farmy co pewien czas resetował się i wprowadzał aktualizacje, a turbina w tym czasie była wyłączana. Turbina wiatrowa to instalacja, w której także występują awarie, podczas których system automatycznie wyłącza jej pracę. Wyżej wymienione przyczyny negatywnie wpływały na liczbę godzin pracy turbiny, aby lepiej to zobrazować obliczono wydajność turbin rozumianą jako stosunek liczby godzin pracy turbiny do maksymalnego czasu, w którym mogłaby ona pracować.

Największe wydajności turbiny uzyskiwały w okresie zimowym, zaś najniższe w okresie letnim, co głównie spowodowane było niską prędkością wiatru w tych okresach i miało znaczący wpływ na ilość produkowanej energii. Średnie wydajności turbin wiatrowych utrzymywały się na poziomie 80% rocznie [32].

Ostatnim parametrem przedstawionym w publikacji jest średnia liczba obrotów na minutę wirnika. Na rys. 5 i 6 pokazano stosunek tego parametru do ilości wyprodukowanej energii w poszczególnych miesiącach dla obu turbin w latach 2016-2017. Stwierdzono, że im większa była liczba obrotów wirnika na minutę, tym więcej turbina wyprodukowała energii. Stosunki tych dwóch parametrów nie są zbieżne, bowiem nie zmieniają się w takim samym stopniu z miesiąca na miesiąc.

Podsumowanie

Wyniki rozpoznania literaturowego oraz pomiary technologiczne parametrów pracy i efektywności produkcji energii elektrycznej przez dwie turbiny wiatrowe, pochodzące z firmy Enercon GmbH o mocy znamionowej po 0,5 MW każda, pozwoliły sformułować kilka wniosków.

Energetyka wiatrowa przez ostatnie 20 lat była najbardziej dynamicznie rozwijającą się gałęzią OZE w Polsce. Bez dalszego wzrostu jej skali prawdopodobnie nie będzie możliwe spełnienie wymagań stawianych Polsce w pakiecie

energetyczno-klimatycznym Unii Europejskiej (pakiet 3 x 20), który zakłada trzy cele, tj. ograniczenie o 20% emisji gazów cieplarnianych w stosunku do poziomu z 1990 r., 20% udział energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii w UE oraz zwiększenie o 20% efektywności energetycznej [1, 25, 30, 32]. W Polsce skutek zmian prawnych energetyka wiatrowa od 2016 roku jest fazy stagnacji [33], ale w perspektywie długoterminowej można oczekiwać jej ponownego rozwoju, w tym w województwie łódzkim.

Głównymi oddziaływaniami na środowisko, które niesie energetyka wiatrowa są: emisja hałasu i infradźwięków, efekt migotania cieni, pole elektromagnetyczne, negatywny wpływ na krajobraz oraz zagrożenia dla awifauny.

Negatywna opinia o energetyce wiatrowej spowodowana jest głównie brakiem wystarczającej o niej wiedzy w społeczeństwie. Wiele osób powołuje się na badania sprzed kilkunastu lat, kiedy to turbiny były instalowane bez analizy ich wpływu na otoczenie, co nie ma miejsca obecnie. W ostatnich latach nastąpił duży postęp techniczny, który skutecznie zniwelował większość negatywnych skutków pracy instalacji wiatrowych.

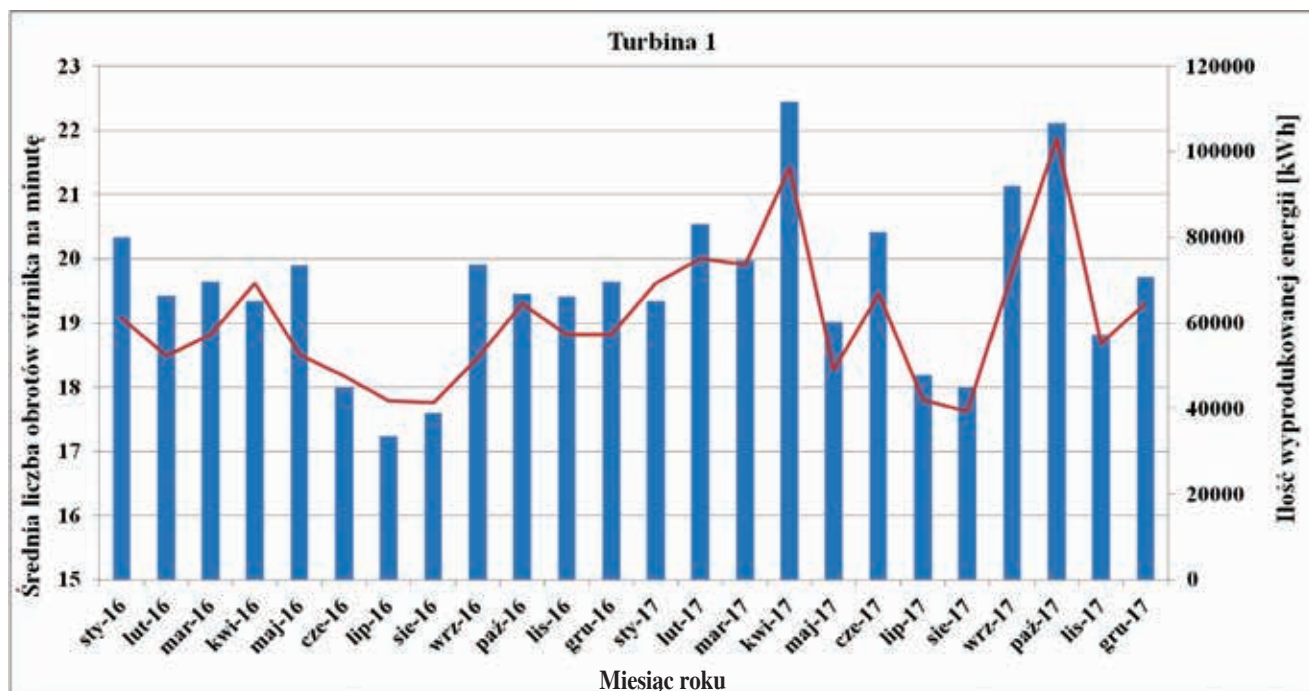
Obydwie badane turbiny wiatrowe pracowały z porównywalną wydajnością na poziomie 80% w latach 2016-2017. Turbina 2 wyprodukowała w tym okresie około 80 000 kWh energii więcej niż turbina 1.

Produkcja energii elektrycznej była największa w kwietniu oraz październiku, zaś najmniejsza w okresie letnim, co głównie zależało od prędkości wiatru.

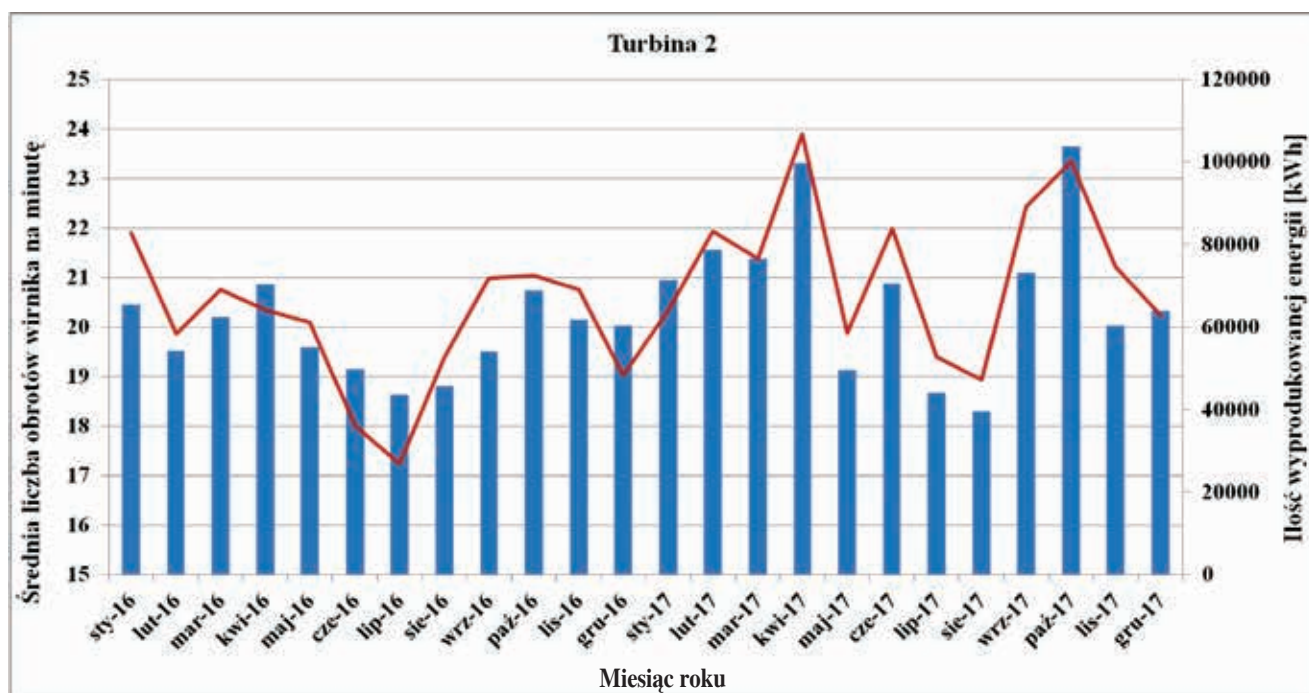
Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej w jednostce czasu była powiązana ze średnią liczbą obrotów wirnika oraz liczbą godzin pracy turbin wiatrowych, w dużym stopniu zależnych od prędkości wiatru.

Literatura

- [1] Wiśniewski G., Michałowska-Knapp K., 2010, Wizja rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce do 2020 r., *Czysta Energia*, 4, 24-28.
- [2] Ciechanowicz W., Szczukowski S., 2008, Energia wiatrów w integracji z ogniwami paliwowymi, *Aura*, 8, 8-10.
- [3] Mroczek B., Kurpas D., Klera M., 2013, Sustainable Development and Wind Farms, *Problemy Ekorozwoju/Problems of Sustainable Development*, 8(2), 113-122.
- [4] Jarzyna W., Pawłowski A., Viktorovich N., 2014, Technological development of wind energy and compliance with the requirements for sustainable development, *Problemy Ekorozwoju – Problems of Sustainable Development*, 9(1), 167-177.
- [5] Van den Berg G. P., 2004, Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, *Journal of Sound and Vibration*, 277(4-5), 955-970.
- [6] Żarczyński A., Niedbalska M., Zaborowski M., 2016, Ocena efektywności energetycznej dwóch turbin wiatrowych firmy Vensys, *Eliksir*, 2(4), 27-31.
- [7] Witowski A., 2016, Wielka Brytania inwestuje w energetykę wiatrową, *Przem. Chem.*, 95(9), 1670.
- [8] Grela J., 2012, O kierunku przebudowy gospodarki wodnej w Polsce, *Aura*, 11, 7-9.
- [9] Góralczyk I., Tytko R., 2017, Energetyka wodna (1), *Aura*, 6, 16-20.



Rys. 5. Zależność ilości wytworzonej energii przez turbinę 1 w latach 2016-2017 w funkcji średniej minutowej liczby obrotów wirnika



Rys. 6. Zależność ilości wytworzonej energii przez turbinę 2 w latach 2016-2017 w funkcji średniej minutowej liczby obrotów wirnika

[10] Żylicz T., 2017, Geotermia, Aura, 10, 20.

[11] Góralczyk I., Tytko R., Miłek M., 2017, Walka ze smogiem – ogrzewanie wodami geotermalnymi, Aura, 4, 5-8.

[12] Pietruszko S., 2018, Rynek fotowoltaiki w Polsce – 2017 r., Magazyn Fotowoltaika, 1, 6-11.

[13] Roger A., Messenger H., Amir A., Photovoltaic Systems Engineering, Fourth Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York 2017.

[14] Góralczyk I., Tytko R., 2015, Odnawialne źródła energii. Dobór parametrów instalacji fotowoltaicznych, Aura, 3, 27-29.

[15] Górski M., 2006, Biopaliwa w normach ISO, EN i PN, Przem. Chem., 85(12), 1632-1640.

[16] Prusek A., Tytko R., 2018, Odnawialne źródła energii. Biopaliwa, Aura, 10, 21-23.

[17] Sadek R., Chałupka K., Bawolak K., Dzwigaj S., 2015, Produkcja biodiesla w procesie transestryfikacji wyższych kwasów tłuszczowych zawartych w olejach roślinnych, Eliksir, 1, 23-25.

[18] Kowalska A., 2017, Charakterystyka roślin energetycznych jako potencjalnego surowca do produkcji biogazu, Eliksir, 1(5), 11-15.



- [19] Klemba K., 2015, Biogazownia jako potencjalne źródło zagrożeń emisjami odorowymi oraz działania prewencyjne, *Eliksir*, 2, 22-27.
- [20] Rosiak K., Klemba K., Żarczyński A., 2016, Technologie otrzymywania biometanu z biogazu, *Aura*, 1, 14-17.
- [21] Smolarek T., 2016, Kalkulator biogazowy jako użyteczne narzędzie do obliczeń wskaźników pracy biogazowni, *Eliksir*, 1(3), 52-55.
- [22] Kociołek-Belawejder E., Wilk Ł., 2011, Przegląd metod usuwania siarkowodoru z biogazu, *Przem. Chem.*, 90(3), 389-397.
- [23] Kardasz P., Bentkowska M., Błasiński T., Cieńciała M., Doscocz J., Haller P., Magdziak-Tokłowicz M., 2014, Stan odnawialnych źródeł energii w Polsce, *Aura*, 8, 8-11.
- [24] Praca zbiorowa, Mikołajuk H., Berent-Kowalska G., (red. kierujący), *Energia ze źródeł odnawialnych w 2016 roku*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2017, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2016-roku,3,11.html> [dostęp 23.10.2018].
- [25] Stefaniak A., 2017, Odnawialne źródła energii jako perspektywa rozwoju polskich regionów, *Aura*, 1, 16-17.
- [26] Pedersen E., Wayne K., 2007, Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments, *Occupational and Environmental Medicine*, 64(7), 480-486.
- [27] Wuczyński A., Chylarecki P., Tryjanowski P., 2009, Ptaki a rozwój

- energetyki wiatrowej – aktualne problemy, *Chrońmy Przyrodę Ojczystą*, 65(5), 323-328.
- [28] Shephard D., Mc Bridge D., Welch D., Dirks K.N., Hill E.M., 2011, Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life, *Noise Health*, 13(54), 333-339.
- [29] Mitera M., 2018, Wpływ fal akustycznych o małych częstotliwościach na atrakcyjność terenów rekreacyjnych, *Aura*, 9, 3-5.
- [30] Projekt Polityki energetycznej Polski do 2050 roku, Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, sierpień 2015.
- [31] Chmielowiec K., Firlić A., Piątek K., 2012, Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce. Część I. Efektywność produkcji energii elektrycznej, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 80(2), 14-17.
- [32] Wągrowski G., Praca dyplomowa inżynierska, IChOiE, Politechnika Łódzka, Łódź 2018.
- [33] Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, *Dz. U.* 2016, poz. 961.
- [34] Portal wind-turbine-models, Enercon E-40/5.40, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/67-enercon-e-40-5.40>, dostęp 07.11.2018.
- [35] Portal wind-turbine-models, Enercon E-82 E2 2.000, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/835-enercon-e-82-e2-2.000>, dostęp 07.11.2018. ●

Joanna Chudzik

joanna.chudzik@edu.p.lodz.pl

Instytut Technologii Polimerów i Barwników, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

Nanodrutki metaliczne – rozmiar ma znaczenie

Wstęp

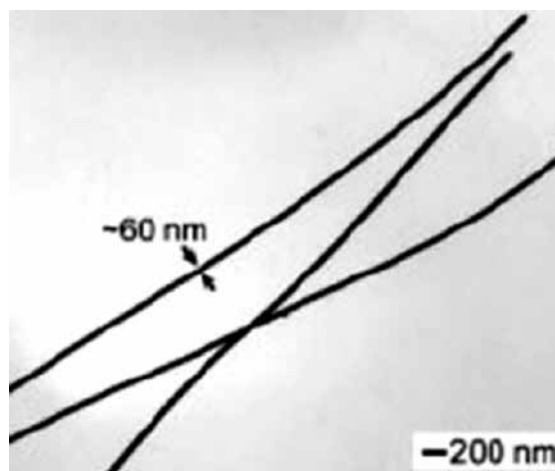
Najbardziej ogólna definicja nanostruktur opisuje je jako struktury, których przynajmniej jeden wymiar jest mniejszy od 100 nm. Idąc za tym duża powierzchnia granic rozdziału ma wpływ na reaktywność, aglomerację oraz dyfuzję, będące głównymi cechami charakterystycznymi nanostruktur. Oczywiście o określeniu materiału przedrostkiem nano nie decyduje jedynie rozmiar cząstek. Dużo ważniejszymi cechami są tutaj wymienione wcześniej aglomeracja, reaktywność oraz duża powierzchnia właściwa, mająca wpływ na takie parametry jak twardość, energia układu oraz wytrzymałość (np. wytrzymałość na rozciąganie).

Same nanodrutki (ang. Nanowires, w skrócie oznaczane jako NWS) definiuje się jako struktury, w których średnica jest rzędu nanometrów. W odróżnieniu od nanorurek, nie są one puste w środku. Jeden wymiar, jakim jest w tym przypadku długość, jest z kolei nieograniczony. W praktyce, typowe nanodrutki posiadają współczynnik kształtu, tj. stosunek długości do szerokości wielkości 100 lub więcej. Biorąc to wszystko pod uwagę można określić nanodrutki mianem nanomateriałów jednowymiarowych.

Klasyfikacja

Nanodrutki można klasyfikować biorąc pod uwagę wiele

różnych właściwości. Najprostszym podziałem jest ten, odwołujący się do właściwości przewodzących, na nanodrutki metaliczne (np. Au, Ag, Ni, Pt, Cu), półprzewodzące (jak InP, GaN, Si, InAs) oraz dielektryki (np. TiO₂, SiO₂) [1]. W zależności od długości można również wyróżnić nanopręty, czyli krótszą formę nanodrutek, do których należą również nanopateczki i nanowłókna o większej długości i przekroju poprzecznym (średnica nadal jest mniejsza od długości 100 razy) [2].



Rys. 1. Obraz TEM nanodrutek srebra [3]