

**Zeszyty Naukowe**Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2018, nr 107, s. 81–94

DOI: 10.24425/123730

Kamil Krzysztof SKORUPA¹, Rafał GRZEJDA¹

Badanie wpływu wybranych parametrów turbiny wiatrowej małej mocy z dyfuzorem na jej efektywność

Streszczenie: Za pomocą małych turbin wiatrowych można tworzyć rozproszone źródła energii elektrycznej użyteczne na obszarach o dobrych warunkach wietrznych. Niekiedy jednak możliwe jest wykorzystanie małych turbin wiatrowych również na terenach charakteryzujących się mniejszą średnią prędkością wiatru w ciągu roku. Na etapie projektowania małej turbiny wiatrowej można wykorzystywać różnego rodzaju rozwiązania techniczne zwiększające prędkość strugi wiatru, jak też w sposób optymalny ją ukierunkowujące. Do metod pozwalających na zwiększenie efektywności przetwarzania energii wiatru na energię elektryczną w przypadku turbiny wiatrowej należą zastosowanie dyfuzora osłaniającego wirnik turbiny oraz optymalizacja kształtu łopatek montowanych na wirniku turbiny. W pracy zbadano wpływ geometrii dyfuzora oraz łopatek wirnika na efektywność przykładowej turbiny wiatrowej przeznaczonej do eksploatacji na terenie województwa zachodniopomorskiego. Analizy wykonano dla trzech typów dyfuzora oraz dla trzech typów łopatek wirnika. Na ich podstawie dokonano wyboru najbardziej optymalnego kształtu dyfuzora oraz łopatek ze względu na efektywność turbiny wiatrowej.

Dla turbiny z zaprojektowanym dyfuzorem wykonano obliczenia mocy wyjściowej dla przyjętych różnych wartości średniej rocznej prędkości wiatru oraz stałego współczynnika mocy Betza i założonej sprawności generatora. We wszystkich analizowanych przypadkach oszacowano też ilość energii możliwej do wygenerowania przez turbinę w ciągu roku. Na podstawie tych obliczeń wysunięto ważne wnioski o znaczeniu praktycznym.

W końcowej części pracy przedstawiono model 3D turbiny wiatrowej z wybranymi na podstawie wcześniejszych analiz dyfuzorem i łopatkami wirnika. Jako materiału na dyfuzor i łopatki wirnika użyto włókna szklanego typu A. Za pomocą obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych wyznaczono graniczne przemieszczenia konstrukcji turbiny pod wpływem wiatru huraganowego. Na podstawie tych obliczeń wykazano poprawność konstrukcji zamodelowanej małej turbiny wiatrowej.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, mała turbina wiatrowa, moc turbiny, dyfuzor

¹ Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; e-mail: rafal.grzejda@zut.edu.pl

Study of the influence of selected parameters of a small wind turbine with a diffuser on its efficiency

Abstract: By means of small wind turbines, it is possible to create distributed sources of electricity useful in areas with good wind conditions. Sometimes, however, it is possible to use small wind turbines also in areas characterized by lower average wind speeds during the year. At the small wind turbine design stage, various types of technical solutions to increase the speed of the wind stream, as well as to optimally orientate it, can be applied. The methods for increasing the efficiency of wind energy conversion into electricity in the case of a wind turbine include: the use of a diffuser shielding the turbine rotor and the optimization of blades mounted on the turbine rotor. In the paper, the influence of the diffuser and rotor blades geometry on the efficiency of an exemplary wind turbine for exploitation in the West Pomeranian Province is investigated. The analyses are performed for three types of the diffuser and for three types of rotor blades. Based on them, the most optimal shapes of the diffuser and blades are selected due to the efficiency of the wind turbine.

For the turbine with the designed diffuser, calculations of the output power for the assumed different values of the average annual wind speed and the constant Betz power factor and the specified generator efficiency are made. In all the analyzed cases, the amount of energy that can be generated by the turbine during the year is also estimated. Important practical conclusions are formulated on the basis of these calculations.

In the final part of the paper, a 3D model of the wind turbine with the diffuser and rotor blades chosen based on earlier analyses is presented. As a material for the diffuser and rotor blades, glass fiber type A is applied. By means of calculations using the finite element method, the limit displacement of the turbine structure under the influence of a hurricane wind are determined. Based on these calculations, the correctness of the modelled small wind turbine structure has been demonstrated.

Keywords: wind energy, small wind turbine, turbine power, diffuser

Wprowadzenie

Rozwoju energetyki wiatrowej nie należy ograniczać wyłącznie do budowania farm wiatrowych w rejonach nadmorskich. Jednym z jego innych kierunków powinno być budowanie małych turbin wiatrowych, za pomocą których można tworzyć rozproszone źródła energii elektrycznej na potrzeby lokalne (Lewandowski i Klugmann-Radziemska 2017; Olkusi i Stala-Szlugaj 2017). Chociaż z powodu zmienności warunków wiatrowych (Karkoszka 2010; Zmywaczyk 2013) elektrownie wiatrowe małej mocy mogą stanowić jedynie dodatkowe źródło energii elektrycznej, to są one alternatywą dla użytkowników nieposiadających dostępu do sieci elektrycznej, a zamieszkujących tereny o dobrych warunkach wietrznych. Dodatkowo, mogą one wchodzić w skład układów hybrydowych, obok modułów fotowoltaicznych, małych elektrowni wodnych czy ogniw paliwowych (Soliński 2018; Szczerbowski i Ceran 2013). W układach takich możliwa jest kompensacja wad wytwarzania energii z poszczególnych źródeł. Najczęściej małe turbiny wiatrowe budowane są jako odrębne konstrukcje w pobliżu budynków mieszkalnych lub gospodarczych. Możliwe jest też jednak zintegrowanie turbin wiatrowych z budynkiem (Lewandowski i Klugmann-Radziemska 2017; Żołądek i in. 2018).

Zgodnie z normą PN-EN 61400-2 turbiny wiatrowe małej mocy to turbiny o powierzchni omiatanej wirnikiem nieprzekraczającej 200 m². Powierzchnię omiataną wirnikiem w normie tej definiuje się jako pole powierzchni rzutu koła zakreślonego przez łopatki wirnika w trakcie jednego pełnego obrotu wirnika na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru. Jako graniczną wartość mocy znamionowej dla małych turbin wiatrowych w pracy (Bukała

i in. 2014) podano 50 kW. Wyróżnia się dwie podstawowe grupy turbin wiatrowych, do których należą też małe turbiny wiatrowe:

- turbiny o osi poziomej (*horizontal axis wind turbines* – turbiny typu HAWT),
- turbiny o osi pionowej (*vertical axis wind turbines* – turbiny typu VAWT).

Konstrukcyjne odmiany turbin sklasyfikowanych według powyższego podziału zaprezentowano m.in. w pracach (Bukała i in. 2014; Lewandowski i Klugmann-Radziemska 2017). Obecnie, obok wyżej wymienionych turbin, konstruuje się również inne, pozwalające na zwiększenie wydajności i efektywności przetwarzania energii wiatru na energię elektryczną. Wśród takich turbin znajdują się małe turbiny wiatrowe z dyfuzorem, w postaci osłony wirnika, najczęściej o zmiennym przekroju (*diffuser-augmented horizontal axis wind turbines* – turbiny typu DAWT). Zastosowanie dyfuzora wskazuje się jako jedną z kilku możliwości zwiększenia mocy turbiny uzasadnionych ekonomicznie (Al-Sulaiman i Yilbas 2015; Vaz i Wood 2016), a ich przewagę pod względem wydajności nad turbinami o podobnej geometrii bez dyfuzora wykazano w pracach (Bontempo i Manna 2014; Bontempo i Manna 2016; Hansen i in. 2000; Kosasih i Saleh Hudin 2016; Roshan i in. 2015).

Zagadnieniem modelowania i badań eksperymentalnych turbin wiatrowych z dyfuzorem zajmowało się dotąd wielu naukowców. Należą do nich m.in. beneficjenci grantu POL-NOR/200957/47/2013, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Ich prace dotyczyły optymalizacji małych turbin wiatrowych eksploatowanych na terenach o niskiej prędkości wiatru (Bukała i in. 2015; Lipian i in. 2016; Olasek i in. 2016).

W pracach mających na celu zwiększenie prędkości obrotowej wirnika w turbinie wiatrowej autorzy proponowali zastosowanie dyfuzorów o geometrii:

- ściętego stożka gładkiego w części wewnętrznej (Bontempo i Manna 2014; Jafari i Kosasih 2014),
- ściętego stożka stopniowanego w części wewnętrznej (Roshan i in. 2015),
- rury o zmiennym przekroju z zewnętrznym kołnierzem (Heikal i in. 2018; Khamlaj i Rumpfkeil 2018; Ohya i in. 2008; Olasek i in. 2016; Pietkiewicz i in. 2015; Wang i in. 2015).

Do literatury tematu należą również prace, w których badano wpływ geometrii łopatek (Asl i in. 2017) oraz wpływ liczby łopatek (Wang i Chen 2008) wirnika turbiny z dyfuzorem na jego prędkość obrotową.

Z przedstawionego wprowadzenia wynika, że działania podejmowane w celu zwiększenia wydajności, efektywności i żywotności małych turbin wiatrowych oraz redukcji kosztów ich produkcji i eksploatacji są ważne, potrzebne oraz wciąż kontynuowane. W działania te wpisuje się niniejsza praca, której tematem jest modelowanie wybranej turbiny wiatrowej małej mocy z dyfuzorem w celu optymalizacji jej efektywności oraz zaprojektowania konstrukcji zapewniającej poprawne jej funkcjonowanie pod wpływem obciążeń od wiatru huraganowego.

1. Wybór geometrii dyfuzora i łopatek wirnika

Przy obliczaniu turbin wiatrowych małej mocy nie jest wymagane przeprowadzenie tak dokładnych badań warunków wietrznych, jak w przypadku turbin przemysłowych

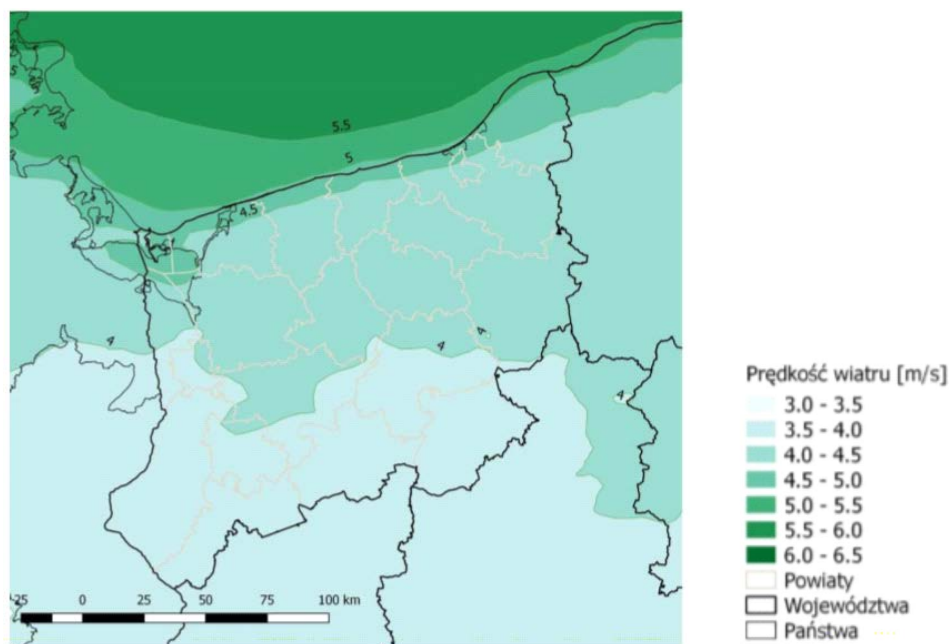
(Karolewski 2014). Nie oznacza to jednak, że można sobie pozwolić na zamontowanie turbiny wiatrowej bez uprzedniego sprawdzenia warunków wietrznych na danym obszarze. Ruch mas powietrza jest najważniejszym sygnałem wejściowym elektrowni wiatrowej. Pomiarów dokonuje się na przestrzeni roku w czasie rzeczywistym. Bada się nie tylko prędkość wiatru w poszczególnych okresach roku, ale także jego zmienność na danej wysokości nad poziomem gruntu (n.p.g.). Przykładową mapę wietrzną pokazano na rysunku 1. Dotyczy ona prędkości wiatru na terenie województwa zachodniopomorskiego obserwowanej w 2016 r. na wysokości 10 m n.p.g.

Na podstawie rysunku 1 można oszacować średnią prędkość wiatru dla danego obszaru V_0 , a następnie wyznaczyć średnią prędkość wiatru V_{sr} na wysokości odpowiadającej położeniu wirnika turbiny w trakcie jego eksploatacji h , zgodnie ze wzorem (Soliński 1999):

$$V_{sr} = V_0 \left(\frac{\alpha}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

gdzie:

- h_0 – wysokość, na której znana jest prędkość wiatru,
- α – wykładnik zależny od ukształtowania terenu.

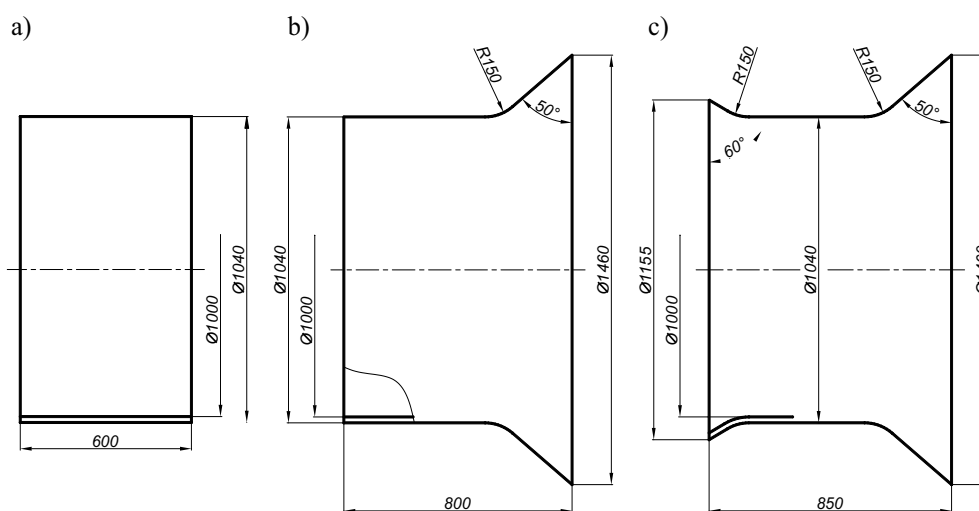


Rys. 1. Rozkład średniej rocznej wartości prędkości wiatru w województwie zachodniopomorskim w 2016 r. (Roczna... 2017)

Fig. 1. Distribution of the average annual wind speed value in the West Pomeranian Province in 2016

Przy obliczaniu badanej turbiny założono, że będzie ona zamocowana na wysokości $h = 8$ m n.p.g. na terenie z niską zabudową, kiedy to wykładnik α można przyjąć na poziomie 0,2 (Karolewski 2014). Przy takich założeniach, dla prędkości $V_0 = 4$ m/s, ze wzoru (1) otrzymuje się średnią prędkość wiatru $V_{sr} = 3,8$ m/s.

Aby zbadać wpływ geometrii dyfuzora na przyrost prędkości wiatru przepływającego przez dyfuzor, rozpatrzono trzy typy jego geometrii przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria przyjętych do obliczeń dyfuzorów i ich typy:

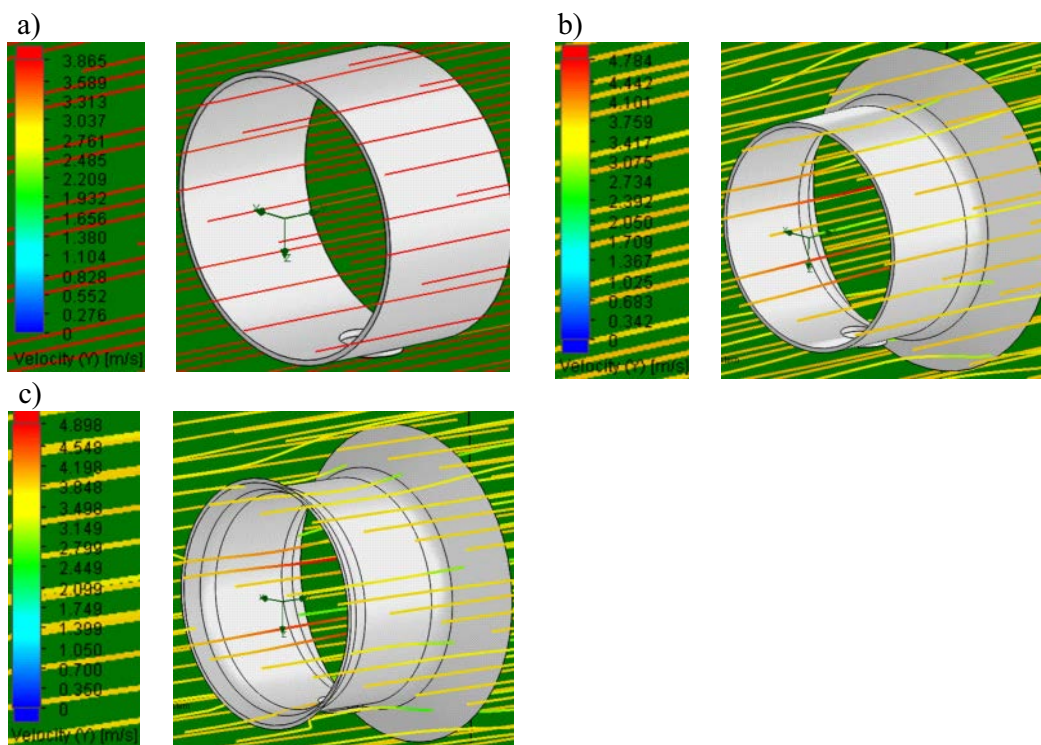
a) dyfuzor A, b) dyfuzor B, c) dyfuzor C

Fig. 2. Geometry of diffusers adopted for the calculations and their types:

a) diffuser A, b) diffuser B, c) diffuser C

Symulacje numeryczne wykonano przy użyciu programu SolidWorks, umieszczając badane dyfuzory w środku tunelu aerodynamicznego w kształcie sześcianu o wymiarach $5 \times 5 \times 5$ m. Jako dane wejściowe do badań przyjęto: średnią prędkość wiatru na wysokości zamocowania wirnika $V_{sr} = 3,8$ m/s (wyznaczoną ze wzoru (1)), ciśnienie atmosferyczne na wylocie z dyfuzora wynoszące 101 325 Pa oraz temperaturę powietrza równą 20°C. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 3. Natomiast uzyskane maksymalne wartości przyrostów prędkości wiatru przepływającego przez poszczególne dyfuzory ΔV zebrano w tabeli 1.

Dokonane symulacje pozwoliły na podjęcie decyzji co do wyboru rodzaju dyfuzora i zastosowaniu go w projekcie turbiny wiatrowej małej mocy. Jako najkorzystniejsze rozwiązanie z punktu widzenia wzrostu prędkości powietrza, a tym samym efektywności turbiny wiatrowej, wskazano dyfuzor C. Przy zastosowaniu tego typu dyfuzora można uzyskać wzrost prędkości powietrza w miejscu zamocowania wirnika turbiny o niecałe 29%. W dalszych analizach przyjęto średnią prędkość wiatru na wysokości zamocowania wirnika $V_{sr,d} = 4,9$ m/s.



Rys. 3. Wyniki obliczeń prędkości wiatru w przypadku:
 a) dyfuzora A, b) dyfuzora B, c) dyfuzora C (Skorupa 2017)

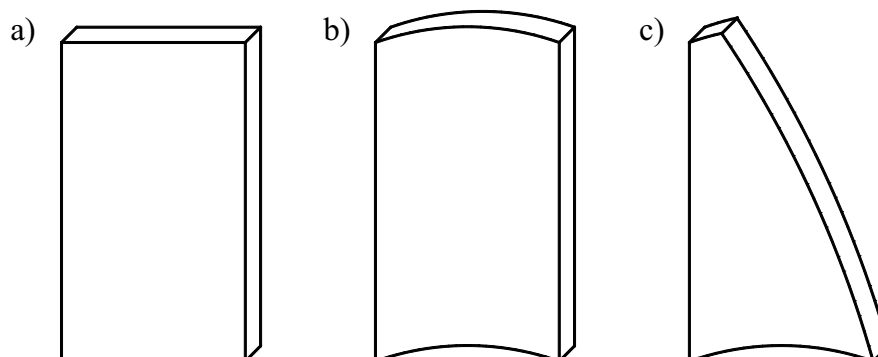
Fig. 3. Wind speed calculations results in the case of:
 a) diffuser A, b) diffuser B, c) diffuser C

TABELA 1. Maksymalne wartości przyrostów prędkości wiatru dla poszczególnych dyfuzorów

TABLE 1. Maximum values of wind speed increments for individual diffusers

Typ dyfuzora	ΔV , %
A	1,7
B	25,9
C	28,9

W celu zbadania wpływu kształtu łopatek turbiny wiatrowej na rozkład ciśnienia przed i za wirnikiem, rozpatrzono trzy typy łopatek pokazane na rysunku 4. Symulacje numeryczne wykonano przy użyciu programu SolidWorks, umieszczając wirniki z badanymi łopatkami w środku tunelu aerodynamicznego. Jako dane wejściowe do badań przyjęto: średnią



Rys. 4. Schematy przyjętych do obliczeń łopatek turbiny i ich typy:
a) łopatką 1, b) łopatką 2, c) łopatką 3

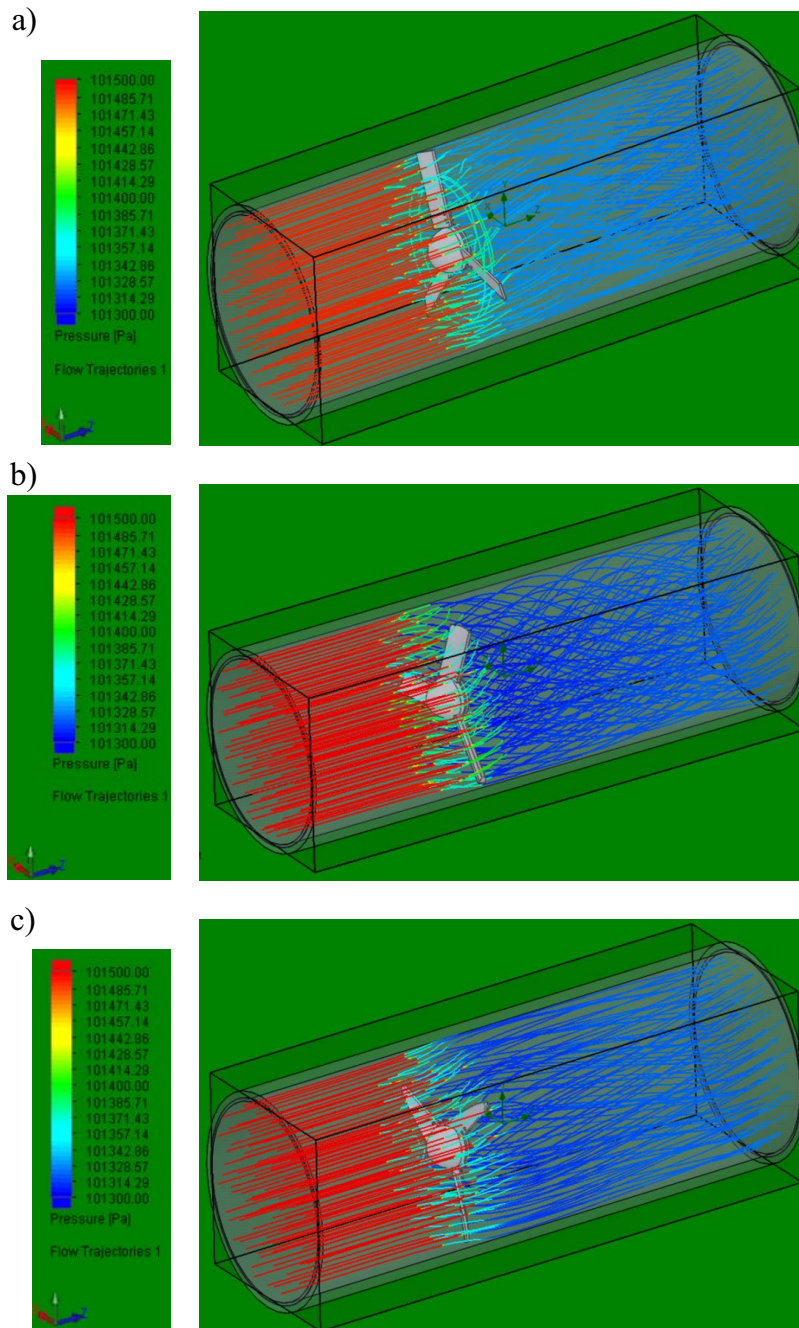
Fig. 4. Schemes of turbine blades adopted for the calculations and their types:
a) blade 1, b) blade 2, c) blade 3

prędkość wiatru na wlocie do tunelu odpowiadającą średniej prędkości wiatru na wysokości zamocowania wirnika z wybranym dyfuzorem $V_{srd} = 4,9$ m/s, ciśnienie atmosferyczne na wylocie z tunelu wynoszące 101 325 Pa, temperaturę powietrza równą 20°C oraz prędkość obrotową wirnika wynoszącą 449 obr/min (wyznaczoną na podstawie gabarytów zewnętrznych wirnika z łopatkami). Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 5.

Wykonane symulacje umożliwiły podjęcie decyzji co do wyboru łopatek wirnika projektowanej turbiny wiatrowej. Na podstawie analizy rozkładów ciśnień przedstawionych na rysunku 5 można stwierdzić, że:

1. Najwyższe ciśnienie za wirnikiem otrzymano w przypadku wirnika z łopatkami typu 1. Jest to związane z generowanymi podczas ruchu obrotowego wirnika turbulencjami strugi powietrza, co skutkuje zmniejszeniem efektu przyspieszenia przepływu powietrza spowodowanego różnicą wartości ciśnień przed i za wirnikiem.
2. Największy spadek ciśnienia za wirnikiem, a tym samym największą różnicę ciśnień przed i za wirnikiem uzyskano w przypadku wirnika z łopatkami typu 2. Zjawisko to jest szczególnie korzystne ze względu na dodatkowy efekt zasysania strugi powietrza sprzed dyfuzora (Pietkiewicz i in. 2015).
3. W przypadku wirnika z łopatkami typu 3 zaobserwowano mniejsze zawirowania powietrza za łopatkami, co wpłynęło na mniejszą różnicę wartości ciśnień przed i za wirnikiem w porównaniu z wirnikiem z łopatkami typu 2 i na mniejszy efekt dodatkowego zasysania powietrza.

Mając na uwadze przytoczone stwierdzenia, jako najkorzystniejsze rozwiązanie z punktu widzenia spadku ciśnienia za wirnikiem, a tym samym efektywności turbiny wiatrowej, wskazano wirnik z łopatkami typu 2.



Rys. 5. Rozkłady ciśnienia w tunelu aerodynamicznym w przypadku wirnika z łopatkami:
 a) typu 1, b) typu 2, c) typu 3 (Skorupa 2017)

Fig. 5. Pressure distributions in a wind tunnel in the case of the rotor with blades:
 a) type 1, b) type 2, c) type 3

2. Obliczenia turbiny wiatrowej z wybranym dyfuzorem

Ilość energii generowanej przez turbinę wiatrową w czasie roku E_{el} można wyznaczyć z równania (Karolewski 2014):

$$E_{el} = e \cdot P_{el} \cdot t \quad (2)$$

gdzie:

- e – współczynnik wykorzystania mocy,
- P_{el} – moc wyjściowa turbiny,
- t – teoretyczny czas pracy w ciągu roku ($t = 8760$ h).

W przypadku małej turbiny wiatrowej moc wyjściową P_{el} oblicza się ze wzoru (Karolewski 2014):

$$P_{el} = P_t \cdot \eta_g \quad (3)$$

gdzie:

- P_t – moc turbiny,
- η_g – sprawność generatora w turbinie.

Moc turbiny P_t można wyznaczyć za pomocą zależności (Karolewski 2014):

$$P_t = P_w \cdot C_p \quad (4)$$

gdzie:

- P_w – moc strumienia powietrza,
- C_p – współczynnik mocy Betza.

Moc zawartą w strumieniu powietrza P_w wyraża się wzorem (Michalak 2009):

$$P_w = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{\dot{s}r,d}^3 \quad (5)$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza,
- A – pole powierzchni określanej przez wirnik turbiny.

W obliczeniach mocy turbiny wiatrowej z wybranym dyfuzorem przyjęto: gęstość powietrza w temperaturze średniej dla Szczecina w roku 2016 r. (Roczna... 2017) wynoszącą $1,249 \text{ kg/m}^3$, pole $A = 0,25\pi \text{ m}^2$, współczynnik $C_p = 0,38$, sprawność generatora $\eta_g = 0,9$ oraz wartości współczynnika e dobrane na podstawie (Soliński 1999). W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń mocy uzyskane dla turbiny wiatrowej z dyfuzorem przy różnych wartościach prędkości wiatru $V_{\dot{s}r}$. Na podstawie wyników obliczeń można zauważyć, że w przypadku badanej turbiny:

1. Nawet niewielka różnica w średniej prędkości wiatru w ujęciu rocznym daje znaczną różnicę w liczbie kWh wygenerowanej energii elektrycznej.
2. Po zastosowaniu turbiny, która przy prędkości wiatru 12 m/s ma moc wyjściową około 566 W na obszarze miasta Szczecin, gdzie średnia prędkość wiatru w skali roku wynosi 3,8 m/s, możliwe będzie generowanie mocy wyjściowej równej jedynie około 20 W.
3. Dla średniej rocznej prędkości wiatru o wartościach 6 i 12 m/s można uzyskać taką samą ilość energii elektrycznej w ciągu roku.
4. Maksymalną ilość energii elektrycznej w ciągu roku można uzyskać dla średniej rocznej prędkości wiatru o wartości 8 m/s.

TABELA 2. Wyniki obliczeń turbiny wiatrowej z dyfuzorem przy różnych wartościach prędkości wiatru

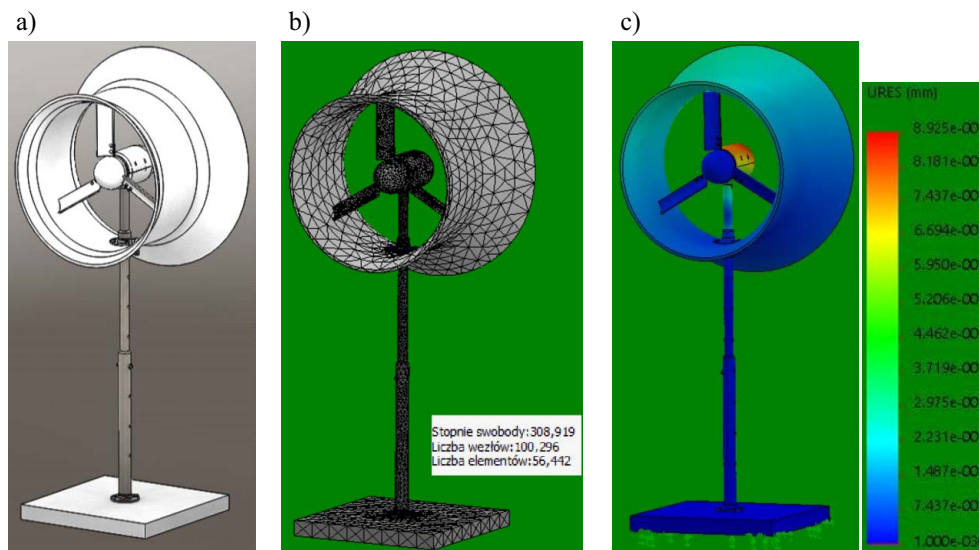
TABLE 2. Calculations results for the wind turbine with the diffuser at different wind speed values

	V_{sr} , m/s							
	2	3,8	6	8	10	12	14	16
$V_{sr,d}$, m/s	2,5	4,9	7,5	10	12,6	15	17,6	20,1
P_w , W	7,7	57,7	206,9	490,5	981,1	1 655,4	2 674	3 983
P_t , W	2,9	21,9	78,6	186,4	372,8	629	1 016,1	1 513,5
P_{el} , W	2,6	19,7	70,8	167,7	335,6	566,1	914,5	1 362,2
e	0,85	0,55	0,28	0,15	0,05	0,035	0,02	0,01
E_{el} , kWh	19,5	95,1	173,6	220,4	147	173,6	160,2	119,3

3. Modelowanie i analiza wytrzymałości turbiny wiatrowej

Dzięki wykonanym obliczeniom i symulacjom, opisanym wyżej, możliwe było zbudowanie modelu 3D małej turbiny wiatrowej z dyfuzorem (rys. 6a). Do budowy modelu wykorzystano w większości elementy znormalizowane, a całość urządzenia została tak przemyślana, by była łatwa w transporcie i prosta w montażu. Dyfuzor i łopatki wirnika, o kształtach wybranych w rozdziale 1 pracy, wykonano z włókna szklanego typu A. Turbinę zamocowano na betonowym fundamencie o wymiarach $1 \times 1 \times 0,1$ m. Pozostałe informacje o szczegółach konstrukcji i jej dokumentację techniczną zawarto w pracy (Skorupa 2017). Model turbiny wykonany z elementów skończonych (model MES) pokazano na rysunku 6b, natomiast mapę przemieszczeń modelu pod wpływem wiatru huraganowego (o prędkości 32 m/s) przedstawiono na rysunku 6c. Modelowanie turbiny i jej obliczenia zrealizowano przy użyciu programu SolidWorks.

Maksymalne przemieszczenia w modelu MES turbiny nie przekroczyły 0,9 mm, wobec czego konstrukcję turbiny uznano za poprawną.



Rys. 6. Mała turbina wiatrowa z dyfuzorem:
 a) model 3D, b) model MES, c) mapa przemieszczeń modelu pod wpływem wiatru huraganowego (Skorupa 2017)

Fig. 6. Small wind turbine with a diffuser:
 a) 3D model, b) FEM model 2,
 c) displacement map of the model under the influence of a hurricane wind

Podsumowanie

W pracy przedstawiono modelowanie i obliczenia wybranej turbiny wiatrowej małej mocy z dyfuzorem. Budując model turbiny rozpatrzono trzy typy dyfuzorów oraz trzy typy łopatek wirnika o różnej geometrii. Udowodniono, że przy odpowiednim doborze kształtu dyfuzora możliwe jest uzyskanie wzrostu prędkości powietrza przepływającego przez turbinę. Wykazano również, że stosując odpowiedni kształt łopatek wirnika turbiny można uzyskać korzystny rozkład ciśnień przed i za wirnikiem. Poprzez dobór dyfuzora i łopatek wirnika można zatem wpływać na zwiększenie efektywności turbiny wiatrowej.

Na wydajność turbiny wiatrowej decydujący wpływ ma miejsce jej zamontowania i eksploatacji. W pracy udowodniono, że ilość energii elektrycznej, którą można pozyskać z użytkowania turbiny wiatrowej w ciągu roku zależy w sposób nieliniowy od średniej prędkości wiatru na danym obszarze.

Wynikiem końcowym pracy jest model 3D turbiny wiatrowej z dyfuzorem. Poprawność jej konstrukcji wykazano na podstawie obliczeń i analiz z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Literatura

- Al-Sulaiman, F.A. i Yilbas, B.S. 2015. Thermoeconomic analysis of shrouded wind turbines. *Energy Conversion and Management* t. 96, s. 599–604.
- Asl i in. 2017 – Asl, H.A., Monfared, R.K. i Rad M. 2017. Experimental investigation of blade number and design effects for a ducted wind turbine. *Renewable Energy* t. 105, s. 334–343.
- Bontempo, R. i Manna, M. 2014. Performance analysis of open and ducted wind turbines. *Applied Energy* t. 136, s. 405–416.
- Bontempo, R. i Manna, M. 2016. Effects of the duct thrust on the performance of ducted wind turbines. *Energy* t. 99, s. 274–287.
- Bukała i in. 2014 – Bukała, J., Damaziak, K., Krzeszowiec, M. i Małachowski, J. 2014. Rozwiązania konstrukcyjne małych turbin wiatrowych. *Modelowanie Inżynierskie* t. 22, z. 53, s. 21–29.
- Bukała i in. 2015 – Bukała, J., Damaziak, K., Kroszczyński, K., Krzeszowiec, M. i Małachowski, J. 2015. Investigation of parameters influencing the efficiency of small wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* t. 146, s. 29–38.
- Hansen i in. 2000 – Hansen, M.O.L., Sørensen, N.N. i Flay, R.G.J. 2000. Effect of placing a diffuser around a wind turbine. *Wind Energy* t. 3, nr 4, s. 207–213.
- Heikal i in. 2018 – Heikal, H.A., Abu-Elyazeed, O.S.M., Nawar, M.A.A., Attai, Y.A. i Mohamed, M.M.S. 2018. On the actual power coefficient by theoretical developing of the diffuser flange of wind-lens turbine. *Renewable Energy* t. 125, s. 295–305.
- Jafari, S.A.H. i Kosasih, B. 2014. Flow analysis of shrouded small wind turbine with a simple frustum diffuser with computational fluid dynamics simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* t. 125, s. 102–110.
- Karkoszka, K. 2010. Metody prognozowania wielkości mocy elektrycznej z farm wiatrowych dla potrzeb bilansowania oraz prowadzenia ruchu krajowego systemu elektroenergetycznego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 78, s. 75–86.
- Karolewski, B. 2014. Obliczanie parametrów małej elektrowni wiatrowej. *Elektro.info* nr 6, s. 74–76.
- Khamlaj, T.A. i Rumpfkeil, M.P. 2018. Analysis and optimization of ducted wind turbines. *Energy* t. 162, s. 1234–1252.
- Kosasih, B. i Saleh Hudin, H. 2016. Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model. *Renewable Energy* t. 87, s. 154–167.
- Lewandowski, W.M. i Klugmann-Radziemska, E. 2017. *Proekologiczne odnawialne źródła energii, Kompendium*. Wyd. I. Warszawa: WN PWN.
- Lipian i in. 2016 – Lipian, M., Karczewski, M., Moliński, J. i Józwick, K. 2016. Numerical simulation methodologies for design and development of Diffuser-Augmented Wind Turbines – analysis and comparison. *Open Engineering* t. 6, s. 235–240.
- Michalak, P. 2009. Ocena zasobów energii wiatru na potrzeby małej energetyki wiatrowej. *Elektrotechnika i Elektronika* t. 28, s. 14–19.
- Ohya i in. 2008 – Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K. i Inoue, M. 2008. Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* t. 96, s. 524–539.
- Olasek i in. 2016 – Olasek, K., Karczewski, M., Lipian, M., Wiklak, P. i Józwick, K. 2016. Wind tunnel experimental investigations of a diffuser augmented wind turbine model. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* t. 26, s. 2033–2047.
- Olkuski, T. i Stala-Szlugaj, K. 2017. Tendencje zmian występujące w światowej energetyce. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 98, s. 187–198.
- Pietkiewicz i in. 2015 – Pietkiewicz, P., Miąskowski, W., Nalepa, K. i Kowalczyk, K. 2015. Badanie rozkładu prędkości w dyfuzorze turbiny wiatrowej. *Mechanik* nr 7, s. 655–662.
- PN-EN 61400-2:2014-11E. Turbozespoły wiatrowe, Część 2: Małe turbozespoły wiatrowe.
- Roczna ocena jakości powietrza w województwie zachodniopomorskim za 2016 rok. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Szczecinie, Szczecin, 2017.
- Roshan i in. 2015 – Roshan, S.Z., Alimirzadeh, S. i Rad, M. 2015. RANS simulations of the stepped duct effect on the performance of ducted wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* t. 145, s. 270–279.

- Skorupa, K.K. 2017. *Projekt i analiza MES turbiny wiatrowej małej mocy z dyfuzorem*. Praca magisterska, Szczecin, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
- Soliński, B. 2018. Efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne bilansowania hybrydowej mikroinstalacji wiatrowo-słonecznej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 102, s. 65–76.
- Soliński, I. 1999. *Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej*. Wyd. 1. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- Szczerbowski, R. i Ceran, B. 2013. Możliwości rozwoju i problemy techniczne małej generacji rozproszonej opartej na odnawialnych źródłach energii. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 193–205.
- Vaz, J.R.P. i Wood, D.H. 2016. Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management* t. 123, s. 35–45.
- Wang, S.H. i Chen, S.H. 2008. Blade number effect for a ducted wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology* t. 22, nr 10, s. 1984–1992.
- Wang i in. 2015 – Wang, W.X., Matsubara, T., Hu, J., Odahara, S., Nagai, T., Karasutani, T. i Ohya, Y. 2015. Experimental investigation into the influence of the flanged diffuser on the dynamic behavior of CFRP blade of a shrouded wind turbine. *Renewable Energy* t. 78, s. 386–397.
- Zmywaczyk, J. 2013. Odnawialne źródła energii – wybrane problemy. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa* t. 4, nr 1, s. 37–58.
- Żołądek i in. 2018 – Żołądek, M., Goryl, W., Sornek, K. i Augustyn, A. 2018. Analiza wybranych parametrów pracy turbiny wiatrowej zintegrowanej z budynkiem w zróżnicowanych warunkach pogodowych na przykładzie Centrum Energetyki AGH. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 102, s. 101–110.

