

## Porównanie możliwości wykorzystania małych turbin wiatrowych o poziomej i pionowej osi obrotu

**Streszczenie.** W niniejszym artykule przeanalizowano lokalne warunki wiatrowe występujące przy ul. Na Grobli we Wrocławiu, na terenach należących do Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji. Na podstawie danych o prędkości wiatru z okresu jednego roku sporządzono ocenę zasadności stosowania różnego typu małych turbin wiatrowych o poziomej i pionowej osi obrotu.

**Abstract.** The paper describes local wind conditions at Na Grobli in Wrocław. Wind speed data is used to describe a potential to apply a different kind of micro wind turbines with horizontal and vertical axis. Theoretical analysis based on measurement data of a one year period is presented. (Comparison of the possible application of small horizontal and vertical axis wind turbines).

**Słowa kluczowe:** turbiny wiatrowe, pionowa i pozioma oś obrotu, parametry wiatru.

**Keywords:** wind turbines, horizontal and vertical axis, wind parameters.

### Wprowadzenie

Dalszy rozpowszechnianie energetyki wiatrowej na terenie Polski wiąże się z koniecznością rozwiązania wielu problemów natury technicznej. Przyłączanie do Krajowego Systemu Energetycznego tego typu nowych źródeł energii elektrycznej wymaga zwiększenia jego elastyczności oraz zapewnienia dodatkowej rezerwy mocy do pokrycia zapotrzebowania na energię odbiorców w okresie niekorzystnych warunków atmosferycznych [1]. Rozwój technologii przetwarzania energii wiatru oraz intensywne badania nad metodami prognozowania mocy turbin [2], pozwalają jednak myśleć o energetyce wiatrowej w kategoriach znacznego potencjału do rozwoju również w nadchodzących latach, zarówno w skali dużych farm, jak i małych instalacji prosumenckich.

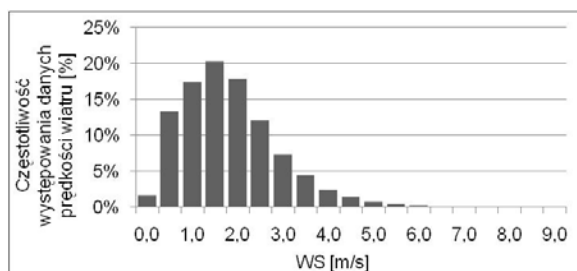
Warunki wiatrowe na obszarze Polski są jednak bardzo zróżnicowane i nie wszystkie tereny są tak samo korzystne dla rozwoju energetyki wiatrowej. Energia niesiona przez strumień powietrza na wysokości 30 m nad poziomem gruntu wynosi od 500 kWh/(m<sup>2</sup>·a) w rejonach Górnego i Dolnego Śląska, do 1250-2500 kWh/(m<sup>2</sup>·a) na wybrzeżu Morza Bałtyckiego, Suwalszczyźnie oraz w środkowej Wielkopolsce i Mazowszu [3]. Znaczne zróżnicowanie potencjału energetycznego wiatru zauważalne jest również w mniejszej skali i dotyczy poszczególnych miast, czy nawet dzielnic i ulic, z których każde może posiadać swój unikalny profil prędkości wiatru, zależny od ukształtowania terenu oraz typu i wysokości zabudowy. Przykładowo występowanie lokalnych zmian prędkości wiatru po napotkaniu naturalnych lub sztucznych przeszkód na terenach zurbanizowanych (wąskie przejścia między budynkami, bramy, wjazdy, tunele itp.), może prowadzić do znacznego polepszenia warunków wiatrowych na niewielkim obszarze. Taki lokalny wzrost potencjału energetycznego może być natomiast wykorzystany dzięki zastosowaniu małych lub mikro elektrowni wiatrowych.

### Charakterystyka warunków wiatrowych

Wrocław znajduje się w strefie określanej jako mało korzystna do rozwoju energetyki wiatrowej, ze średnioroczną prędkością wiatru kształtującą się na poziomie 3,5 m/s [3]. Dane te są jednak wartością uśrednioną i odnoszą się do skali znacznie większej niż obszar pojedynczej dzielnicy, osiedla, ulicy, bądź konkretnego budynku. Kierowanie się informacją zdefiniowaną dla tak dużego obszaru, może prowadzić do błędnych wniosków przy podejmowaniu decyzji o lokalizacji turbiny wiatrowej małej mocy, w tym zarówno do

przecenienia potencjału energetycznego wiatru, jak i jego niedowartościowania. Wiarygodna ocena powinna opierać się więc na analizie warunków lokalnych, występujących możliwie jak najbliższej przewidywanego miejsca montażu turbiny wiatrowej.

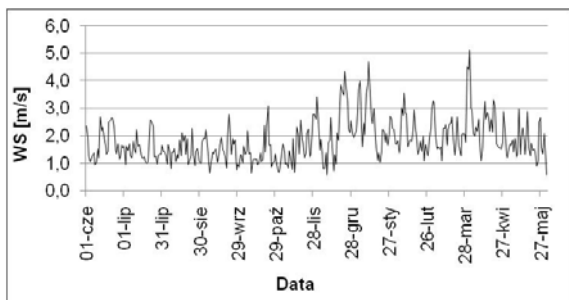
Jako minimalny okres niezbędny do oceny warunków wiatrowych na danym obszarze podaje się jeden rok [4] lub dwa lata [5]. Zwiększenie wiarygodności przeprowadzanych analiz wiąże się z wydłużeniem czasu pomiarów, jednak w wielu miejscach jest to obecnie niemożliwe ze względu na ograniczoną liczbę danych. Pomiar prędkości wiatru w stacji pogodowej, zlokalizowanej przy ul. Na Grobli we Wrocławiu, prowadzony jest od lutego 2014 r. Ultradźwiękowy czujnik prędkości i kierunku wiatru zamontowany jest na wysokości 13 m nad poziomem terenu, co w przybliżeniu odpowiada najwyższej dozwolonej na tym obszarze wysokości dla montażu turbin wiatrowych. Wybrany obszar charakteryzuje się dostępnością dużych powierzchni dachów płaskich, bliskością rzeki i terenów zielonych oraz stosunkowo niską zabudową. Analizie poddano dane z jednego roku (od czerwca 2014 r. do maja 2015 r.). Częstotliwość zapisu danych wynosiła jedną minutę.



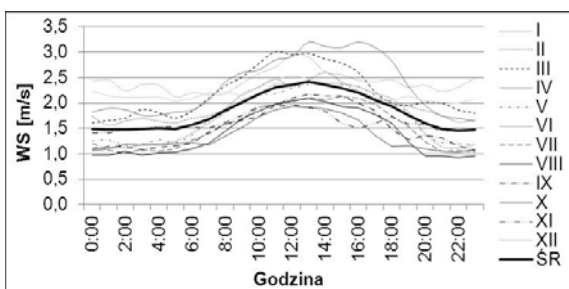
Rys. 1. Częstotliwość występowania poszczególnych prędkości wiatru na badanym obszarze (WS – prędkość wiatru)

Do opisu potencjału energetycznego wiatru wykorzystano średnią prędkość wiatru oraz częstotliwość występowania poszczególnych prędkości wiatru w czasie [6,7]. Przy ul. Na Grobli we Wrocławiu, średnioroczna prędkość wiatru w badanym okresie jednego roku wynosiła 1,8 m/s. Również na histogramie częstotliwości występowania poszczególnych prędkości wiatru (rys. 1) można zauważyć, że wartości z przedziału 1,5-1,9 m/s występowały na badanym terenie najczęściej i stanowiły ponad 20% wszystkich pomiarów. Prędkości minimalne wiatru, to jest poniżej 0,5 m/s, występowały przez 3% czasu, zaś prędkości maksymalne, większe niż 8 m/s, zarejestrowano tylko przez 30 minut, co nie stanowiło nawet

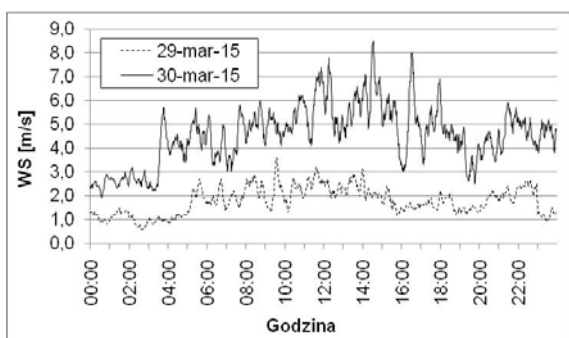
1 promila z badanego okresu. Ponadto, przez ponad 90% czasu, prędkość wiatru nie przekraczała wartości 3,5 m/s, co przy granicznej średniorocznej prędkości osiągnięcia opłacalności elektrowni wiatrowych szacowanej na 4 m/s, potwierdza zakwalifikowanie badanego obszaru jako mało korzystnego do stosowania tego typu rozwiązań [8].



Rys. 2. Roczny przebieg średnich dobowych prędkości wiatru w badanym okresie (WS – prędkość wiatru)



Rys. 3. Dobowy przebieg średnich godzinowych prędkości wiatru w poszczególnych miesiącach badanego okresu (WS – prędkość wiatru, ŚR – prędkość średnia)



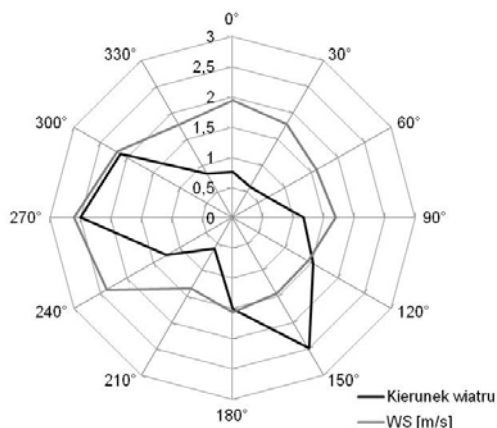
Rys. 4. Dobowa zmienność prędkości wiatru w dwóch kolejnych dniach 29 marca 2015 i 30 marca 2015 r. (WS – prędkość wiatru)

Analizując przebieg zmienności wiatru w kolejnych dniach badanego okresu, można zauważyć pewien wzrost średniej prędkości wiatru w miesiącach zimowych, od listopada do marca (rys. 2). W okresie tym zanotowano najwyższe średnie prędkości dobowe (średnia prędkość wiatru dla całego okresu zimowego wynosiła 2,0 m/s), a także najwyższe ze wszystkich zebranych pomiarów wartości chwilowe (maksymalnie 8,8 m/s). Natomiast dla okresu letniego średnia dobowa prędkość wiatru wynosiła 1,7 m/s, a zmierzona wartość maksymalna 6,6 m/s. Oprócz zmienności sezonowej, prędkość wiatru zmieniała się również w czasie doby (rys. 3). Wzrost prędkości wiatru w godzinach porannych, osiągnięcie najwyższych wartości w południe, a następnie spadek i stabilizacja w godzinach nocnych był rejestrowany we wszystkich miesiącach badanego okresu. Podobne wyniki, dotyczące zarówno zmienności sezonowej oraz dobowej, obserwuje się również w innych instalacjach na terenie kraju [9].

Zmienność prędkości wiatru, pokrywająca się ze zmiennością natężenia promieniowania słonecznego w ciągu dnia oznacza, że energia wiatru nie jest rozwiązaniem pozwalającym na zbilansowanie dostępności energii słonecznej do pokrycia niedoborów energii występujących w okresach zwiększonego zużycia w szczytach porannych i wieczornych. Przesunięcie w czasie szczytu produkcji energii elektrycznej oraz zwiększonego jej zapotrzebowania, pociąga za sobą konieczność magazynowania lub odsprzedaży do sieci zewnętrznej.

O ile sposób w jaki zmienia się prędkość wiatru w ciągu doby charakteryzuje się pewną powtarzalnością, to już sama prędkość może przyjmować skrajnie różne wartości, nawet w krótkim przedziale czasu. Przykładowo, w dwóch następujących po sobie dniach tego samego miesiąca, tj. 29 i 30 marca, średnia prędkość dobowa różniła się między sobą ponad dwukrotnie, a maksymalne zarejestrowane prędkości wynosiły odpowiednio 3,6 oraz 8,5 m/s (rys. 4). Tak znaczne zróżnicowanie występujące w krótkim czasie jest główną przyczyną trudności podczas eksploatacji elektrowni wiatrowych, zwłaszcza tych połączonych z siecią energetyczną. W przypadku turbin wiatrowych małych mocy, często zintegrowanych z własnym magazynem energii, negatywne skutki zmienności wiatru zostają jednak częściowo zniwelowane.

Oprócz prędkości wiatru, dużą zmiennością charakteryzuje się również jego kierunek (rys. 5). Na badanym obszarze przeważał wiatr z kierunku zachodniego (średnia roczna prędkość 2,6 m/s) oraz południowo-wschodniego (średnia 1,5 m/s), z czego w okresie zimowym z kierunku południowo-wschodniego, a w okresie letnim z zachodu. O ile większość typów turbin wiatrowych pozwala na pracę niezależnie od kierunku wiatru, to informację na ten temat można wykorzystać do określenia najlepszego miejsca dla lokalizacji turbiny, zwłaszcza w przypadku występowania naturalnych przeszkód w pobliżu budynku lub innych urządzeń zamontowanych na powierzchni dachu.



Rys. 5. Częstotliwość wiatru z poszczególnych kierunków oraz odpowiadająca im średnia prędkość wiatru (WS – prędkość wiatru)

### Charakterystyka turbin wiatrowych

Ilość energii elektrycznej wytwarzanej przez turbiny wiatrowe zależy przede wszystkim od prędkości strumienia powietrza bezpośrednio przed elektrownią. Prędkość wiatru jest jednak zmienną zależną od wielu czynników i ma charakter losowy, trudny do przewidzenia w dłuższej perspektywie. W ostatnich latach zauważalny jest jednak intensywny rozwój dziedziny związanej z prognozowaniem wydajności elektrowni wiatrowych i tworzeniem modeli predykcyjnych opartych na metodach statystycznych, fizycznych lub ich połączeniu (modele hybrydowe).

Dotychczasowe modele pozwalają jednak na przewidywanie wydajności elektrowni wiatrowych z nieznacznym wyprzedzeniem rzędu kilku godzin [9,10].

Moc strugi wiatru przepływającej przez powierzchnię jaką zakreślałyby łopatki turbiny wiatrowej można opisać wzorem (1). Wartość mocy obliczonej na podstawie tej zależności równa jest mocy wiatru bezpośrednio przed elektrownią wiatrową i w głównej mierze zależy od prędkości wiatru (trzecia potęga), ale także od gęstości poruszającego się powietrza.

$$(1) \quad P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza,  $S$  – powierzchnia zakreślana przez łopatki turbiny,  $v$  – prędkość wiatru.

Moc uzyskiwana bezpośrednio na wale wirnika elektrowni jest mniejsza od mocy wiatru przed turbiną, co opisuje równanie (2).

$$(2) \quad P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p$$

gdzie:  $C_p$  – sprawność konwersji energii wiatru.

Występujący we wzorze (2) współczynnik  $C_p$  nazywany jest również współczynnikiem wykorzystania mocy lub współczynnikiem Betza. Jego wartość zależy od stosunku prędkości wiatru przed i za turbiną i dla trzykrotnego spadku prędkości osiąga maksymalną wartość 0,593, nazywaną limitem Betza. Wybierając rodzaj turbiny wiatrowej należy zwracać uwagę na możliwie najwyższą wartość współczynnika  $C_p$  w jak najszerszym przedziale prędkości wiatru. Dla obecnie stosowanych technologii wiatrowych rzeczywiste wartości współczynnika Betza wynoszą od 0,2 do 0,4 w zależności od konstrukcji turbiny (najwyższe osiągnięte współcześnie wartości sięgają 0,5).

Obecnie ponad 90% wszystkich zainstalowanych turbin wiatrowych stanowią turbiny trzyłopatowe, o poziomej osi obrotu (turbiny HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine). Rozwiązanie to charakteryzuje się wysoką sprawnością, dzięki czemu już przy stosunkowo niskich prędkościach możliwe jest osiągnięcie mocy znamionowej. Wadą turbin o wale poziomym jest natomiast konieczność zastosowania mechanizmu naprowadzającego, zmieniającego ustawienie turbiny w zależności od kierunku wiatru, a także mechanizmu hamującego, ograniczającego obroty przy silnym wietrze, kiedy może być przekroczony próg bezpiecznej pracy urządzenia. Alternatywą dla turbin poziomych, są turbiny o pionowej osi obrotu (tzw. turbiny typu VAWT – Vertical Axis Wind Turbine). Największą zaletą tych rozwiązań jest możliwość pracy w szerokim zakresie parametrów, zarówno przy bardzo niskich lub bardzo wysokich prędkościach oraz niezależnie od kierunku wiatru. Ze względu na niskie prędkości obrotowe, turbiny pionowe charakteryzują się jednak niższą sprawnością [11], a współczynnik wykorzystania mocy  $C_p$  jest prawie dwukrotnie mniejszy niż w przypadku turbin o wale poziomym.

### Porównanie turbin wiatrowych

W celu określenia możliwości wykorzystania energii wiatru na badanym obszarze we Wrocławiu, porównano pięć małych turbin wiatrowych różnej konstrukcji o mocy 1 kW (tab. 1). W zestawieniu znalazła się jedna turbina o poziomej osi obrotu oraz cztery rozwiązania turbin z wałem pionowym:

Typ 1: Turbina o poziomej osi obrotu z trzema łopatkami (średnica wirnika 3,1 m);

Typ 2: Turbina o pionowej osi obrotu typu H-rotor z trzema łopatkami (średnica wirnika 2,0 m; wysokość 2,8 m);

Typ 3: Turbina o pionowej osi obrotu typu H-rotor z pięcioma łopatkami (średnica wirnika 1,8 m; wysokość 2,0 m);

Typ 4: Turbina o pionowej osi obrotu, stanowiąca połączenie turbiny typu Savonius'a z trzema łopatkami wygiętymi w kształt litery C oraz turbiny typu Darrieus'a (średnica wirnika 2,4 m; wysokość 2,2 m);

Typ 5: Turbina o pionowej osi obrotu stanowiąca modyfikację turbiny typu H-rotor i turbiny Savonius'a z trzema wygiętymi łopatkami (średnica wirnika 1,9 m; wysokość 1,9 m).

Tabela 1. Zestawienie parametrów technicznych turbin wiatrowych

Typ	1	2	3	4	5
Moc znamionowa	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW
Oś obrotu H – pozioma V – pionowa	H	V	V	V	V
Startowa prędkość wiatru [m/s]	3,0	2,0	2,5	1,5	2,5
Prędkość znamionowa	9,0	10,0	12,0	13,0	14,5
Graniczna prędkość wiatru [m/s]	50,0	50,0	50,0	60,0	60,0
Prędkość osiągnięcia połowy mocy znamionowej [m/s]	6,5	8,0	9,5	11,0	11,5

Do oszacowania ilości energii elektrycznej wytwarzanej przez turbiny wiatrowe wykorzystano charakterystyki dostarczone przez producentów, opisujące zależność wytwarzanej mocy elektrycznej od prędkości wiatru. Sprawność turbiny jest w tym przypadku opisywana przez kilka charakterystycznych prędkości wiatru takich jak prędkość startowa, czy prędkość osiągnięcia mocy nominalnej. Prędkość startowa, jest to prędkość rozruchu turbiny wiatrowej, kiedy możliwa staje się efektywna praca urządzenia i generowanie energii elektrycznej. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru ponad wartość startową, zwiększa się ilość energii wytwarzanej przez turbinę, do osiągnięcia parametrów nominalnych. Dla pewnej prędkości powyżej prędkości nominalnej, wartość mocy wytwarzanej na turbinie stabilizuje się, tak że wykorzystywana jest już tylko część energii wiatru i sprawność turbiny znacząco się obniża. Dla każdej z turbin, producent podaje również graniczną prędkość wiatru, która stanowi próg bezpiecznej pracy urządzenia.

W przypadku lokalizacji przy ul. Na Grobli we Wrocławiu, zanotowane w badanym okresie prędkości wiatru nigdy nie osiągnęły wartości odpowiadających prędkości uzyskania mocy znamionowej, bez względu na typ rozpatrywanej turbiny, a tylko dla dwóch turbin zostałyby osiągnięte prędkości wiatru, pozwalające na wytworzenie mocy równej połowie mocy nominalnej. W związku z tak niekorzystnymi warunkami wiatrowymi, większego znaczenia dla potencjalnego inwestora podejmującego decyzję o lokalizacji turbin na badanym obszarze nabiera już nie sama sprawność urządzenia, ale możliwość pracy przy możliwie niskich prędkościach wiatru.

Potencjał pracy turbiny w mało korzystnych warunkach wiatrowych opisuje wartość prędkości startowej. I tak dla turbiny o poziomej osi obrotu, charakteryzującej się najwyższą prędkością startową równą 3 m/s, prędkości wiatru o wartości wyższej lub równej tej prędkości, występowały na badanym obszarze tylko przez 17% badanego okresu. W przypadku turbin o wale pionowym,

katalogowe prędkości startowe są znacznie niższe i wynoszą przykładowo 2,5 m/s, 2,0 m/s lub nawet 1,5 m/s. Prędkości wiatru wyższe lub równe tym prędkościom występowały na badanym obszarze odpowiednio przez 29%, 47% i 68% rozpatrywanego okresu. Jednak kierowanie się na etapie wyboru konkretnego rozwiązania wyłącznie wartością prędkości startowej jest dużym uproszczeniem i może prowadzić do błędnych decyzji, co zostanie omówione w dalszej części artykułu.

Należy ponadto zauważyć, że sprawność przetwarzania energii kinetycznej wiatru na energię mechaniczną ruchu turbiny, zależy nie tylko od prędkości strugi powietrza, ale także w bezpośredni sposób od jego gęstości. Wpływ zmian tego parametru jest jednak często pomijany, chociaż badania rzeczywistych układów pokazują, że dla takiej samej prędkości wiatru, przy gęstości powietrza różniącej się tylko o  $0,15 \text{ kg/m}^3$ , rozbieżność między osiąganymi sprawnościami może wynosić nawet do 10% [4,12]. Różnice tego rzędu mają już duże znaczenie z punktu widzenia inwestorów i powinny być wzięte pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o wyborze typu urządzenia i miejsca montażu. Obecnie w katalogach producentów turbin wiatrowych podawane są charakterystyki sporządzone tylko dla jednej, konkretnej wartości gęstości, ponadto często nie określone.

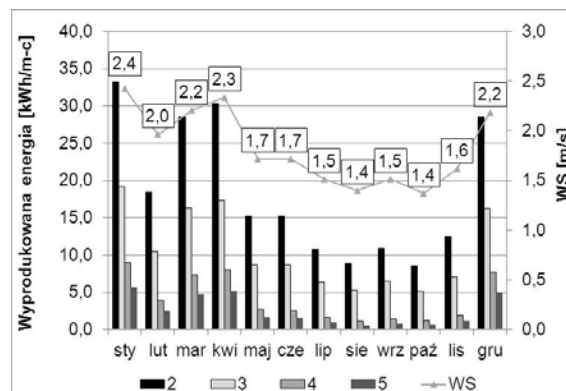
### Analiza danych

Porównanie spodziewanych osiągnięć turbin w kolejnych miesiącach pozwoliło wskazać najkorzystniejszy typ turbiny do montażu na badanym obszarze (rys. 6). Wśród turbin o pionowej osi obrotu najbardziej efektywnym rozwiązaniem byłaby turbina H-rotor z trzema łopatkami. Prędkość startowa turbiny wynosi 2,0 m/s, jednak nie jest to najniższa wartość wśród analizowanych typów. Na pracę przy prędkościach rzędu 1,5 m/s pozwalałaby konstrukcja stanowiąca połączenie turbiny typu Savonius'a oraz Darrieus'a, ale jak wynika z przeprowadzonych analiz sumaryczna energia wyprodukowana w badanych warunkach przez taki typ turbiny byłaby ponad pięciokrotnie niższa niż dla rozwiązania typu H-rotor.

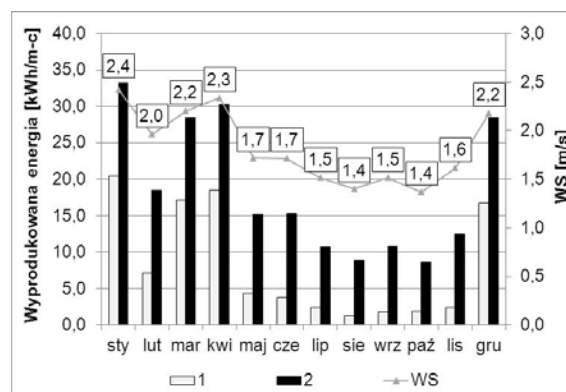
Decydujący wpływ na zasadność stosowania danej turbiny ma więc nie tylko sama wartość startowej prędkości wiatru, ale również przebieg charakterystyki turbiny. Zdecydowanie lepszym od prędkości startowej parametrem do porównania potencjalnych osiągnięć turbin podobnego typu, może być prędkość, przy której osiągana jest moc nominalna turbiny. W analizowanych przypadkach ilość energii elektrycznej, która byłaby wyprodukowana w ciągu roku przez daną turbinę o pionowej osi obrotu jest odwrotnie proporcjonalna do jej prędkości osiągnięcia mocy nominalnej.

W powyższej analizie wzięto pod uwagę wyłącznie turbiny o pionowej osi obrotu (rys. 6). Przeprowadzenie podobnych rozważań dla turbiny o poziomej osi obrotu, charakteryzującej się najniższą prędkością osiągnięcia mocy nominalnej, pokazuje, że rozwiązania te nie byłyby jednak najbardziej korzystne w badanych warunkach. Porównując dwie turbiny wiatrowe o podobnych parametrach nominalnych, dla których prędkości osiągnięcia mocy znamionowej wynoszą 9 m/s dla turbiny poziomej i 10 m/s dla pionowej, zastosowanie turbiny o pionowej osi obrotu pozwoliłoby w badanych warunkach na wyprodukowanie prawie dwukrotnie więcej energii elektrycznej niż przy zastosowaniu turbiny poziomej. Przy niskiej średniorocznej prędkości wiatru na badanym obszarze (rzędu 1,8 m/s), większego znaczenia nabiera w tym przypadku wartość prędkości startowej wynosząca 2,0 m/s dla porównywanej turbiny pionowej oraz 3,0 m/s dla turbiny poziomej (rys. 7).

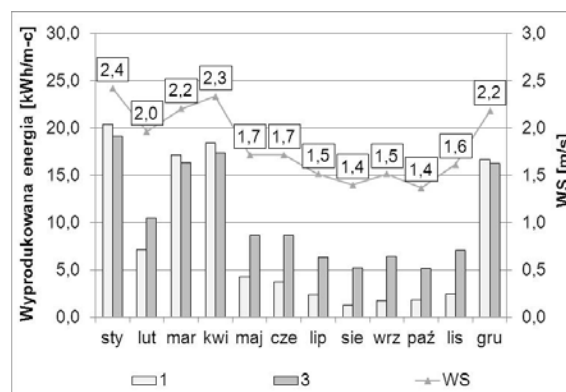
Również w innym przypadku, nawet niewielka różnica rzędu 0,5 m/s, pomiędzy startowymi prędkościami wiatru turbiny poziomej (3,0 m/s) i pionowej (2,5 m/s), nawet przy znacznej różnicy prędkości osiągnięcia mocy nominalnej tych turbin (pionowa 12 m/s, pozioma 9 m/s), daje korzystny efekt dla zastosowania turbiny pionowej. Zależność ta staje się bardzo wyraźna zwłaszcza w okresie letnim, kiedy średnie dobowe prędkości wiatru są niższe niż w miesiącach zimowych (rys.8).



Rys. 6. Energia wyprodukowana przez turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu (WS – prędkość wiatru)



Rys. 7. Energia wyprodukowana przez turbinę o pionowej i poziomej osi obrotu (WS – prędkość wiatru)



Rys. 8. Energia wyprodukowana przez turbinę o pionowej i poziomej osi obrotu (WS – prędkość wiatru)

Przedstawione powyżej porównanie turbin wiatrowych różnego typu pozwoliło wskazać rozwiązanie potencjalnie najbardziej korzystne dla badanych warunków. Nie oznacza to jednak, że stosowanie takich turbin jest uzasadnione pod względem ekonomicznym. W ciągu roku objętego badaniami, ilość wyprodukowanej energii elektrycznej dla najbardziej korzystnej konstrukcji turbiny pionowej wyniosłaby tylko 2,5% energii, która byłaby wyprodukowana

gdyby turbina pracowała przez cały czas z mocą nominalną. Dla pozostałych typów turbin, wartości te wynosiłyby od 0,3 do 1,1%. O opłacalności inwestycji można mówić natomiast dopiero wtedy, gdy wartość ta wynosiłaby ok. 40-50%. Uzyskanie wyników na tym poziomie byłoby możliwe, gdyby średnioroczna prędkość wiatru była równa prędkości osiągnięcia połowy mocy nominalnej turbiny. Dla pięciu typów analizowanych konstrukcji turbin wartości te odczytano z charakterystyk mocy elektrycznej poszczególnych urządzeń (tab. 1). Według tych danych prędkość wiatru pozwalająca dla finansowe zbilansowanie inwestycji w małą elektrownię wiatrową wynosiłaby 6,5 m/s dla turbin o poziomej osi obrotu, 8,0 m/s dla turbin typu H-rotor, wskazanej jako najbardziej korzystne rozwiązanie dla badanego obszaru oraz od 9,5 do 11,5 m/s dla pozostałych typów turbin pionowych.

### Podsumowanie

Lokalizacja turbin wiatrowych małych mocy w warunkach miejskich jest wymagającym zagadnieniem technicznym i logistycznym. Decyzja o wyborze typu i miejsca montażu turbiny powinna być poprzedzona weryfikacją lokalnych warunków wiatrowych oraz zgromadzeniem danych technicznych turbin w postaci charakterystyki określającej zależność mocy elektrycznej osiąganą przez turbinę od prędkości wiatru. Na badanym obszarze we Wrocławiu, średnioroczna prędkość wiatru wynosiła 1,8 m/s, co klasyfikuje badany teren jako mało korzystny dla energetyki wiatrowej. Większe możliwości wykorzystania niskich prędkości wiatru daje jednak stosowanie turbin o pionowej osi obrotu, charakteryzujących się znacznie niższą prędkością startową niż najbardziej popularne obecnie turbiny trzyłopatowe o wale poziomym. Jako najkorzystniejsze rozwiązanie dla badanych warunków wskazano turbiny pionowe typu H-rotor, charakteryzujące się niskimi prędkościami startowymi i jednocześnie stosunkowo niską prędkością osiągnięcia mocy nominalnej urządzenia.

Należy zauważyć, że prowadzone badania odnosiły się tylko do jednego roku, a biorąc pod uwagę dużą zmienność wiatru o charakterze losowym, nie można uważać tych danych za w pełni opisujące warunki wiatrowe na badanym terenie. Weryfikacja uzyskanych wyników będzie prowadzona w kolejnych latach zbierania pomiarów.

**Autorzy:** mgr inż. Aleksandra Cichoń, Politechnika Wroclawska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [aleksandra.cichon@pwr.edu.pl](mailto:aleksandra.cichon@pwr.edu.pl)

dr hab. inż. Paweł Malinowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [pawel.malinowski@pwr.edu.pl](mailto:pawel.malinowski@pwr.edu.pl)

dr inż. Wojciech Mazurek, Politechnika Wroclawska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [wojciech.mazurek@pwr.edu.pl](mailto:wojciech.mazurek@pwr.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Skoczkowski T., Kochański M., Some aspects of the growing penetration of wind energy in the Polish Power system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), n.8, 94-99
- [2] Popławski T., Problematyka prognoz generacji wiatrowej w KSE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.7, 119-122
- [3] Lorenc H., Struktura i zasoby wiatru w Polsce, IMGiW, (1996), Warszawa
- [4] Boczar T., Szczyrba T., Ocena wpływu warunków meteorologicznych na sprawność turbin wiatrowych, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 58 (2012), n.12, 1044-1047
- [5] Jarzyna W., Pawłowski A., Viktorich N., Technological development of wind energy and compliance with requirements for sustainable development, Polska Akademia Nauk, Komitet Człowiek i Środowisko, *Problemy ekorozwoju: studia filozoficzno-socjologiczne*, 9 (2014), n.1
- [6] Hau E., Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition, *Springer*, (2006), Berlin
- [7] Broda D., Barszcz T., Description of varying operational conditions in wind turbines, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, *Diagnostyka*, 60 (2011), n.4, 39-46
- [8] Lewandowski W., Proekologiczne odnawialne źródła energii, *Wydawnictwo WNT*, (2013), Warszawa
- [9] Piotrowski P., Analiza statystyczna danych mających wpływ na produkcję energii elektrycznej przez farmę wiatrową oraz przykładowe prognozy krótkoterminowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.3a, 161-164
- [10] Baczyński D., Piotrowski P., Prognozowanie dobowej produkcji energii elektrycznej przez turbinę wiatrową z horyzontem 1 doby, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.9, 113-117
- [11] Ostrowska-Bućko A., Zagospodarowanie energii wiatru przy użyciu małych turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 5 (2014), n.2, 65-72
- [12] Jąderko A., Kowalewski M.K., Wyznaczanie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), n.1, 148-151