

Kacper POLAK<sup>1</sup>, Marcin SIDZINA

Opiekun naukowy: Marcin SIDZINA<sup>2</sup>

## STANOWISKO DYDAKTYCZNE DO POMIARU PARAMETRÓW WYBRANYCH MODELI TURBIN WIATROWYCH

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badanie dwóch modeli turbin wiatrowych pod względem ich wydajności oraz osiąągów, przy różnych prędkościach wiatru i przy różnych obciążeniach generatora. Wykonano badania ukazujące wpływ liczby łopat wybranej turbiny wiatrowej na jej charakterystyki. Do porównania wybrano dwa modele turbin wiatrowych tj. turbiny pionowej (turbina konstrukcji Savoniusa) dla której przebadano wersje 2,3 i 4 łopat na wirniku a także turbiny poziomej (turbina śmigłowa) dla której również przebadano warianty z 2, 3 i 4 półcyklindrami.

**Słowa kluczowe:** turbiny wiatrowe, turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu, turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu

## TEACHING STATION FOR MEASURING PARAMETERS OF SELECTED WIND TURBINE MODELS

**Summary:** The article presents the study of two designs of wind turbines in terms of their efficiency and performance at different wind speeds and with different generator loads. Tests were performed showing the influence of the number of blades of the selected wind turbine on its characteristics. Two models of wind turbines were selected for comparison, i.e. a vertical turbine (Savonius turbine) for which the 2,3 and 4 blade versions on the rotor were tested, and a horizontal turbine (propeller turbine) for which variants with 2, 3 and 4 half-cylinders were also tested.

**Keywords:** wind turbines, wind turbines with a horizontal axis of rotation, wind turbines with a vertical axis of rotation

### 1. Wprowadzenie

Jednym z najczęściej omawianych sposobów ochrony środowiska jest stosowanie odnawialnych źródeł energii. Dzięki nim można bez zanieczyszczenia środowiska pozyskiwać np. energię elektryczną, którą potem można zastosować do innych celów. Do odnawialnych źródeł energii należą np. [6]:

---

<sup>1</sup> mgr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, kacper.96@o2.pl

<sup>2</sup> dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, msidzina@ath.bielsko.pl

Energia Słoneczna (Energia promieniowania słonecznego),

- stosowana w produkcji ciepła np. za pomocą paneli solarnych,
- stosowana w produkcji energii elektrycznej za pomocą paneli fotowoltaicznych.

Energia Wodna,

- pozyskiwanie energii elektrycznej odbywa się poprzez zamianę energii kinetycznej płynącej wody, na energię mechaniczną na turbinie a następnie poprzez generator w energię elektryczną.

Energia Biomasy,

- jest to energia pozyskiwana z materii organicznej, czyli z substancji pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają rozkładowi.

Energia Geotermalna ,

- jest to energia cieplna zgromadzona przez np. wody, grunty oraz składy pod powierzchnią ziemi, zbyt duże jej zużycie może prowadzić do wychłodzenia.

Energia Wiatrowa,

- pozyskiwanie energii elektrycznej odbywa się przez zamianę energii kinetycznej przepływającego wiatru na energię mechaniczną, dzieje się to dzięki specjalnie zaprojektowanym łopatom turbin wiatrowych. Obracające się łopaty turbiny, wprawiają w ruch generator, który zamienia energię mechaniczną na energię elektryczną,
- istnieje wiele różnych konstrukcji turbin wiatrowych, a to która za nich będzie bardziej wydajna i opłacalna zależy od wielu czynników, głównym czynnikiem jest wietrzność terenów na których mają powstać turbiny.

Celem prac było porównanie charakterystyk dwóch różnych konstrukcji turbin wiatrowych. Aby zrozumieć ich zasadę działania, należało wyjaśnić zasadę powstawania tego co je napędza, tzn. energii wiatru.

Energia wiatru jest ściśle związana z energią promieniowania słonecznego i powstaje poprzez ruch mas powietrza, który jest spowodowany nagrzewaniem się mas powietrza, co wpływa na zmianę ich gęstości. Powoduje to przemieszczenie się nagrzanego powietrza o mniejszej gęstości ku górze, a w jego miejsce przemieszczenie się masy powietrza zimniejszego o mniejszej gęstości. Na kierunki przemieszczania się mas powietrza mają również wpływ prądy morskie oraz ruch wirowy ziemi czyli efekt siły Coriolisa.

Szacuje się, że możliwości wykorzystania energii wiatrów wiejących nad powierzchnią lądów odpowiadają mocy 40 TW, zaś możliwość wykorzystania wiatrów nad otwartymi morzami 20 TW. Mniejsze możliwości wykorzystania energii wiatru wiejącego nad morzami wynikają głównie z problemów ze statecznością instalowanych tam turbin wiatrowych oraz problemami z ich zakotwiczeniem co przekłada się na ich wielkość oraz wysokość. [1]

## 2. Zależności opisujące energię wiatru

Energia wiatru zależy od wielu czynników, przede wszystkim jest to jej prędkość wpotędze trzeciej (prawo Betza) zależna od wysokości do poziomu gruntu oraz ukształtowania terenu. Znając charakterystykę na danych terenach, można określić ile energii można wydobyć za pomocą danej turbiny wiatrowej. Prędkość wiatru ( $V_0$ ), która napiera na łopaty turbiny wiatrowej ulega zmniejszeniu do prędkości ( $V_s$ ), bezpośrednio za łopatom i dalej do wartości ( $V_k$ ). Dzieje się to wskutek przekazania

części energii na łopaty. Taka sama analogia dotyczy ciśnienia przed i za turbiną. Ciśnienie przed turbiną ( $p'$ ) zmniejsza się do ciśnienia ( $p''$ ) za turbiną. Z różnicy prędkości wiatru oraz ze spadku ciśnienia wynika praca użyteczna turbiny. Prędkość przepływu powietrza przez samą turbinę, możemy policzyć ze wzoru[-1] :

$$v_s = \frac{v_0 + v_k}{2} \quad (1)$$

Moc użyteczna którą jesteśmy w stanie pozyskać ze strumienia przepływającego przez turbinę wiatrową jest różnicą energii kinetycznej tego strumienia przed i za łopatom turbiny, możemy ją policzyć ze wzoru [-1]:

$$P_u = Q\rho \frac{v_0^2 - v_k^2}{2} = A_s v_s \rho \frac{v_0^2 - v_k^2}{2} = A_s \frac{v_0 + v_k}{2} \rho \frac{v_0^2 - v_k^2}{2}$$

$$P_u = \frac{1}{4} A_s \rho (v_0^3 - v_0 v_k^2 + v_0^2 v_k - v_k^3) \quad (2)$$

Gdzie :

- $Q$  – objętość [ $m^3$ ],
- $\rho$  – gęstość [ $kg/m^3$ ],
- $v_0$  – prędkość powietrza przed wirnikiem [ $m/s$ ],
- $v_k$  – prędkość powietrza za wirnikiem [ $m/s$ ],
- $A_s$  – powierzchnia wirnika [ $m^2$ ],
- $v_s$  – prędkość powietrza w wirniku [ $m/s$ ],
- $P_u$  – Moc [ $W$ ].

Maksimum mocy którą można pobrać od strumienia wiatru o prędkości ( $V_0$ ), dzięki turbinie wiatrowej o powierzchni wirnika ( $A_s$ ), wg. [-1] może być określona z zależności:

$$\frac{dP_u}{dv_k} = 0$$

$$\frac{dP_u}{dv_k} = \frac{1}{4} A_s (-2v_0 v_k + v_0^2 - 3v_k^2) = 0$$

Przyjmuje się  $v_k = \frac{v_0}{3}$

$$P_{u,max} = \frac{8}{27} A_s \rho v_0^3 = \frac{2\pi}{27} D_s^2 \rho v_0^3 \quad (3)$$

Gdzie :

- $D_s$  – średnica wirnika [ $m$ ].

Ważną rolę odgrywa także temperatura, ponieważ jej spadek przy stałym ciśnieniu atmosferycznym powoduje wzrost gęstości powietrza w toczeniu turbiny, a to z kolei skutkuje wzrostem energii kinetycznej strugi powietrza przepływającego przez wirnik.

Natomiast wzrost temperatury przy stałym ciśnieniu oddziałuje odwrotnie, gęstość powietrza spadnie wraz z energią kinetyczną strugi.

To samo tyczy się ciśnienia powietrza w danym rejonie, wzrost ciśnienia przy stałej temperaturze powoduje zwiększenie się energii kinetycznej a spadek ciśnienia jej zmniejszenie.

### 3. Rodzaje i charakterystyki turbin wiatrowych

Turbina wiatrowa – jest urządzeniem zmieniającym energię kinetyczną wiatru przepływającego przez jej łopaty na pracę, w postaci obracającego się z różnym momentem obrotowym wirnika. Wirnik poprzez przekładnię połączony jest z generatorem, dzięki któremu wytwarzana jest energia elektryczna [5].

Turbiny wiatrowe można podzielić np. według położenia osi wirnika na [4] :

Turbiny o poziomej osi obrotu, oś obrotu jest równoległa do kierunku przepływu wiatru. Turbiny o pionowej osi obrotu, oś obrotu prostopadle do kierunku przepływu wiatru w tym turbiny:

- bębnowa,
- karuzelowa,
- rotorowa (Savoniusa).

Rozróżnia się także następujące typy turbin wiatrowych [1]:

- wolnobieżne –  $z < 1,5$  (Należą do nich np. turbiny bębnowe, karuzelowe, rotorowe),
- średnobieżne –  $1,5 > z > 3,5$  (Turbiny wielopłatowe),
- szybkobieżne –  $z > 3,5$  (Pnemonydarrieusa, turbiny śmigłowe).

### 4. Wybrane modele turbin

W powyższym artykule wybrano do porównania dwa modele turbin, model turbiny o poziomej osi obrotu oraz model turbiny o pionowej osi obrotu. Dla danego modelu turbiny porównywano efektywność pracy w zależności od liczby płatów (ramion) czy cylindrów dla poszczególnych rodzajów turbin.

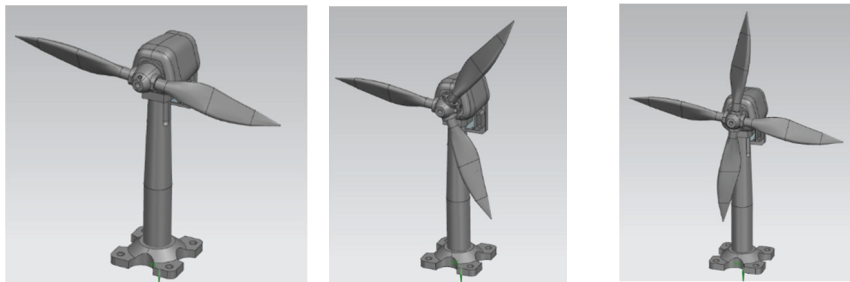


Rysunek 1. Fizyczny model turbiny wiatrowej, po lewej o poziomej osi obrotu, po prawej o pionowej osi obrotu

Każdy z wybranych modeli turbin posiadał możliwość założenia na wał obrotowy, wirnika różnej liczby łopat lub cylindrów od 2 do 4. Obie turbiny wiatrowe zostały zaprojektowane w programie CAD a następnie wydrukowane na drukarkach 3D.

#### 4.1. Turbina wiatrowa o osi poziomej

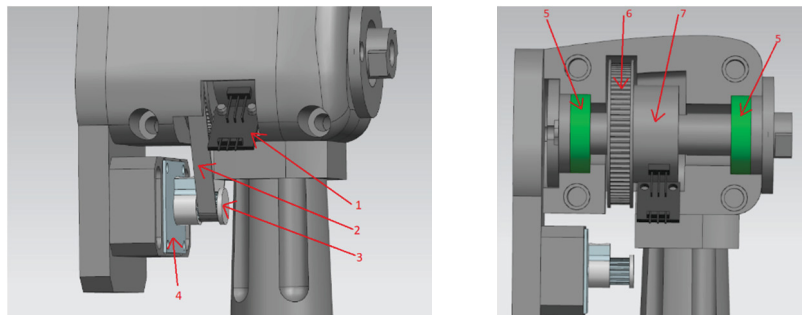
Pierwszym modelem, na którym zostały przeprowadzone badania była turbina o osi poziomej. Została ona zaprojektowana w 3 wariantach (Rys. 2). W celu minimalizacji kosztów, główna konstrukcja turbiny została wykonana jako wspólna dla każdego z wariantów, natomiast zmiana liczby łopatek następuje poprzez nakładanie nowego wirnika na wał turbiny.



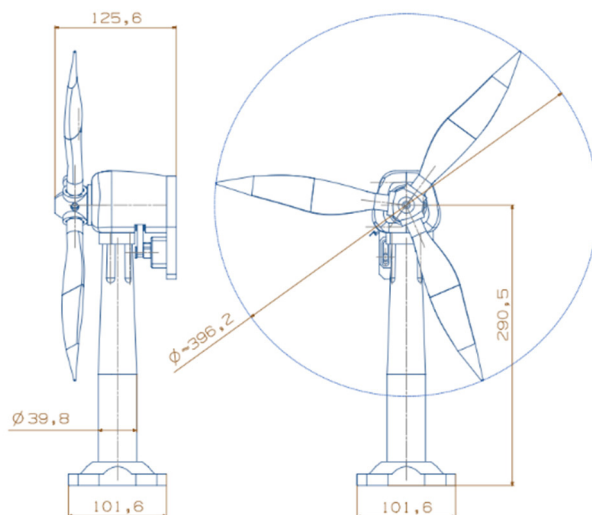
Rysunek 2. Trzy rodzaje turbin o poziomej osi obrotu, od lewej dwułopatowa, trzyłopatowa i czterłopatowa

Jak widać na (Rys. 3), koniec wału na który zakładane są poszczególne wirniki posiada zamek, który zapewnia obrót wału razem z obracającymi się łopatom, dodatkowo wał turbiny zakończony jest otworem, w którym znajduje się nitonakrętka. Zapewnia ona odpowiednie przymocowanie wirnika do wału za pomocą śruby. Na rysunku zaznaczono istotne elementy badanej turbiny wiatrowej

- 1 – jest to czujnik Halla KY-003, służący do zliczania obrotów wału turbiny,
- 2 – pasek zębaty zamknięty GT2, służy do przeniesienia obrotów wału turbiny na wał generatora,
- 3 – koło zębate generatora, liczba zębów :  $Z = 30$ ,
- 4 – generator turbiny, dane techniczne generatora zostały podane poniżej,
- 5 – łożysko kulkowe NKE 15x28x7, 61902,
- 6 – koło zębate na wale turbiny, ilość zębów :  $Z = 80$ ,
- 7 – wał turbiny.



Rysunek 3. Głowica turbiny wiatrowej



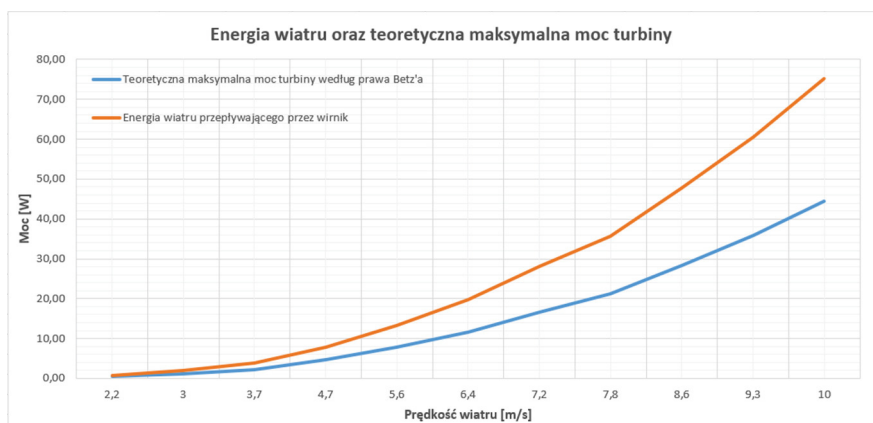
Rysunek 4. Podstawowe wymiary zaprojektowanej turbiny o poziomej osi obrotu

Dla przedstawionego modelu wyliczono teoretyczną moc turbiny dla zadanej prędkości wiatru. Obliczenia wykonano na podstawie prawa Betz'a (bez uwzględniania liczby łopat oraz sprawności mechanicznej) [-1], do obliczeń przyjęto następujące parametry :

- gęstość powietrza :  $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ ,
- średnica wirnika :  $0,3962 \text{ m}$ ,
- prędkość wiatru przed wirnikiem  $1-11 \text{ m/s}$ ,
- powierzchnia wirnika :  $A_s = \pi r^2 = 3,14 * 0,1981^2 = 0,123225 \text{ m}^2$ ,
- sprawność przepływowa : przyjęto  $\eta_p = 0,593$ .

$$P_v = A_s \rho v_0^3 0,5 \quad (4)$$

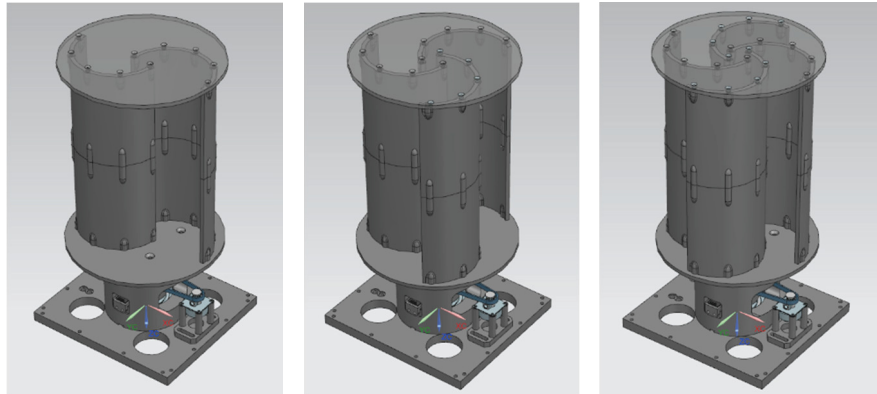
$$P_{u,max} = A_s \rho v_0^3 0,5 \eta_p \quad (5)$$



Rysunek 5. Wykres teoretycznej mocy turbiny o poziomej osi obrotu, zależnej od prędkości wiatru

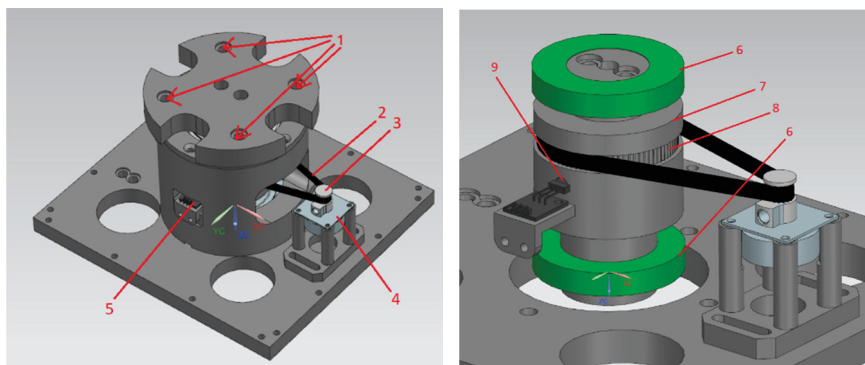
#### 4.2. Turbina wiatrowa o osi pionowej (SAVONIUSA)

Drugim modelem turbiny, dla którego zostały przeprowadzone badania była turbina o osi pionowej. Turbinę tą zaprojektowano w 3 wariantach, pokazanych na (Rys. 6). W celu minimalizacji kosztów, główna konstrukcja turbiny została wykonana jako wspólna dla każdego z trzech wariantów, natomiast zmiana ilości półcyldrów (łopat), następuje poprzez nakładanie nowego wirnika na wał turbiny.



Rysunek 6. Trzy rodzaje turbin o pionowej osi obrotu, od lewej z dwoma półcyldrami, trzema półcyldrami oraz czterema półcyldrami

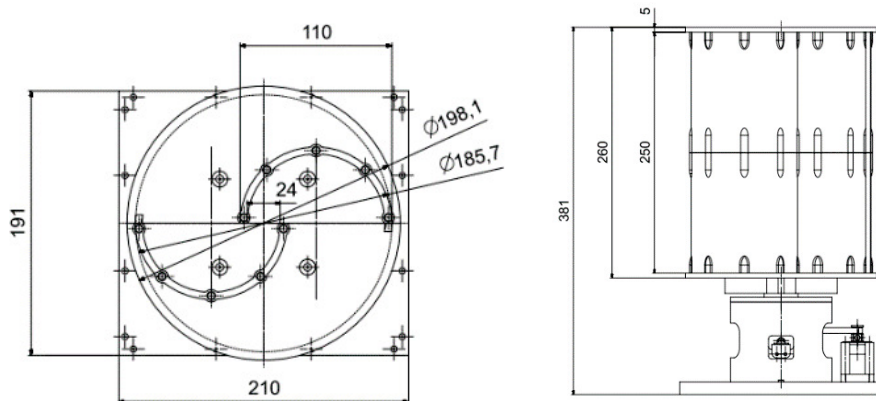
Podstawowe elementy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu przedstawiono na kolejnym rysunku.



Rysunek 7. Elementy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu

- 1 - otwory z nitonakrętką, wykorzystywane do mocowania wirnika na konstrukcji,
- 2 - pasek zębaty zamknięty GT2, służy do przeniesienia obrotów wału turbiny na wał generatora,
- 3 - koło zębate generatora, ilość zębów :  $Z = 30$ ,
- 4 - generator turbiny, dane techniczne generatora zostały podane w pkt,
- 5 - jest to czujnik Halla KY-003, służący do zliczania obrotów wału turbiny,
- 6 - łożysko kulkowe FAG, 30x55x9 C3, 16006,

- 7 - wał turbiny,
- 8 – koło zębate na wale turbiny, ilość zębów :  $Z = 80$ ,
- 9 – magnes, jest on wtopiony w wał i służy do zliczania obrotów wraz z czujnikiem HALLA.



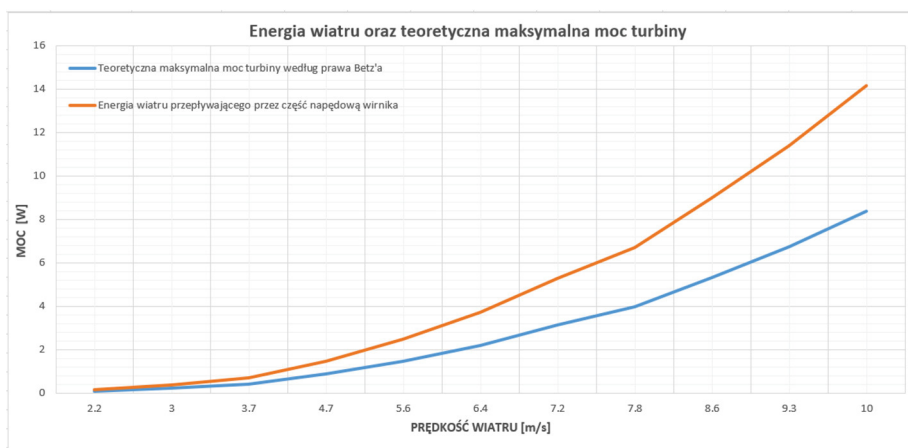
Rysunek 8. Podstawowe wymiary zaprojektowanej turbiny o pionowej osi obrotu

Podstawowe dane oraz teoretyczna możliwa do uzyskania moc (bez uwzględniania liczby łopatek oraz sprawności mechanicznej) wg. [4] została obliczona dla przyjętych parametrów :

- gęstość powietrza :  $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ ,
- promień wirnika :  $0,09285 \text{ m}$ ,
- prędkość wiatru przed wirnikiem  $1-10 \text{ m/s}$ ,
- wysokość wirnika :  $H = 0,25 \text{ m}$ ,
- Sprawność przepływowa : przyjęto  $\eta_p = 0,593$ .

$$P_v = A_s \rho v_0^3 0,5$$

$$P = \rho R H v^3 0,5 \eta_p \quad \text{Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.}$$

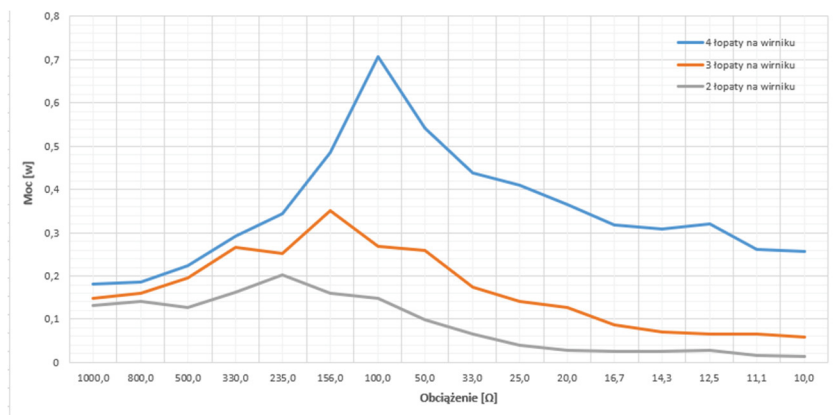


Rysunek 9. Wykres teoretycznej mocy turbiny o pionowej osi obrotu, zależnej od prędkości wiatru

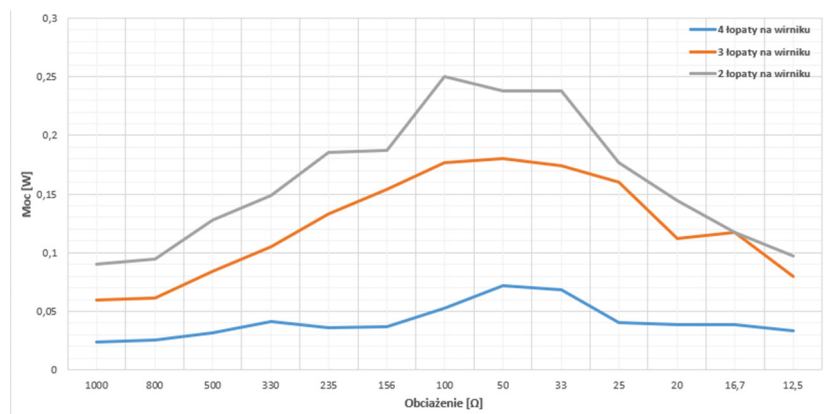


## 5. Uzyskane wyniki

W ramach pracy wykonano szereg badań na zaprojektowanych modelach turbin wiatrowych. W pierwszej kolejności wykonano badania na nieobciążonych modelach o poziomej i pionowej osi obrotu. Badania zostały wykonane w każdym z omawianych wariantów. Odczyt wartości prędkości obrotowej był rejestrowany w aplikacji Arduino. Podczas wykonywania badań mających na celu wyznaczenie prędkości obrotowej wirników turbin wiatrowych, mierzono równocześnie prędkość wiatru za łopatkami, co później pozwoliło na wyliczenie sprawności przepływowej badanych urządzeń. W ten sam sposób wykonano badania dla turbin wiatrowych obciążonych generatorem, obciążenie uzyskano za pomocą rezystorów, które kolejno dopinano do układu. Na podstawie uzyskanych wyników otrzymano charakterystyki mocy turbiny poziomej i pionowej przy zadanej prędkości wiatru.



Rysunek 10. Charakterystyka mocy turbiny poziomej dla prędkości wiatru 10[m/s]



Rysunek 11. Charakterystyka mocy turbiny pionowej dla prędkości wiatru 10[m/s]

Poniżej, przedstawiono maksymalną moc którą zarejestrowano podczas badań dla badanych modeli turbin wiatrowych o pionowej i poziomej osi obrotu, przy prędkości wiatru 10 [m/s]:

- wirnik o poziomej osi obrotu, 4-łopatowy : 0,7 [W],
- wirnik o poziomej osi obrotu, 3-łopatowy : 0,35 [W],
- wirnik o poziomej osi obrotu, 2-łopatowy : 0,2 [W],
- wirnik o pionowej osi obrotu, 4-łopatowy : 0,07 [W],
- wirnik o pionowej osi obrotu, 3-łopatowy : 0,18 [W],
- wirnik o pionowej osi obrotu, 2-łopatowy : 0,25 [W].

## 6. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone na modelach turbin wiatrowych badania pomogły w zrozumieniu ich budowy, jej złożoności oraz wrażliwości na błędy konstrukcyjne. Pozwoliły też na zrozumienie w jaki sposób określać sprawność pełnowymiarowych turbin wiatrowych na podstawie badań przeprowadzonych na ich przeskalowanych modelach.

Zauważono że w zakresie prędkości wiatru jaki był wykorzystany do badań, największą moc uzyskano na modelu z wirnikiem poziomym na którym znajdowały się cztery łopaty. Biorąc pod uwagę obliczenia współczynnika szybkobieżności oraz sprawności przepływowej dla badanych turbin zauważono zgodność wyników uzyskanych podczas badań. Wszystkie modele badane były w małym zakresie współczynnika szybkobieżności, w którym największą sprawność przepływową uzyskał model o osi obrotowej poziomej, 4- łopatowa.

## LITERATURA

1. EWA GLUGMANN-RADZIEMSKA E., LEWANDOWSKI W.M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwo naukowe PWN, 2017.
2. HAU E.: Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer, 2005.
3. SCHAFARCZYK A.P.: Introduction to wind turbine aerodynamics, Springer London, 2016.
4. JAGODZIŃSKI W.: Silniki wiatrowe, PWT, Warszawa 1959.
5. Poradnik inżyniera mechanika, tom II, WNT Warszawa 1969.
6. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2015 poz. 478, Warszawa, 3 kwietnia 2015.