

POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
UL. NADBYSTRZYCKA 36, 20-618 LUBLIN



**Badania numeryczne CFD turbiny wiatrowej
o poziomej osi obrotu z dyfuzorem o regulowanym
położeniu łopat**

Wykonał:

mgr inż. Zbigniew Czyż

Lublin 27.12.2018 r.

Streszczenie

Raport przedstawia wyniki badań zespołu wirnika turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu. Wirnik ten został wyposażony w dyfuzor pełniący integralną część zespołu generującego moc. Badania zostały przeprowadzone w oparciu o oprogramowanie ANSYS Fluent. Geometria użyta do badań stanowi wersję rozwojową konstrukcji przedstawionej w zgłoszeniu patentowym PL 412553 i cechuje się regulowanym ustawieniem kąta łopat wirnika. Model geometryczny uzyskano poprzez skanowanie 3D rzeczywistego wirnika przy użyciu skanera ZScanner[®]700. Obliczenia przeprowadzono dla wybranych kątów ustawienia łopat w zakresie od 0° do 90° odrębnie dla wersji z dyfuzorem i bez dyfuzora. Na podstawie przeprowadzanych badań wykonano charakterystyki mocy generowanej przez turbinę w funkcji prędkości obrotowej wirnika. Dodatkowo zbadano wpływ dyfuzora na moc generowaną przez cały zespół wirnika.

1. Wprowadzenie

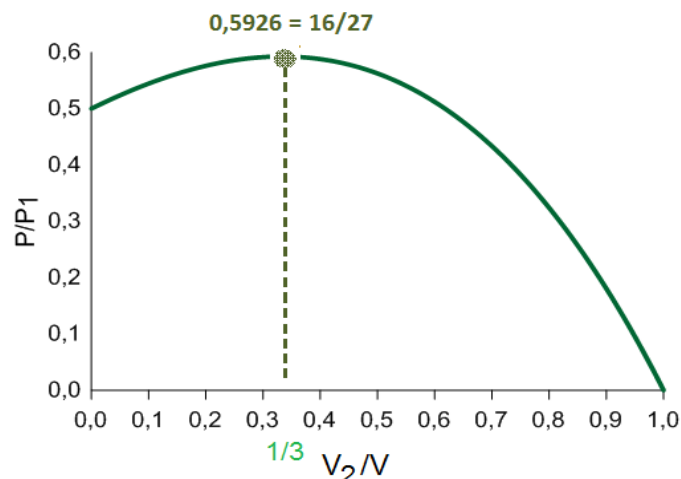
Coraz większą popularność na całym świecie zyskują odnawialne źródła energii, w tym energetyka wiatrowa. Z raportu "New Energy Outlook" opracowanego przez Bloomberg wynika, że na ten rodzaj energetyki w najbliższych 25 latach przeznaczonych zostanie 7,8 bln dolarów, zaś koszt uzyskania jednostki energii z wiatru spadnie do 2050 r. o 58% [1].

Wiatr jest odnawialnym źródłem energii. Jest to ruch powietrza spowodowany różnicą gęstości ogrzanych mas powietrza i przemieszczaniem ich ku górze. Powoduje to różnicę ciśnień, a naturalna tendencja do ich wyrównywania powoduje powstawanie wiatru. Energia wiatru stanowi jeden z zasobów geofizycznych i jest to energia pochodzenia słonecznego. Słońce ogrzewa nierównomiernie masy powietrza atmosferycznego, wywołując tym samym ich przemieszczanie się od stref cieplejszych do zimniejszych. Ocenia się, że ok. 12% energii docierającej ze Słońca na Ziemię jest zamieniane na energię kinetyczną mas powietrza, czyli szacunkowo stanowi to ok. 2700 TW. Jednak tylko 25% tej energii przypada na warstwę atmosfery w bezpośredniej bliskości powierzchni naszej planety. Przyjmuje się, że możliwa do technicznego wykorzystania warstwa sięga do 100 m ponad powierzchnię Ziemi. Energia ta nie jest równomiernie rozłożona, co uwarunkowane jest ruchem obrotowym Ziemi z zachodu na wschód (wywołujący ruch mas powietrza przy powierzchni ziemi ze wschodu na zachód) oraz istnienie siły Coriolisa. Powodują one powstanie wirów rotacyjnych w troposferze.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na rozłożenie energii jest promieniowanie słoneczne pochłaniane przez podłoże w niejednorodnym stopniu powoduje powstawanie gradientu temperatur, co w konsekwencji wywołuje ruch mas powietrza.

Do pozyskiwania energii z wiatru oprócz wielkoskalowych farm wiatrowych możliwe jest wykorzystanie przydomowych turbin wiatrowych o małych i średnich mocach [2]. Podstawowym kryterium podziału turbin jest podział ze względu na położenie osi obrotu. Wyróżnia się turbiny z pionową i poziomą osią obrotu. W pracy [16] przedstawiono porównanie tych dwóch rozwiązań konstrukcyjnych ze zwróceniem uwagi na ich wady i zalety. Analizę sprawności współczesnej turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu przedstawiono w pracy [18]. Zwrócono uwagę na rozwiązania konstrukcyjne wpływające na sprawność aerodynamiczną turbiny, moment rozruchowy wirnika, a także przedstawiono aspekty wymagające dalszych badań. Istotne jest usytuowanie turbiny w taki sposób, aby zewnętrzne obiekty wokół wirnika tworzyły dla niego naturalny dyfuzor, którego zadaniem jest przyspieszanie powietrza trafiającego na wirnik. Przyspieszenie powietrza ma na celu wzrost mocy generowanej z urządzenia o tej samej powierzchni czynnej. Możliwe jest również wyposażenie turbiny w specjalnie zaprojektowany zewnętrzny dyfuzor. Takie rozwiązanie zastosowali autorzy pracy [8], w której na drodze symulacji i eksperymentu badano turbinę wyposażoną w dyfuzor w postaci tuby. Autorzy pracy [12] wykorzystali tunel aerodynamiczny w celu znalezienia optymalnego kształtu dyfuzora. Wpływ dyfuzora na osiągi małej turbiny wiatrowej badano również w niniejszej pracy.

Zgodnie z prawem Betza teoretyczna maksymalna sprawność turbiny wiatrowej wynosi 59%. Gdybyśmy chcieli odzyskać całą energię, jaką niesie wiatr, powietrze nie mogłoby opuścić wirnika. Nie uzyskalibyśmy wtedy jednak żadnej energii, gdyż powietrze nie mogłoby również wpaść w obszar wirnika. Okazuje się, że najbardziej efektywna jest turbina, która spowalnia wiatr do $\frac{2}{3}$ jego początkowej prędkości. Aby to zrozumieć musimy sięgnąć do podstawowego prawa aerodynamiki turbin wiatrowych - prawa Betz'a.



Rys. 1.1. Wykres Betz'a

Silnik wiatrowy, jakim jest turbina wiatrowa nie może przekształcić całej energii wiatru na energię mechaniczną. Teoretycznie maksymalny współczynnik wykorzystania energii wiatru przez wirnik wynosi około 0,59 (wg wykresu Betza). Największą sprawność uzyskuje się, gdy prędkość przepływu strumienia powietrza przez wirnik wynosi $V_1 = 2/3 \cdot V$ zaś prędkość powietrza za wirnikiem $V_2 = 1/3 \cdot V$.

gdzie: A – powierzchnia poprzeczna do kierunku wiatru w [m^2],

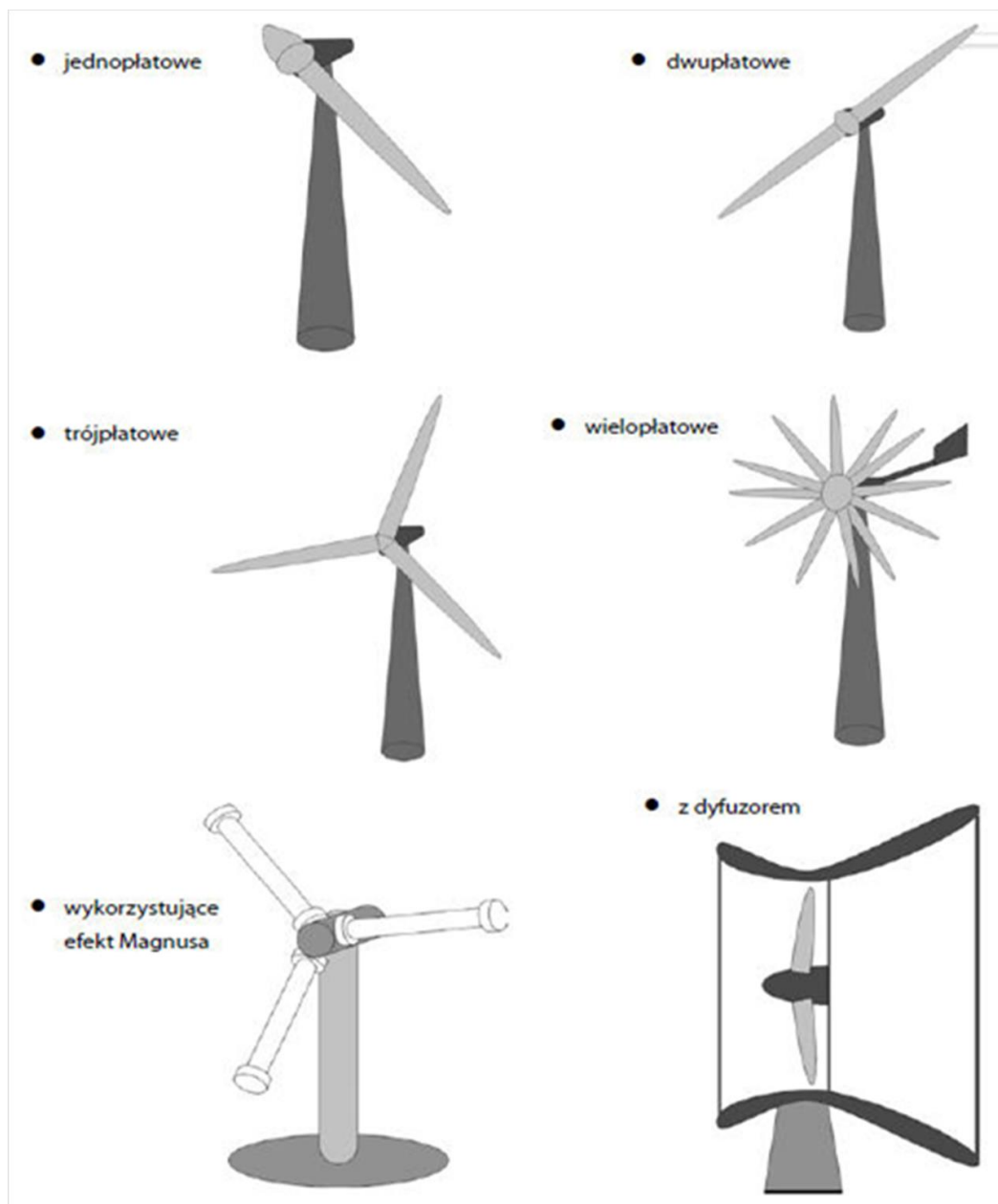
ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],

V – prędkość wiatru [m/s],

t – czas przepływu wiatru przez powierzchnię A [s]

Wielkość energii, jaką można uzyskać z wiatru w danym rejonie, określa potencjał energetyczny wiatru dla prędkości powyżej 4 m/s. Badania IM i GW wykazały, że powierzchnia Polski, posiadająca korzystne warunki wiatrowe dla instalowania elektrowni wiatrowych, wynosi ok. 60 000 km^2 , przy czym na siłownie i farmy wiatrowe może być przeznaczonych ok. 3 000 km^2 .

Turbiny wiatrowe z silnikiem o poziomej osi obrotu wirnika – HAWT posiadają tradycyjne „śmigła” o ilości łopat zależnej od wizji projektanta. Spotyka się głównie wirniki jedno-, dwu-, trzyłopatowe. Buduje się również siłownie z większą ilością łopat. Obecnie siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu stanowią około 95 % rozwiązań dostępnych na rynku.



Rys. 1.2. Rodzaje turbin z poziomą osią obrotu [25].

Prowadzone dotychczas badania nad turbinami wiatrowymi mają na celu zwiększenie ich sprawności oraz zmniejszenie kosztu jednostkowego uzyskiwanej energii. Oba wymienione cele realizowane są poprzez optymalizację aerodynamiczną, konstrukcyjną oraz materiałową. W publikacji [17] przedstawiono jak stopień zaawansowania konstrukcji turbin wiatrowych może zwiększyć wartość ekonomiczną energii elektrycznej wytwarzanej przez wiatr. W pracy [9] szeroko przedstawiono metody optymalizacji wydajności turbin wiatrowych. Przykładem pracy, w której opisano metodę zwiększenia sprawności małej turbiny wiatrowej poprzez zastosowanie dodatkowych kondensatorów jest publikacja [4]. W pracy [6] zaprezentowano numeryczną optymalizację kształtu łopatek małej turbiny wiatrowej z wykorzystaniem ewolucji różnicowej (differential evolution), zaś w pracy [7] przedstawiono

optymalizację z wykorzystaniem modelu łopaty utworzonego w oparciu o teorię Blade Element Momentum. Teorię tę wykorzystano również w pracy [22] aby zoptymalizować rozkład cięciwy i kąta skreśłu małej łopaty turbiny wiatrowej i zmaksymalizować jej roczną produkcję energii. Przy optymalizacji łopat wykorzystywane są również algorytmy genetyczne ze względu na zwiększoną szybkość i dokładność obliczeń [10, 11]. Dwa różne podejścia zastosowali autorzy pracy [20] w badaniach łopat turbiny wiatrowej podczas testów momentu rozruchowego. W pracy [21] przedstawiono wielokryterialną optymalizację łopaty turbiny wiatrowej pod kątem poprawy sprawności i zmniejszenia hałasu.

Badania aerodynamiczne turbin wiatrowych mogą być prowadzone na drodze symulacyjnej z wykorzystaniem metody CFD lub na drodze eksperymentalnej z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego. Oba podejścia zastosowali autorzy pracy [3], w której badano turbinę wiatrową o pionowej osi obrotu. W wyniku badań uzyskano charakterystyki momentu obrotowego oraz mocy w funkcji prędkości obrotowej wirnika. W pracy [5] przedstawiono podstawowe parametry pracy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu w funkcji czasu uzyskane na drodze obliczeń numerycznych. Podobne badania przedstawiono w artykule [15], w którym wyniki badań małej turbiny o pionowej osi obrotu wykonanych w tunelu aerodynamicznym zestawiono z wynikami numerycznymi uzyskanymi w oparciu o trójwymiarowy model CFD.

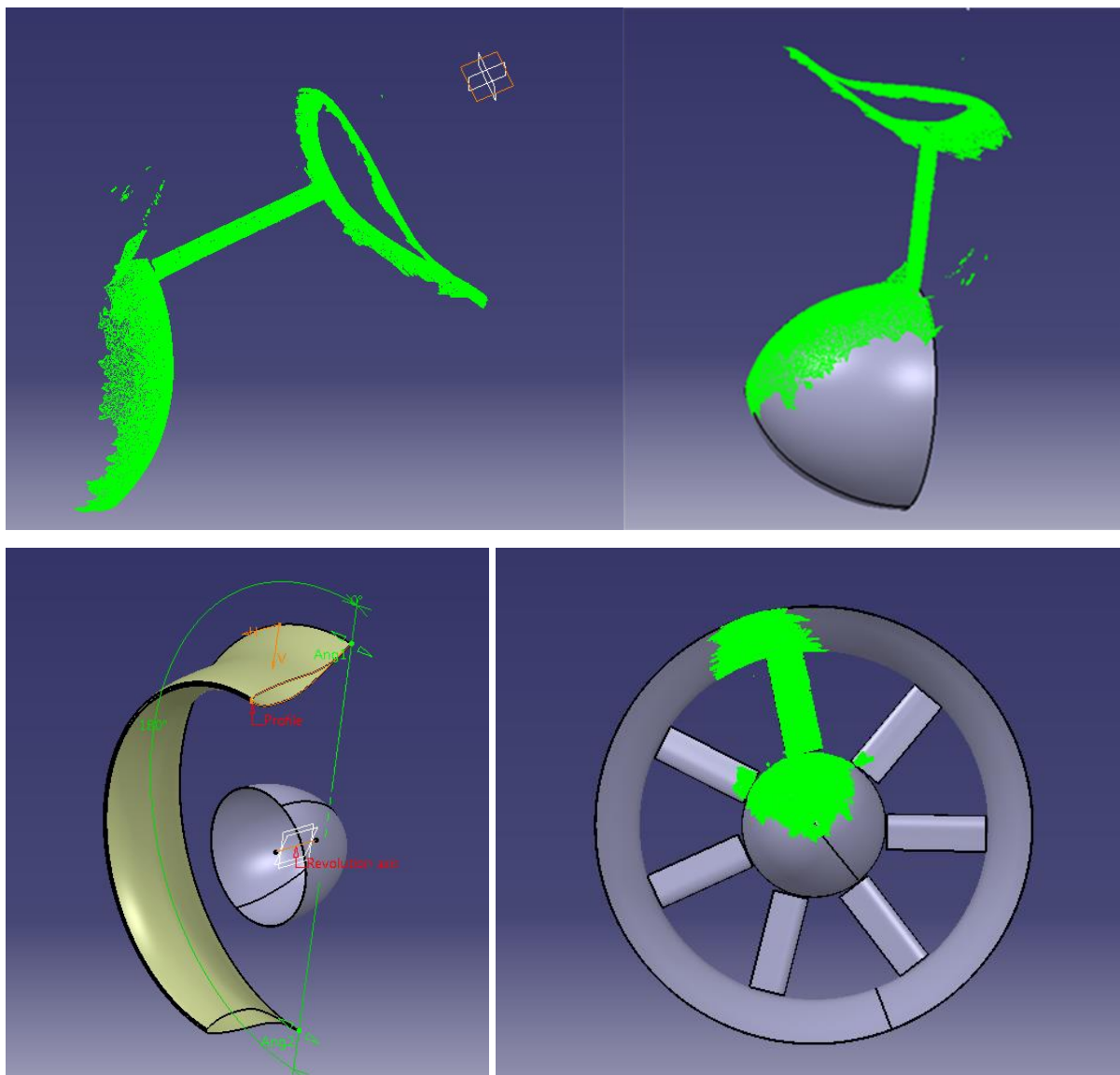
Autorzy pracy [13] szerokiej analizie poddali przepływ przez wirnik turbiny wiatrowej o poziomej osi napędowej z uwzględnieniem wirów. Tematem zawirowania powietrza od wirnika zajmowali się również autorzy pracy [14], którzy opracowali model numeryczny trójwymiarowego pola przepływu wokół badanej turbiny, zaś autorzy publikacji [19] przedstawili nowy analityczny model służący do określenia rozkładu prędkości wiatru w otoczeniu wirnika.

Celem niniejszego raportu było zbadanie małej turbiny wiatrowej wyposażonej w zewnętrzny dyfuzor w postaci pierścienia. Analizie poddano wpływ zastosowania dyfuzora na sprawność turbiny i generowaną moc w zależności od jej obciążenia.

2. Obiekt badawczy i metodologia

Obiekt badawczy został przygotowany w oparciu o skanowanie 3D rzeczywistej konstrukcji zespołu wirnika turbiny wiatrowej. Obiekt użyty do badań stanowi wersję

rozwojową konstrukcji przedstawionej w zgłoszeniu patentowym PL 412553 i cechuje się regulowanym ustawieniem kąta łopat wirnika. Do skanowania 3D użyto laserowego skanera ZScanner ®700. Technologię skanowania trójwymiarowego przy użyciu tego urządzenia opisano szczegółowo w pracach [23] oraz [24] (rys. 2.1).



Rys. 2.3. Proces generowania modelu geometrycznego w oparciu o chmurę punktów

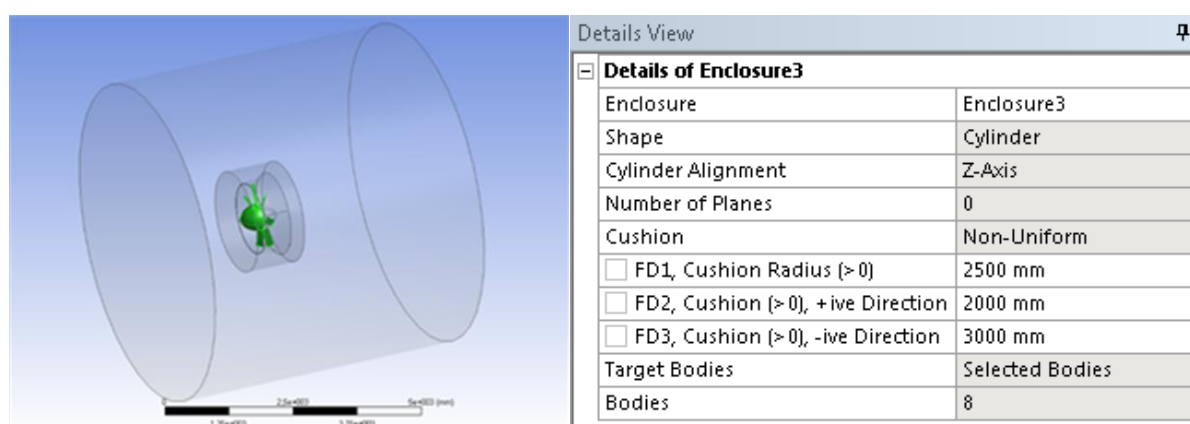
Na rysunku 2.1 przedstawiono widok chmury punktów zeskanowanej części zespołu wirnika turbiny wraz z kolejnymi etapami wykonania modelu geometrycznego. W pracy [23] opisano metodologię wykonania modelu geometrycznego w oparciu o chmurę punktów. Przy założeniu, że jest to obiekt osiowo symetryczny możliwe było wykonanie modelu w oparciu o skan tylko części wirnika. Model geometryczny został przygotowany w programie CATIA V5.

Średnica zespołu wirnika turbiny w wersji bez dyfuzora wynosi 1,29 m podczas gdy z dyfuzorem 1,64 m. Oprócz prędkości powietrza v oraz jego gęstości ρ pole powierzchni

czynnej A zespołu wirnika jest istotnym składnikiem mocy P generowanej z energii wiatru (1).

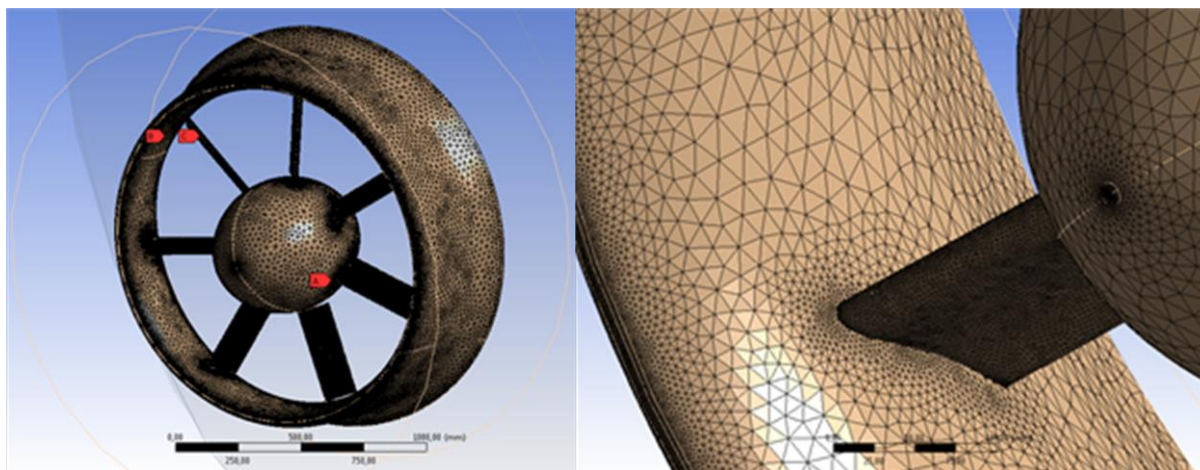
$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Pole powierzchni A dla wersji bez dyfuzora wynosi zatem tylko $1,3 \text{ m}^2$ podczas gdy z dyfuzorem wartość ta zwiększa się o 61% i osiąga odpowiednio $2,09 \text{ m}^2$. Wartości te zostały uwzględnione podczas obliczeń sprawności badanego zespołu wirnika turbiny. Domenę obliczeniową rozpatrywanego obiektu badawczego tworzy cylinder o średnicy 5 m i długości przed obiektem równej 2 m i za nim 3 m. Oś wirnika pokrywa się z osią główną cylindra domeny obliczeniowej (rys. 2.2).



Rys. 2.4. Widok domeny obliczeniowej wirnika turbiny wiatrowej wraz z jej parametrami

Na rysunku 2.3 przedstawiono widok siatki modelu obliczeniowego wykonanej w module ANSYS Meshing. Siatkę wykonano z elementów typu tetrahedrons z lokalną zmianą zagęszczenia elementów oraz funkcją inflation. Siatka domeny obliczeniowej dla geometrii z dyfuzorem liczyła około 6,7 mln elementów. W obiekcie badawczym wydzielono trzy odrębne selekcje: dyfuzor, łopaty i kołpak (cover). Umożliwiło to identyfikację poszczególnych składowych sił i momentów działających na te elementy.



Rys. 2.5. Widok siatki modelu obliczeniowego zespołu wirnika turbiny wiatrowej (po lewej stronie) wraz z widokiem szczegółowym siatki obliczeniowej w obszarze mocowania łopaty w dyfuzorze (po prawej stronie)

Badania przeprowadzono w oparciu o oprogramowanie ANSYS Fluent. Obliczenia przeprowadzono jako transient typu pressure-based. Podczas obliczeń użyto k- ω SST turbulence model. On such a defined calculation domain, there were applied the conditions of velocity inlet and pressure outlet. Turbulent intensity ustalono na poziomie 5% a turbulent viscosity ratio było równe 0.35. The remaining walls, including the surfaces of the turbine rotor are defined as the wall, however, they are distinguished and named basic elements of the construction, i.e. a blades, cover, diffuser. Ruch obrotowy wirnika turbiny symulowano poprzez Mesh Motion względem osi wzdłużnej.

3. Wyniki obliczeń

Poniżej przedstawiono w sposób tabelaryczny wyniki obliczeń wirnika turbiny wiatrowej dla rozpatrywanych punktów pomiarowych. W tabeli 3.1-3.3 zamieszczono wyniki dla wirnika z dyfuzorem z łopatomy ustawionymi pod kątem 20° dla prędkości przepływającego powietrza 4, 8 i 12 m/s.

Tab. 3.1. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatomy pod kątem 20° (wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 4 m/s

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]

1	25	82,31	2,79	7,29	8,9
2	50	82,31	0,969	5,05	6,1
3	75	82,31	-1,349	-10,54	-12,8
4	100	82,31	-3,639	-38,01	-46,2

**Tab. 3.2. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 20°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 8 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	658,46	10,54	27,57	4,2
2	50	658,46	9,00	47,08	7,1
3	75	658,46	9,14	71,78	10,9
4	100	658,46	5,02	52,59	8,0
5	125	658,46	-1,16	-15,12	-2,3

**Tab. 3.3. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 20°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	2222,30	23,63	61,84	2,8
2	50	2222,30	24,18	126,52	5,7
3	62,5	2222,30	22,42	146,67	6,6
4	75	2222,30	18,75	147,18	6,6
5	87,5	2222,30	22,03	201,75	9,1
6	100	2222,30	26,44	276,71	12,5
7	125	2222,30	20,19	264,14	11,9
8	150	2222,30	11,08	173,92	7,8
9	175	2222,30	2,78	50,91	2,3
10	200	2222,30	-2,08	-43,54	-2,0

W tabeli 3.4-3.6 zamieszczono wyniki dla wirnika bez dyfuzora z łopatkami ustawionymi pod kątem 20° dla prędkości przepływającego powietrza 4, 8 i 12 m/s.

**Tab. 3.4. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 20°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 4 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	51,08	0,87	2,27	4,4
2	50	51,08	-0,61	-3,20	-6,3

3	75	51,08	-2,21	-17,39	-34,0
---	----	-------	-------	--------	-------

**Tab. 3.5. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 20°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 8 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	408,63	6,44	16,86	4,1
2	50	408,63	3,61	18,91	4,6
3	75	408,63	0,66	5,15	1,3
4	100	408,63	-2,41	-25,22	-6,2

**Tab. 3.6. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 20°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	1379,11	16,61	43,46	3,2
2	50	1379,11	12,55	65,66	4,8
3	62,5	1379,11	8,26	64,85	4,7
4	75	1379,11	3,89	40,69	3,0
5	87,5	1379,11	-10,24	-187,50	-13,6

W tabeli 3.7-3.9 zamieszczono wyniki dla wirnika z dyfuzorem z łopatkami ustawionymi pod kątem 40° dla prędkości przepływającego powietrza 4, 8 i 12 m/s.

**Tab. 3.7. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 4 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
------	-------------------	----------------	----------------------	-----------------	---------------

	[obr/min]				
1	25	82,31	2,30	6,03	7,3
2	50	82,31	3,55	18,59	22,6
3	75	82,31	3,27	25,65	31,2
4	100	82,31	1,75	18,27	22,2

**Tab. 3.8. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 8 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	658,46	8,87	23,21	3,5
2	50	658,46	9,89	51,76	7,9
3	75	658,46	12,81	100,52	15,3
4	100	658,46	16,63	174,07	26,4
5	150	658,46	14,06	220,69	33,5
6	200	658,46	8,13	170,19	25,8

**Tab. 3.9. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	2222,30	20,07	52,52	2,4
2	50	2222,30	21,02	109,99	4,9
3	75	2222,30	23,00	180,56	8,1
4	100	2222,30	26,14	273,64	12,3
5	150	2222,30	40,04	628,65	28,3
6	175	2222,30	39,81	729,20	32,8
7	200	2222,30	36,60	766,25	34,5
8	250	2222,30	28,27	739,85	33,3
9	300	2222,30	19,38	608,55	27,4

W tabeli 3.10-3.12 zamieszczono wyniki dla wirnika bez dyfuzora z łopatkami ustawionymi pod kątem 40° dla prędkości przepływającego powietrza 4, 8 i 12 m/s.

**Tab. 3.10. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 4 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
1	25	51,08	1,70	4,45	8,7

2	50	51,08	1,36	7,14	14,0
3	75	51,08	0,36	2,82	5,5
4	100	51,08	-0,88	-9,25	-18,1

**Tab. 3.11. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 8 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność []
1	25	408,62557	7,45	19,49	4,8
2	50	408,62557	7,32	38,29	9,4
3	75	408,62557	7,05	55,35	13,5
4	100	408,62557	5,86	61,33	15,0
5	125	408,62557	3,83	50,05	12,2
6	200	408,62557	-3,34	-69,88	-17,1

**Tab. 3.12. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 40°
(wersja bez dyfuzora) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność []
1	25	1379,1113	17,31	45,29	3,3
2	50	1379,1113	17,05	89,22	6,5
3	75	1379,1113	17,03	133,69	9,7
4	100	1379,1113	16,86	176,44	12,8
5	125	1379,1113	15,83	207,12	15,0
6	150	1379,1113	13,48	211,66	15,3
7	200	1379,1113	7,12	149,01	10,8

W tabeli 3.13-3.14 zamieszczono wyniki dla wirnika z dyfuzorem z łopatkami ustawionymi pod kątem 60° i 80° dla prędkości przepływającego powietrza 12 m/s.

**Tab. 3.13. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 60°
(wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s**

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
2	50	2222,30	16,56	86,67	3,9%
4	100	2222,30	20,75	217,22	9,8%
5	150	2222,30	27,43	430,58	19,4%
7	200	2222,30	29,44	616,32	27,7%
8	250	2222,30	26,28	687,75	30,9%
9	300	2222,30	22,04	691,92	31,1%

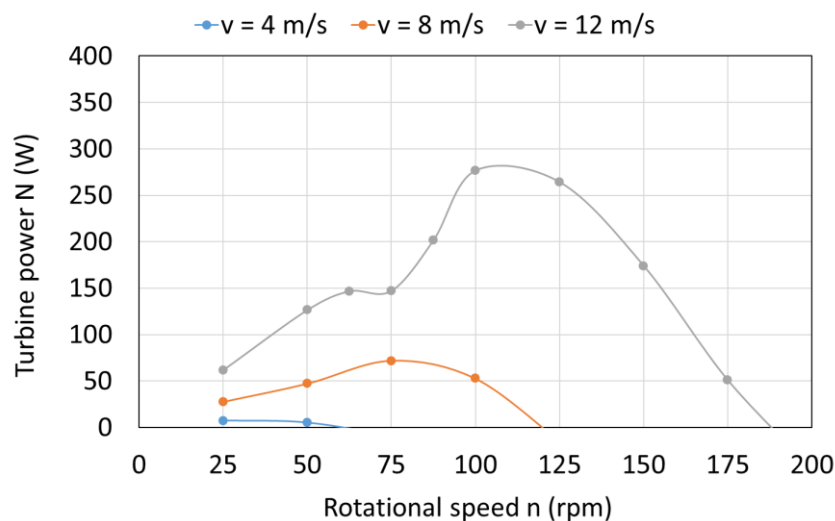
10	350	2222,30	17,45	639,11	28,8%
----	-----	---------	-------	--------	-------

Tab. 3.14. Wartości obliczeniowe wirnika z ustawionymi łopatkami pod kątem 80° (wersja z dyfuzorem) – prędkość przepływu powietrza 12 m/s

L.p.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc wiatru [W]	Moment obrotowy [Nm]	Moc turbiny [W]	Sprawność [%]
2	50	2222,30	7,86	41,13	1,9%
4	100	2222,30	10,10	105,71	4,8%
5	150	2222,30	13,66	214,44	9,6%
6	200	2222,30	14,11	295,44	13,3%
7	250	2222,30	12,99	339,86	15,3%
8	300	2222,30	9,59	301,00	13,5%

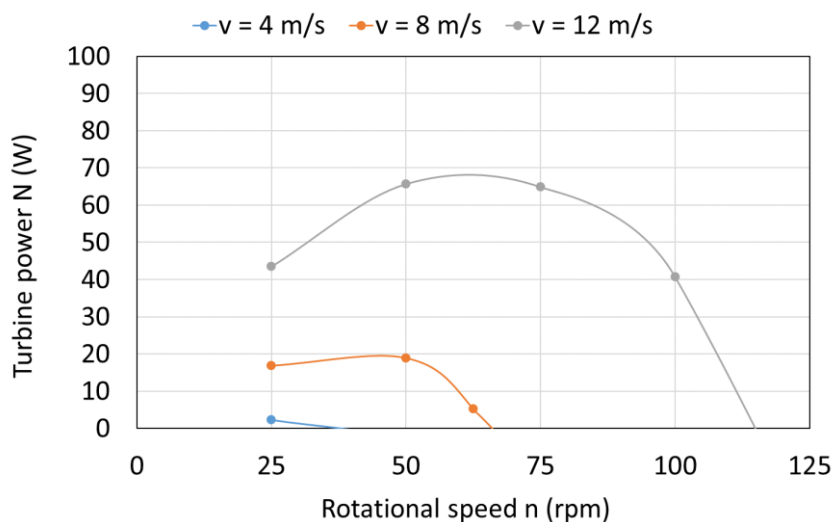
4. Analiza wyników

W pierwszej części badań sprawdzono wpływ dyfuzora na moc wirnika turbiny dla początkowych wartości kątów ustawienia łopatek wynoszących 20° i 40°. Kąt ustawienia łopatek α naliczano względem przepływającego powietrza a nie względem płaszczyzny obrotu. Obliczenia wykonano dla trzech wartości prędkości przepływającego powietrza: 4 m/s, 8 m/s oraz 12 m/s. Jako parametr przyjęto prędkość obrotową wirnika turbiny. Na rysunku 4.1 oraz 4.3 przedstawiono moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji z dyfuzorem i kątów ustawienia łopatek wynoszących odpowiednio 20° i 40°. Rysunek 4.2 oraz 4.4 przedstawiają moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji bez dyfuzora i tych samych kątów ustawienia łopatek.



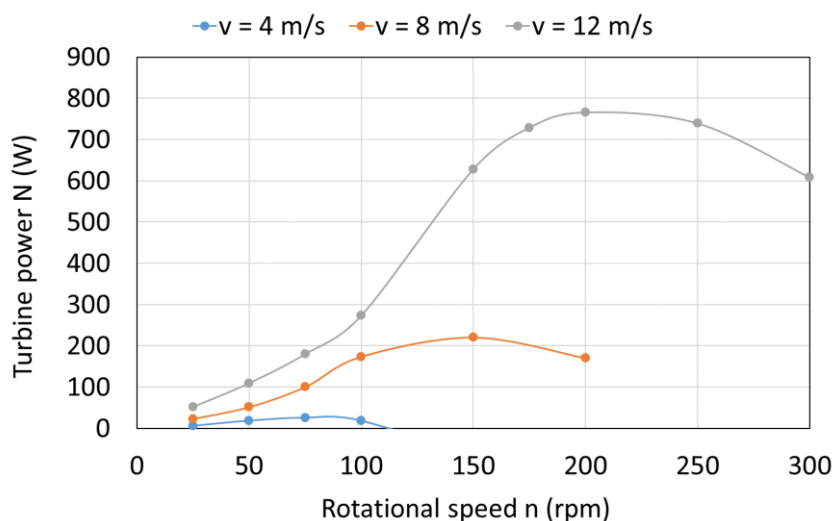
Rys. 4.6. Moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji z dyfuzorem i $\alpha = 20^\circ$

Dla konfiguracji z dyfuzorem i $\alpha = 20^\circ$ (rys. 4.1) maksymalna wartość mocy turbiny dla prędkości równej 4 m/s, 8 m/s oraz 12 m/s wyniosła odpowiednio 7.29 W, 71.78 W oraz 276.71 W. Wartości maksymalne uzyskano dla prędkości obrotowych równych odpowiednio 25 obr/min, 75 obr/min oraz 100 obr/min.



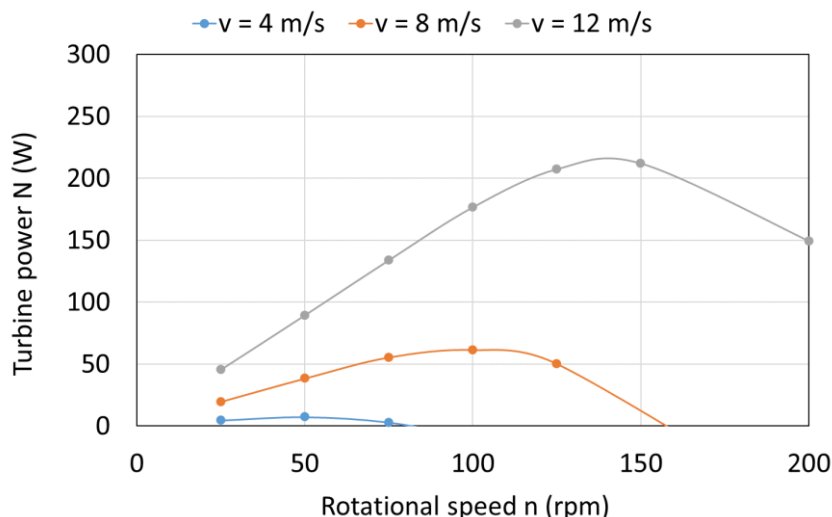
Rys. 4.7. Moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji bez dyfuzora i $\alpha = 20^\circ$

Dla konfiguracji bez dyfuzora i $\alpha = 20^\circ$ (rys. 4.2) maksymalna wartość mocy turbiny dla prędkości równej 4 m/s, 8 m/s oraz 12 m/s wyniosła odpowiednio 2,27 W, 18,91 W oraz 65,66 W przy prędkościach obrotowych odpowiednio równych 25 obr/min, 50 obr/min oraz 50 obr/min.



Rys. 4.8. Moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji z dyfuzorem i $\alpha = 40^\circ$

W przypadku konfiguracji z dyfuzorem i $\alpha = 40^\circ$ (rys. 4.3) maksymalna wartość mocy turbiny dla prędkości równej 4 m/s, 8 m/s oraz 12 m/s wyniosła odpowiednio 25,65 W, 220,69 W oraz 766,25 W przy prędkościach obrotowych odpowiednio 75 obr/min, 150 obr/min oraz 200 obr/min.

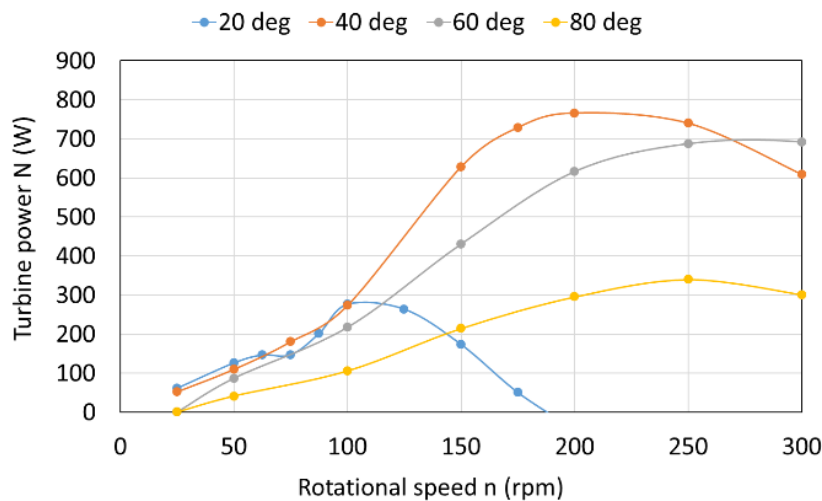


Rys. 4.9. Moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji bez dyfuzora i $\alpha = 40^\circ$

Dla konfiguracji bez dyfuzora i $\alpha = 40^\circ$ (rys. 4.4) maksymalna wartość mocy turbiny dla prędkości równej 4 m/s, 8 m/s oraz 12 m/s wyniosła odpowiednio 7,14 W, 61,33 W oraz 211,66 W przy prędkościach obrotowych odpowiednio 50 obr/min, 100 obr/min oraz 150 obr/min.

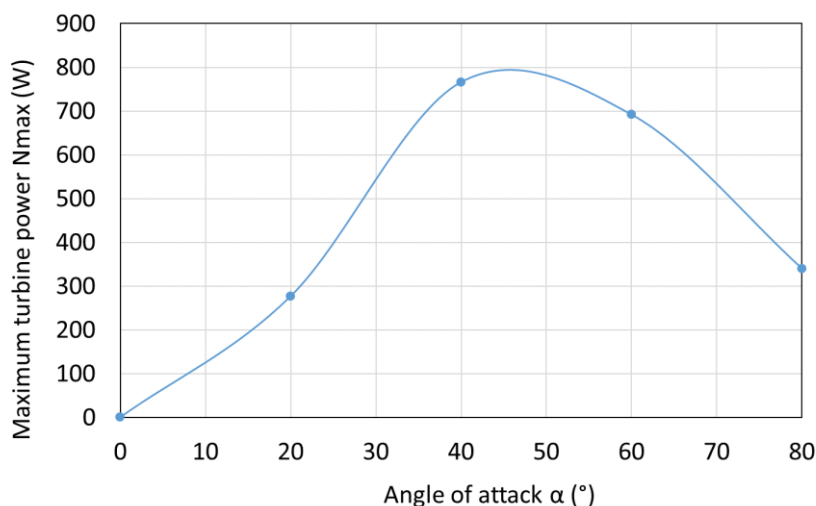
Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano wpływ dyfuzora na generowaną moc zespołu wirnika turbiny. Wzrost mocy po zastosowaniu dyfuzora jest znaczący i dla kąta ustawienia łopat równego 20° oraz prędkości powietrza równej 12 m/s wynosi od 1,42 do 6,8 raza w zależności od prędkości obrotowej wirnika. Dla kąta wynoszącego 40° i tej samej prędkości powietrza dyfuzor generuje moc większą od 1,16 do 5,14 razy w stosunku do wariantu bez dyfuzora w zależności od prędkości obrotowej.

W drugiej części badań obliczenia sprowadzono do analizy modelu z dyfuzorem i rozszerzono zbiór wartości kąta ustawienia łopat o 60° oraz 80° . Zestawienie wyników dla konfiguracji z dyfuzorem dla różnych kątów ustawienia łopat i prędkości powietrza równej 12 m/s przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.10. Moc wirnika turbiny w funkcji prędkości obrotowej dla konfiguracji z dyfuzorem i $v = 12 \text{ m/s}$

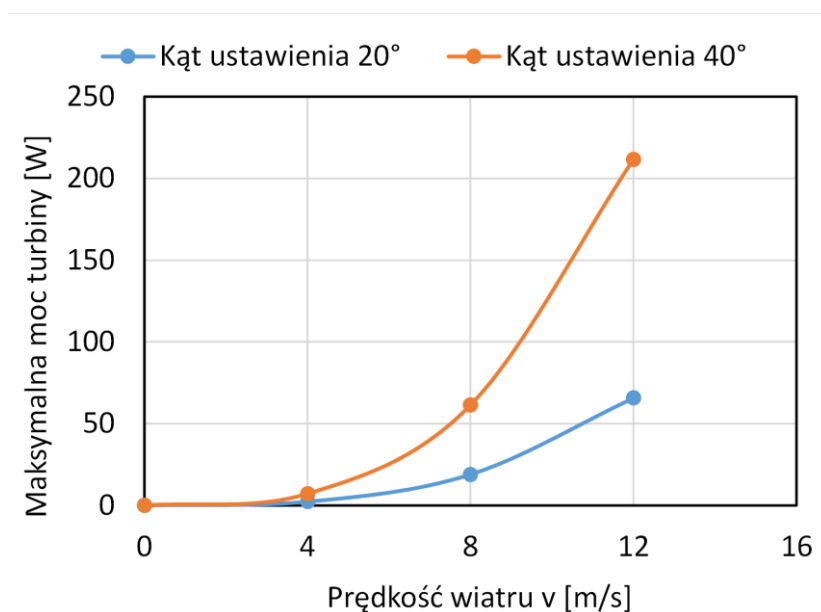
Najwyższą moc w zakresie prędkości obrotowych od 100 do 250 obr/min uzyskano dla kąta równego 40° . Dla zakresu niskich prędkości obrotowych (25-100 obr/min) uzyskane moce dla rozpatrywanych kątów ustawienia łopatek są zbliżone. Kąt ustawienia łopatek równy 80° okazał się zbyt duży, co skutkuje znaczącym spadkiem mocy w całym zakresie prędkości obrotowej. Dla małego kąta ustawienia łopatek np. 20° występuje gwałtowny spadek mocy po przekroczeniu wartości prędkości obrotowej równej 100 obr/min.



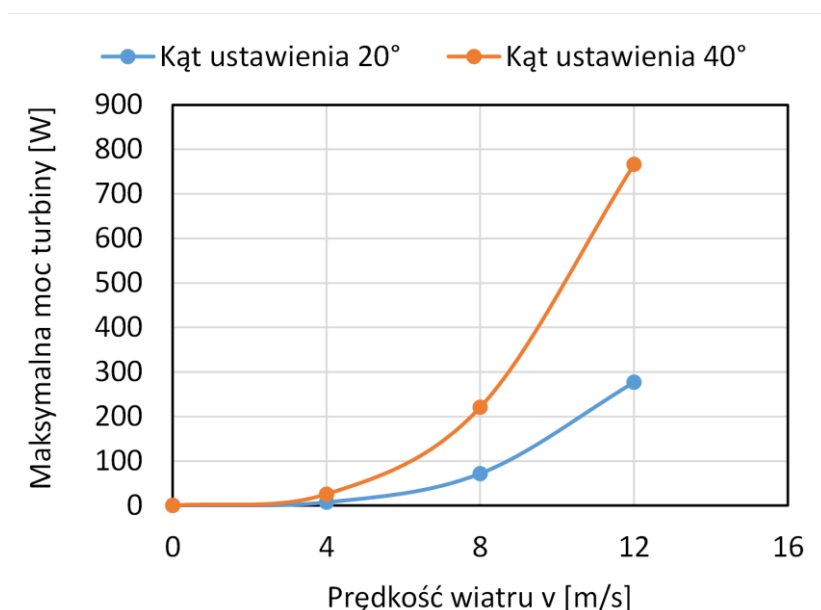
Rys. 4.11. Maksymalna moc wirnika turbiny w funkcji kąta ustawienia łopatek dla konfiguracji z dyfuzorem

W oparciu o wyniki uzyskane dla zdefiniowanych konfiguracji z dyfuzorem zestawiono maksymalne wartości mocy wirnika turbiny w funkcji kąta ustawienia łopatek (rys. 4.6). Z analizy uzyskanych danych wynika, że spośród obliczonych kątów ustawienia łopatek maksymalną moc uzyskano dla wartości równej 40° .

Na rysunku 4.7 oraz 4.8 przedstawiono moc turbiny w zależności od prędkości wiatru dla odpowiednio dla wirnika bez dyfuzora i z dyfuzorem.



Rys. 4.12. Moc turbiny w zależności od prędkości wiatru dla wirnika bez dyfuzora



Rys. 4.13. Moc turbiny w zależności od prędkości wiatru dla wirnika z dyfuzorem

5. Podsumowanie

Wykonane obliczenia wskazały znaczący wpływ dyfuzora na generowaną moc wirnika badanej turbiny. Obecność dyfuzora skutkuje nawet kilkukrotnym wzrostem wytwarzanej

mocy. Wraz ze wzrostem prędkości przepływającego powietrza znacząco zwiększa się moc wirnika turbiny. Dla ustalonego kąta ustawienia łopat istnieje optymalna wartość prędkości obrotowej, dla której uzyskiwana jest maksymalna moc wirnika turbiny.

Dla wariantu z dyfuzorem najwyższą sprawność wynoszącą 34,5% uzyskano dla kąta $\alpha = 40^\circ$. Wariant z kątem równym 60° pozwolił na uzyskanie sprawności 31,1%. Dla porównania w modelu bez dyfuzora i kąta $\alpha = 40^\circ$ uzyskano sprawność wynoszącą jedynie 15,3%. Pozbawienie turbiny dyfuzora i ustawienie małego kąta łopat równego 20° skutkuje uzyskaniem bardzo małej sprawności wynoszącej 4,8%.

Przeprowadzone obliczenia stanowią wstęp do opracowania uniwersalnego algorytmu sterowania ustawieniem łopat względem przepływającego powietrza celem pracy turbiny w optymalnych warunkach. W dalszych badaniach wskazane jest zagęszczenie punktów pomiarowych i doprecyzowanie maksymalnych wartości mocy wirnika turbiny.

6. Literatura

- [1]. <https://businessinsider.com.pl/finanse/makroekonomia/inwestycje-w-odnawialne-zrodla-energii-a-ustawa-antywiatrakowa/23fj4e7> oraz <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#form>
- [2]. D. Wood, Small Wind Turbines. Analysis, Design and Application, Springer-Verlag London (2011)
- [3]. Z. Kamiński, Z. Czyż, ASTRJ 11(1), 58-65 (2017)
- [4]. A. Arroyo, M. Manana, C. Gomez, I. Fernandez, F. Delgado, A. F. Zobaa, Appl. Energy 104, 1-9 (2013)
- [5]. Z. Kamiński, Z. Czyż, M. Wendeker, ASTRJ 8(22), 75-82 (2014)
- [6]. M. J. Clifton-Smith, D. H. Wood, Journal of Physics: Conference Series 75(1), 012017 (2007)
- [7]. W. Xudong, W. Z. Shen, W. J. Zhu, J. N. Sørensen, C. Jin, Wind Energy 12(8), 781-803. (2009)
- [8]. T. Matsushima, S. Takagi, S. Muroyama, Renew. Energy 31(9), 1343-1354 (2006)
- [9]. A. Chehouri, R. Younes, A. Ilinca, J. Perron, Appl. Energy 142, 361-388 (2015)
- [10]. X. Liu, Y. Chen, Z. Ye, Front. Mech. Eng. China 2(4), 483-488 (2007)
- [11]. G. B. Eke, J. I. Onyewudiala, GJRE, 10(7), 22-26 (2010)

- [12]. Y. Ohya, T. Karasudani, A. Sakurai, K. I. Abe, M. Inoue, J. Wind Eng. Ind. Aerod. 96(5), 524-539 (2008)
- [13]. L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, A. Crespo, Prog. Aerosp. Sci. 39(6-7), 467-510 (2003)
- [14]. J. N. Sørensen, W. Z. Shen, J. Fluids Eng. 124(2), 393-399 (2002)
- [15]. R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Renew. Energy 35(2), 412-422 (2010)
- [16]. S. Eriksson, H. Bernhoff, M. Leijon, Renew. Sust. Energy Rev. 12(5), 1419-1434 (2008)
- [17]. L. Hirth, S. Müller, Energy Econ. 56, 51-63 (2016)
- [18]. M. R. Luhur, A. L. Manganhar, K. H. Solangi, A. Q. Jakhrani, K. C. Mukwana, S. R. Samo, Wind Struct. 22(1), 1-16 (2016)
- [19]. M. Bastankhah, F. Porté-Agel, Renew. Energy 70, 116-123 (2014)
- [20]. A. Hassanzadeh, J. W. Naughton, C. L. Kelley, D. C. Maniaci, Journal of Physics: Conference Series 753(2), 022048 (2016)
- [21]. S. Sanaye, A. Hassanzadeh, J. Renew. Sustain. Energy 6, 053105 (2014)
- [22]. A. Hassanzadeh, A. H. Hassanabad, A. Dadvand, Alexandria Engineering Journal, 55(3), 2035-2043 (2016)
- [23]. J. Montusiewicz, Z. Czyż, R. Kayumov, Applied Computer Science, 11(1), 1-16 (2015)
- [24]. J. Montusiewicz, Z. Czyż, J. Kęsik, EDULEARN Proceedingss (ISSN 2340-1117), 1861-1871 (2015)
- [25]. Schoepp K. Zieliński P. Wolnoobrotowy dwustopniowy generator synchroniczny z magneśnicą swobodną, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów nr 23.2003, udostępniono on-line na <http://pc150.imne.pwr.wroc.pl> .