

POLITECHNIKA LUBELSKA



Wydział Mechaniczny

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych

**Badania opływu turbiny wiatrowej typu VAWT
(Vertical Axis Wind Turbine)**



Międzyuczelniane Inżynierskie Warsztaty Lotnicze



Cel prezentacji

Celem prezentacji jest opis przeprowadzonych badań CFD oraz tunelowych poświęconych turbinie wiatrowej o regulowanych powierzchniach roboczych. Podczas badań numerycznych korzystano z systemu Ansys Fluent gdzie dokonano analizy wpływu prędkości wiatru na rozkład ciśnień, a w konsekwencji sił działających na powierzchnię robocze, oraz pole prędkości i ślad zawirnikowy. Badania doświadczalne turbiny przeprowadzono w tunelu aerodynamicznego niskich prędkości z obiegiem otwartym rejestrując wpływ prędkości wiatru oraz kąta rozwarcia powierzchni roboczych na prędkość obrotową i moc turbiny.

Model geometryczny turbiny wiatrowej



W celu zademonstrowania ideologii działania turbiny wykonano przy użyciu programu CATIA V5 uproszczony model koncepcyjny. Następnie na jego podstawie powstał rzeczywisty model. Jest to wstępna koncepcja i nie stanowi żadnej podstawy do wykonywania pomiarów.

Składa się z czterech powierzchni nośnych, z których każda posiada mechanizm manualnej zmiany ich kąta rozwarcia. Przyjmuje się docelowo, iż kąt rozwarcia będzie powiązany funkcjonalnie z prędkością wiatru, aby uzyskać stałą moc w szerokim jej zakresie oraz uniknąć zniszczenia bądź wyczerpania materiału przy ponad granicznych wartościach wiatru.

Model rzeczywisty

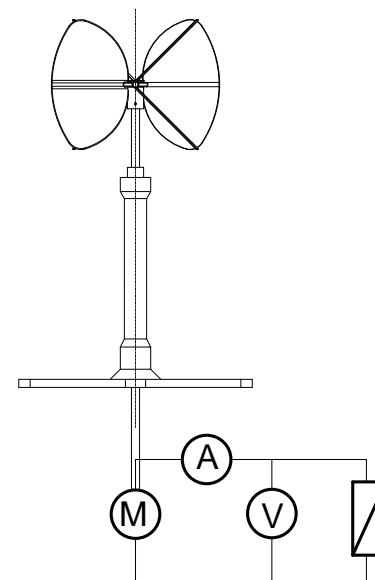


Ze względu na **minimalizację obiektu** pomiarowego uwarunkowaną wymiarami gabarytowymi przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego postanowiono użyć wirniki stałe (bez zmiennego kąta rozwarcia powierzchni nośnych) wytworzone w kilku wersjach odpowiednio dla kątów **0°, 30°, 60°, 90°**. Na podstawie nabytych doświadczeń przy konstruowaniu modelu demonstracyjnego stwierdzono, że do wytworzenia tych wirników zostanie użyta drukarka proszkowa. Jest to uwarunkowane m.in. kryteriami dokładności, estetyki oraz czasu wykonania.



Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z uniwersalnego masztu, do którego montowane są wymienne wirniki. Część zewnętrzna masztu została zamodelowana i wydrukowana na drukarce 3D, natomiast oś jest stalowa i ułożyskowana na łożyskach tocznych. Do osi (poniżej komory pomiarowej) został sprzęgnięty silnik elektryczny prądu stałego, pełniący funkcję prądnicy. Przy obciążeniu danym rezystorem w zależności od prędkości wiatru odczytywane zostały natężenie i napięcie prądu.



Schemat układu obciążeniowego turbiny

Stanowisko badawcze

Plan badań turbiny wiatrowej obejmuje cztery komplety łopat z kątem rozwarcia stopniowanym co 30° tj. 0° , 30° , 60° , 90° . Pomiary przeprowadzono w 20 punktach pomiarowych w zakresie prędkości wiatru $V=4,43-10$ [m/s]. Opracowane stanowisko hamowniane umożliwia odczyt prędkości wiatru, prędkości obrotowej wirnika oraz mocy generowanej przez prądnicę.

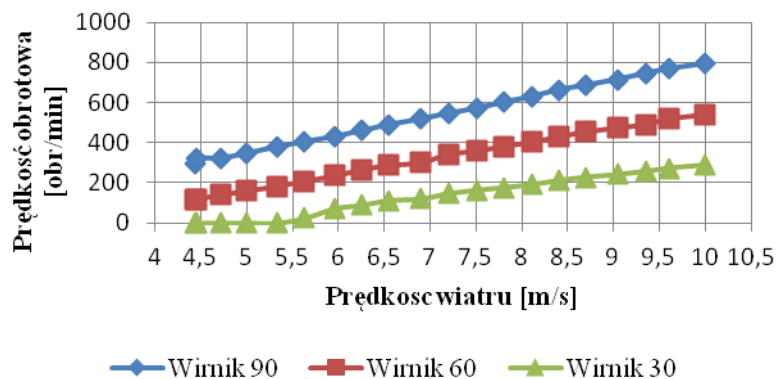


Stanowisko do badań turbiny wiatrowej.

Nazwa parametru lub właściwości technicznej	Wartość parametru
Przekrój poprzeczny komory badawczej (szerokość x wysokość)	292x292mm
Długość	450mm
Maksymalna prędkość strugi powietrza	28m/s
Różnica ciśnień	500Pa
Maksymalny przepływ objętościowy	9000m ³ /h
Moc silnika elektrycznego	2.25kW
Maksymalna prędkość obrotowa wentylatora	2850 obr/min
Zasięg pomiaru sił	0...5N i 0...10N
Zasięg pomiaru ciśnień	0...500Pa

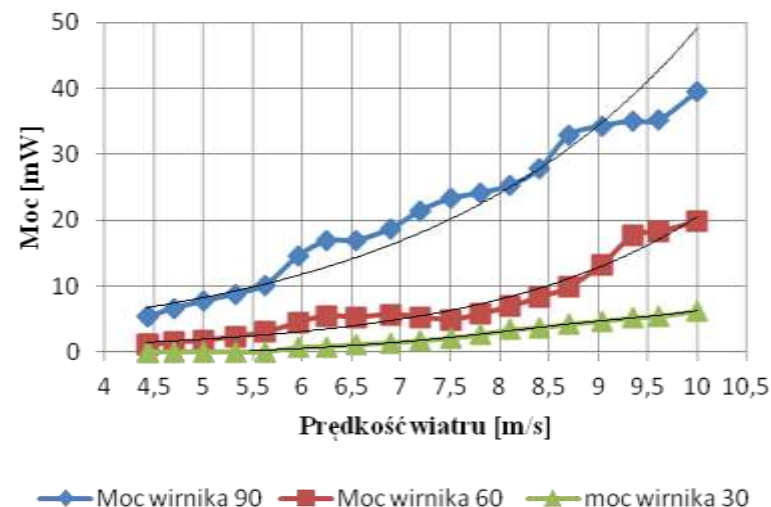
Dane techniczne tunelu aerodynamicznego GUNTmodel HM 170

Wyniki badań



Charakterystyka prędkości obrotowej turbiny w funkcji prędkości wiatru dla różnych kątów rozwarcia powierzchni roboczych.

Źródło: Opracowanie własne



Charakterystyka mocy turbiny w funkcji prędkości wiatru dla różnych kątów rozwarcia powierzchni roboczych.

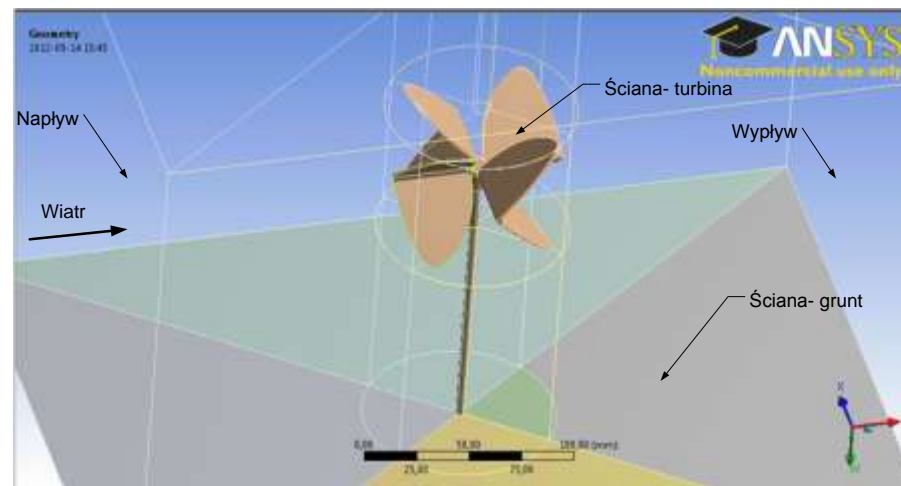
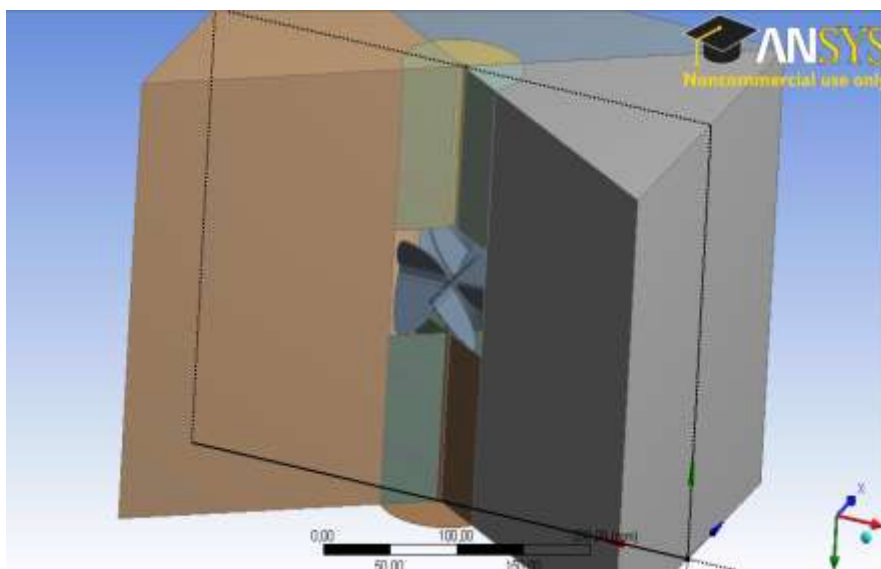
Źródło: Opracowanie własne

Wydział Mechaniczny Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych

Badania numeryczne

Przygotowanie geometrii

Geometrię użytą do obliczeń przygotowano w taki sposób, aby upodobnić ją jak najbardziej do warunków panujących w tunelu aerodynamicznym. Badana turbina została zamknięta w otoczeniu o wymiarach poprzecznych odpowiadających tunelowi.

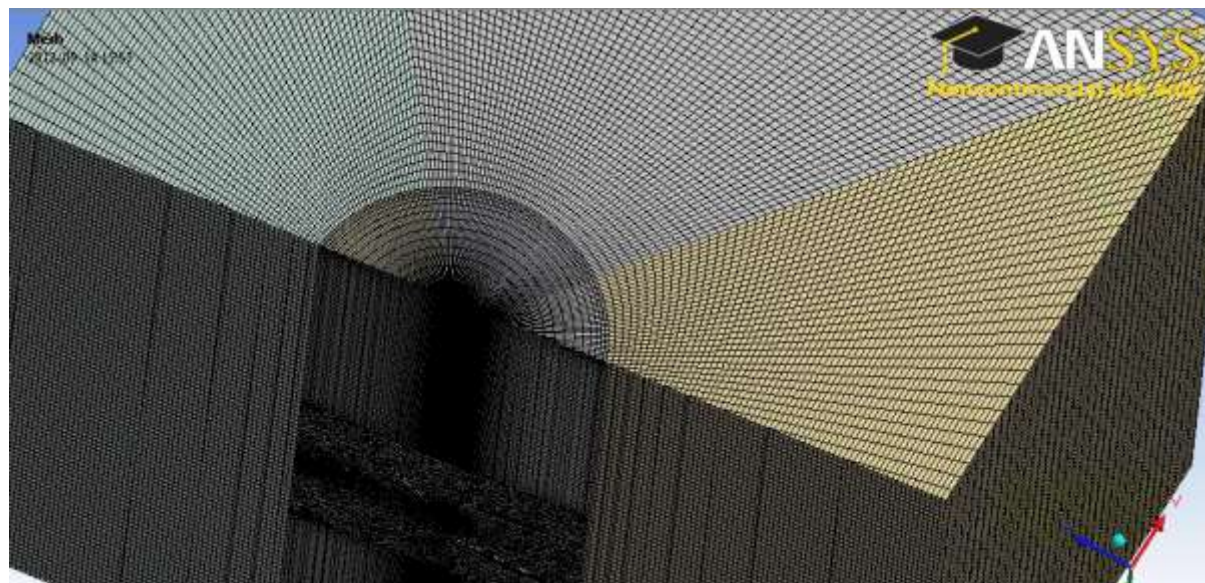


Dodatkowo, ze względów jakościowych siatki, *fluid* otaczający wirnik został podzielony w taki sposób, aby była ona jak najbardziej regularna.

Badania numeryczne

Tworzenie siatki

Liczba elementów	2750000
Liczba węzłów	2352837
Całkowita powierzchnia modelu	0.066 m ²
Całkowita objętość modelu	0.036 m ³



Dyskretyzację przestrzenną modelu turbiny przeprowadzono w programie *ANSYS FLUENT*. Do programu zaimportowano geometrię modelu geometrycznego jako *solid*. Następnie został zdefiniowany typ komórek. Wydajność oraz dokładność obliczeń jest bezpośrednio związana z jakością wygenerowanej siatki



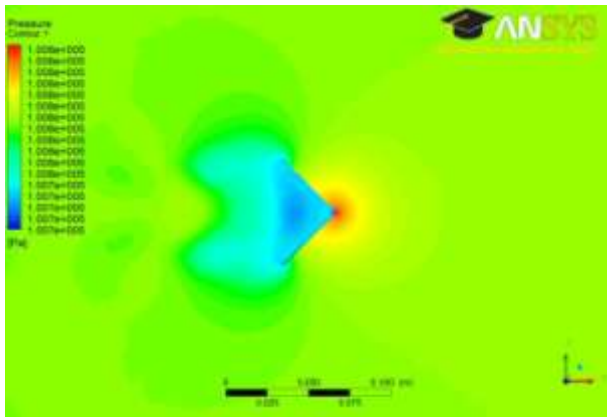
Badania numeryczne

Tworzenie siatki

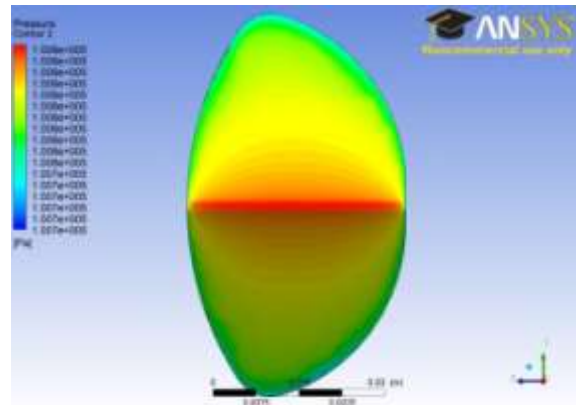
Błąd dyskretyzacji geometrycznej maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia siatki. W celu wyeliminowania nieciągłości w geometrii oraz zapewnienia wymaganej dokładności obliczeń wykonano weryfikację poprawności opracowanej siatki przy pomocy odpowiednich współczynników typu *skewness*. Ostatecznie model składał się z około 2750000 komórek. Ten poziom dyskretyzacji geometrycznej zapewnił wymaganą dokładność obliczeń przy jednoczesnym skróceniu czasu obliczeń. Opracowany model numeryczny jest wynikiem badań własnych.

Badania numeryczne

Wyniki badań



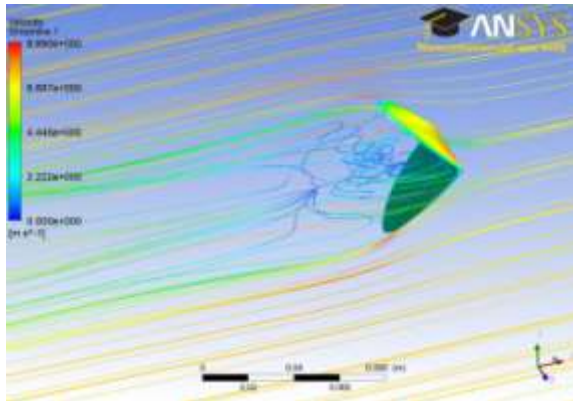
Mapa ciśnień [Pa] opływu wypukłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny (widok w kierunku równoległym do kierunku wiatru).



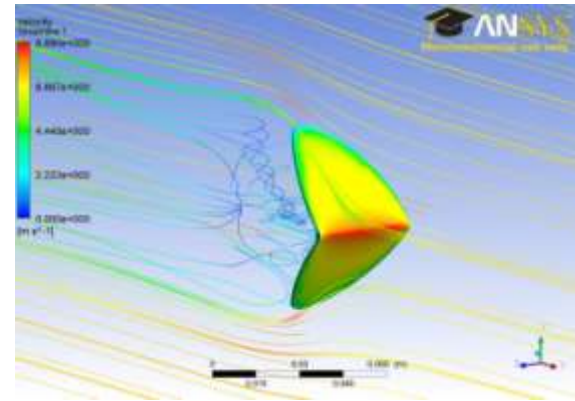
Mapa ciśnień [Pa] opływu wypukłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny (widok od czoła).

Badania numeryczne

Wyniki badań



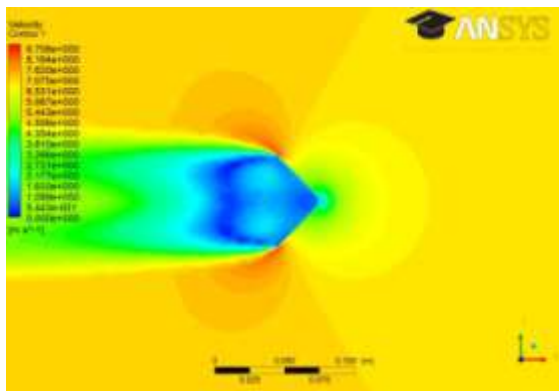
Mapa prędkości przy użyciu streamline-ów [m/s] opływu wypukłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny.



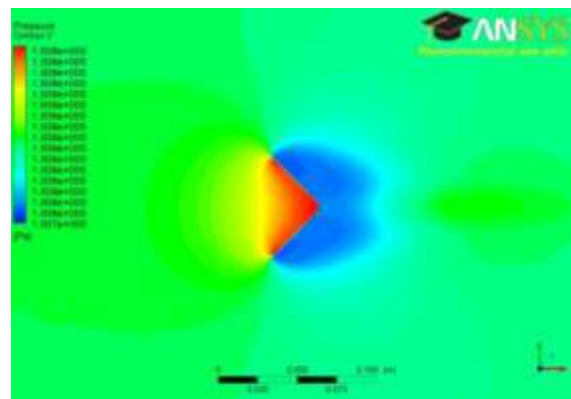
Mapa prędkości przy użyciu streamline-ów [m/s] opływu wypukłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny.

Badania numeryczne

Wyniki badań



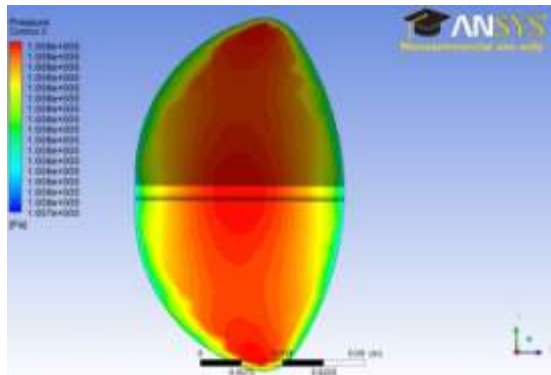
Mapa prędkości [m/s] przy opływie wypukłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny.



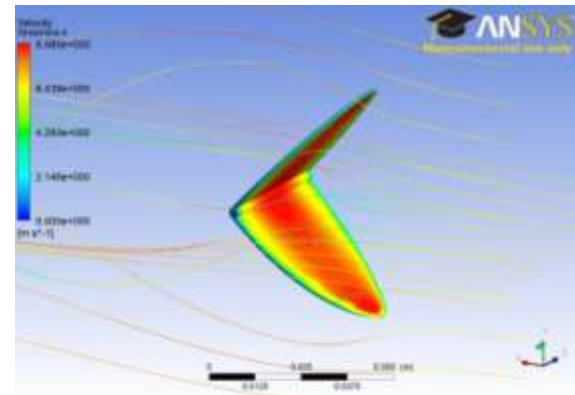
Mapa ciśnień [Pa] opływu wklęsłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny (widok w kierunku równoległym do kierunku wiatru).

Badania numeryczne

Wyniki badań



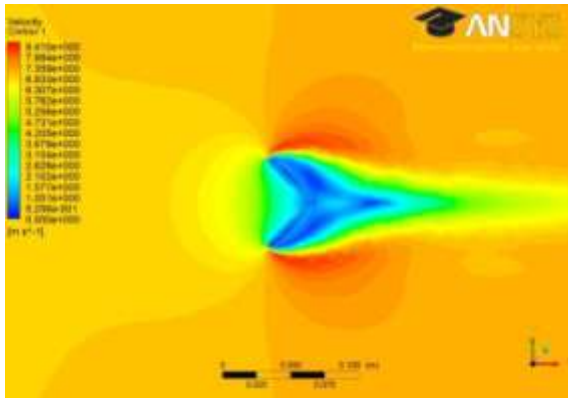
Mapa ciśnień [Pa] opływu wklęsłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny (widok od strony nawietrznej).



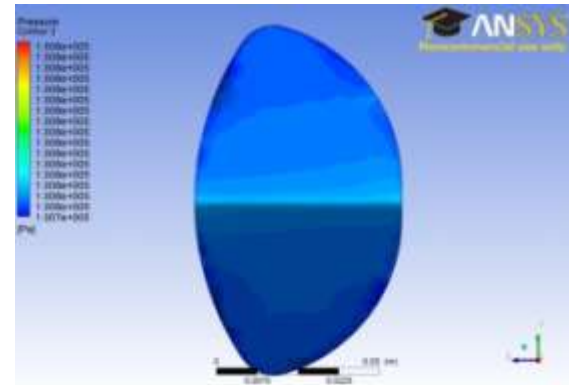
Mapa prędkości przy użyciu streamline-ów [m/s] opływu wklęsłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny.

Badania numeryczne

Wyniki badań

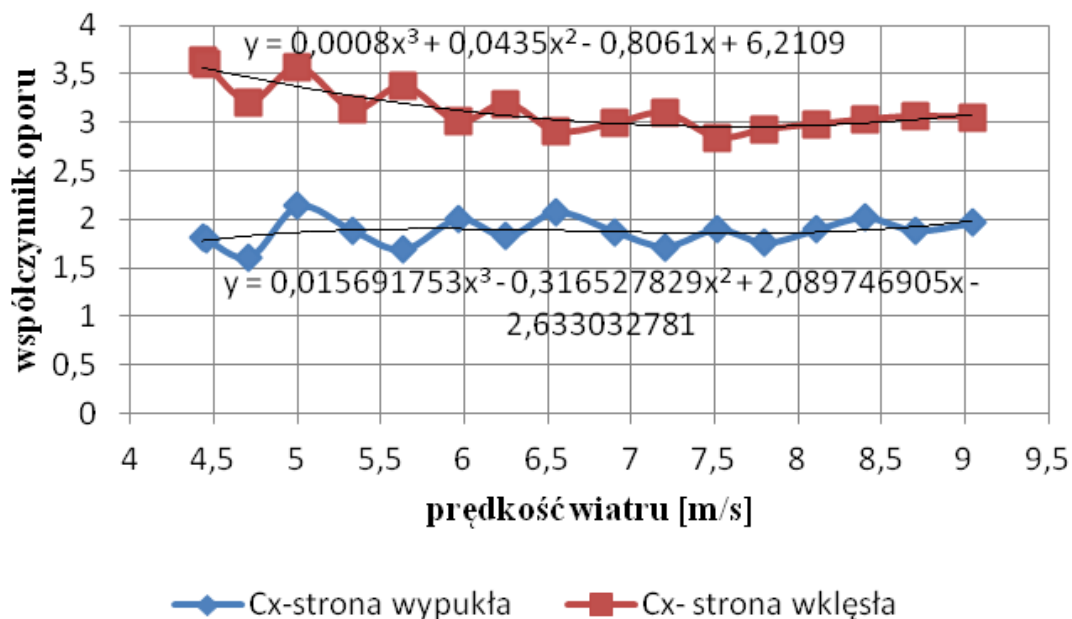


Mapa prędkości [m/s] opływu wklęsłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny



Mapa ciśnień [Pa] opływu wklęsłej strony powierzchni roboczej rotora turbiny (widok od strony za wirnikowej).

Współczynnik siły oporu



W celu wyznaczenia teoretycznej mocy badanej turbiny wiatrowej wykonano badania statyczne współczynnika siły oporu dla pojedynczej łopaty o kącie rozwarcia 90°. Łopatę badano w dwóch zamocowaniach (dla strony wklęsłej oraz wypukłej względem kierunku wiatru) dla 16 prędkości z zakresu od 4,43 do 9,04 [m/s]. Wyniki pomiaru umieszczono na rys. 7.



Podstawowe dane charakterystyczne turbiny

Dla przykładowej prędkości wiatru równej 7,2 [m/s], długości łopaty $r = 0,041$ [m], jej powierzchni czołowej $A = 0,000945$ m², otrzymujemy niżej przedstawione wartości.

Nazwa	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Wyróżnik szybkobieżności	$z = \frac{u}{v}$	0,43	[-]
Prędkość obwodowa końca łopaty	u	3,096	[m/s]
Prędkość obrotowa turbiny	n	721,454	[obr/min]



Dalsze działania...

...obejmują modyfikacje geometrii łopat turbiny wiatrowej, które niosą za sobą szereg zjawisk aerodynamicznych. Sprawność turbiny zależy w dużym stopniu od rozkładu ciśnień na jej powierzchniach roboczych. Dąży się do uzyskania jak najefektywniejszego odzyskiwania energii kinetycznej pochodzącej od wiatru poprzez dostosowanie łopat tak, aby nabiegająca cechowała się jak najmniejszym współczynnikiem oporu, natomiast zbiegająca ten współczynnik miała możliwie największy. Jest to konsekwencją poniższej zależności:

$$P = P_1 - P_2$$

$$P = c_{x1} \cdot \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (v - u)^2 - c_{x2} \cdot \frac{A \cdot \rho}{2} \cdot (v + u)^2$$

gdzie: P - siła wypadkowa działająca na wirnik turbiny;
A - powierzchnia czołowa łopaty turbiny;
 ρ - gęstość czynnika opływającego wirnik;
 c_{x1} - współczynnik oporu łopaty zbiegającej;
 c_{x2} - współczynnik oporu łopaty nabiegającej;
u - prędkość prędkość obwodowa końca łopaty;
v - prędkość wiatru.



Wnioski

- Zastosowanie zmiennego kąta rozwarcia powierzchni roboczych turbiny wiatrowej daje możliwość kontroli jej prędkości obrotowej a w konsekwencji generowaną mocą.
- Zmniejszenie kąta rozwarcia powierzchni roboczych z 90 do 60 powoduje zmniejszenie prędkości obrotowej średnio o 60 % w początkowym zakresie badanej prędkości oraz o 32 % w końcowym zakresie prędkości obrotowej.
- Zmniejszenie kąta rozwarcia powierzchni roboczych z 60 do 30 powoduje zmniejszenie prędkości obrotowej średnio o 100 % w początkowym zakresie badanej prędkości (całkowite zatrzymanie wirnika) oraz o 46 % w końcowym zakresie prędkości obrotowej.
- Całkowite złożenie powierzchni roboczych powoduje zerowanie się wypadkowej siły działającej na wirnik w związku, z czym nie występuje ruch obrotowy turbiny.



Wnioski

- Zmniejszenie kąta rozwarcia powierzchni roboczych z 90 do 60 powoduje zmniejszenie mocy o 78% w początkowym zakresie badanej prędkości oraz o 48% przy końcowym zakresie.
- Zmniejszenie kąta rozwarcia powierzchni roboczych z 60 do 30 powoduje zmniejszenie mocy o 100% w początkowym zakresie badanej prędkości (całkowite zatrzymanie turbiny) oraz o 48% przy końcowym zakresie.
- Różnica współczynników siły oporu powierzchni wklęsłej w stosunku do wypukłej wynosi od 50 % (dla początkowych prędkości wiatru badanego zakresu) do 35 % (dla końcowych prędkości wiatru badanego zakresu).
- Prędkość obrotowa turbiny użytej do badań dla przykładowej prędkości wiatru $V=7,2$ [m/s] jest mniejsza o 24% od teoretycznej prędkości obrotowej rozważanej jako praca bez jakichkolwiek strat. Dają to podstawę do określenia sprawności ogólnej zespołu turbiny równej 76%.



POLITECHNIKA LUBELSKA

Wydział Mechaniczny

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych



Dziękuję za uwagę