

Konrad KACPRZAK, Krzysztof SOBCZAK  
Politechnika Łódzka  
Instytut Maszyn Przepływowych  
kokacprzak@gmail.com

## NUMERYCZNA ANALIZA PRZEPŁYWU PRZEZ TURBINĘ SAVONIUSA

*Streszczenie:* Przepływ wokół turbiny wiatrowej Savoniusa o stałym przekroju został przeanalizowany przy pomocy symulacji quasi-2D oraz 3D w programie ANSYS CFX. Symulacje przeprowadzono tak, aby możliwe było porównanie ich wyników z danymi eksperymentalnymi innych badaczy. Przeanalizowano dwa projekty turbin: turbinę Savoniusa oraz Bacha. Referat zawiera analizę najbardziej charakterystycznych struktur przepływu oraz ich porównanie.

*Słowa kluczowe:* Savonius, turbina wiatrowa, Bach, CFD.

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW AROUND THE SAVONIUS WIND TURBINE

*Abstract:* The flow around Savonius wind turbine with constant cross-sections is examined by means of quasi-2D and 3D flow predictions executed in ANSYS CFX. Simulations were performed in a way allowing for a comparison with the wind tunnel data presented by other researchers. Two designs were simulated: the Classical and so-called Bach-type Savonius rotor. The paper presents systematic analysis of the most characteristic flow structures, which are identified and compared.

*Keywords:* Savonius, wind turbine, Bach, CFD.

### 1. WSTĘP

Dynamicznie rozwijające się obszary miejskie radykalnie zwiększają popyt na energię. Aby skutecznie odpowiedzieć na zjawisko tego rosnącego zapotrzebowania oraz zapewnić dywersyfikację jej źródeł, coraz większe zastosowanie znajdują rozwiązania, wykorzystujące energię odnawialną, w tym w szczególności energię wiatru. Turbina Savoniusa spełnia te oczekiwania, posiadając jednocześnie unikalne cechy, stanowiące o jej wyższości nad powszechnie stosowanymi turbinami o poziomej osi obrotu. Dotyczy to

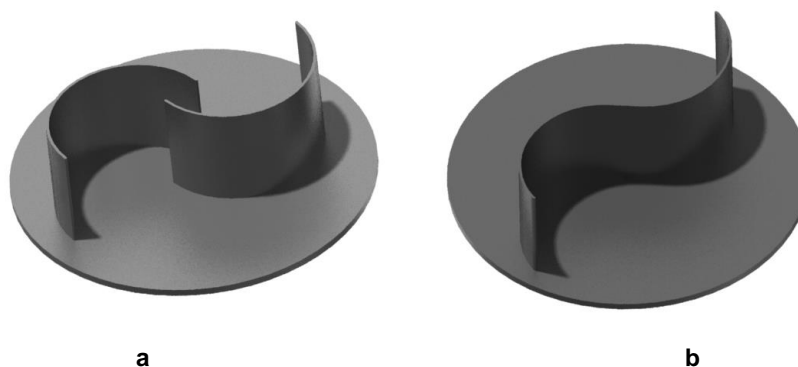
szczególnie obszarów zurbanizowanych, a także zastosowań w prywatnych gospodarstwach domowych. Główne zalety tego typu turbin to [1,2]:

- niezależność od kierunku wiatru (brak mechanizmu obracającego, zwarty kształt),
- praca w szerokim spektrum siły wiatru,
- niska emisji hałasu,
- wysoki startowy moment obrotowy,
- niewielkie rozmiary,
- prosta i tania konstrukcja.

Wszystkie powyższe właściwości turbiny Savoniusa sprawiają, że idealnie nadają się one do zastosowań w środowisku o zmiennej sile i kierunku wiatru oraz zmiennym poziomie turbulencji, a więc m.in. w terenach zurbanizowanych. Jednakże konstrukcje te nie są wolne od wad takich jak relatywnie niska sprawność, czy też mała prędkość obrotowa [3,4]. Dlatego większość współczesnych badań ukierunkowanych jest na konsekwentne poszukiwanie lepszych rozwiązań konstrukcyjnych, które podnoszą sprawność tych turbin.

## 2. BADANE WIRNIKI TURBIN

W omawianej pracy zostały przebadane numerycznie dwa rodzaje wirników turbiny wiatrowych Savoniusa: klasyczny (Rys. 1a) oraz Bacha (Rys. 1b).



Rys. 1. Modele badanych wirników turbin a) klasyczny, b) Bacha;  
(ze względu na symetrię przedstawione są tylko dolne połowy wirników)

Fig. 1. Models of investigated turbines a) Classical Savonius; b) Bach-type Savonius;  
(due to their symmetry only a half of each turbine is presented)

Wymiary obydwu modeli numerycznych odpowiadają wirnikom badanym przez Kamojiego i in. [5]. Dzięki temu, możliwe było zweryfikowanie otrzymanych wyników przy pomocy eksperymentu. Najważniejsze parametry geometryczne zostały przedstawione w Tab. 1.

Tabela 1. Parametry geometryczne badanych modeli wirników  
 Table 1. Geometrical parameters of the tested rotor models

	Średnica [m]	Szczelina międzyłopatowa	Miara kąta tworzącego łuk łopaty [°]	Wskaźnik kształtu*	Parametr końca łopaty**	Wysokość [m]
Klasyczny	0,2	15% średnicy	180	Nd.	1,33	0,154
Bach	0,2	0	135	0,2	1,33	0,154

\* Stosunek odcinka prostego tworzącego ramię łopaty do promienia krzywizny części spływowej łopaty.

\*\* Stosunek średnicy tarcz na końcach łopat do średnicy wirnika.

### 3. DEFINICJA SYMULACJI

W przedstawionym opracowaniu przeprowadzono pełnowymiarowe symulacje trójwymiarowe 3D wraz z serią symulacji 2D przy użyciu programu ANSYS CFX. Jako dane referencyjne posłużyły wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez Kamojiego i in. [5]. Pozwoliło to na porównanie wyników analizy numerycznej oraz na sprawdzenie wpływu uproszczenia 2D.

Na potrzeby badań stworzony został model fizyczny przestrzeni wokół wirników, składający się z dwóch domen obliczeniowych. Pierwsza – obrotowa, zawierająca konstrukcję turbiny, a także druga – stacjonarna, modelująca tunel aerodynamiczny o wymiarach użytych w badaniach eksperymentalnych [5]. Aby zapewnić porównywalne warunki symulacji dla obydwu typów turbin, tylko wewnętrzna część była wymieniana. Domena obrotowa posiadała dwukrotnie większy promień niż sam wirnik, co zapewniało rozwiązywanie skomplikowanych struktur wirowych, powstających blisko turbiny, w obrębie obracającego się układu odniesienia co pozwoliło ograniczyć ewentualne błędy obliczeniowe wynikających z wielokrotnego przekraczania przez czynnik interfejsu pomiędzy domenami. W związku z symetrią wirnika, zasymulowano przepływ jedynie przez dolną połowę turbiny.

Mając na uwadze niskie prędkości przepływu w omawianym przypadku, zmiany gęstości były bardzo niewielkie, dlatego założono, że powietrze jest w tym przypadku nieściśliwe. Ze względu na ciągłą zmianę położenia łopat względem napływającego wiatru wraz z obrotem turbiny Savoniusa struktura przepływu jest bardzo złożona i odznacza się licznymi strefami oderwań. Dlatego też modelowanie turbulencji jest dużym wyzwaniem. W symulacjach użyto modelu turbulencji Shear Stress Transport (SST). Model ten był z powodzeniem używany w podobnych badaniach [6,7]. W przypadku odpowiednich zagęszczeń siatek obliczeniowych (jak w przedstawionych obliczeniach) pozwala on na poprawne wyznaczenie separacji przepływu. Jest on zatem stosowany, gdy bardzo wysoka dokładność w warstwie przyściennej jest wymagana, co ma

miejsce w omawianym przypadku. Użycie tego modelu turbulencji pozwoliło także na zamodelowanie przejścia laminarno-turbulentnego z wykorzystaniem modelu  $\gamma$ - $\theta$ , co jak wykazały badania numeryczne [8] istotnie wpływało na zgodność uzyskiwanych wyników z wynikami badań eksperymentalnych

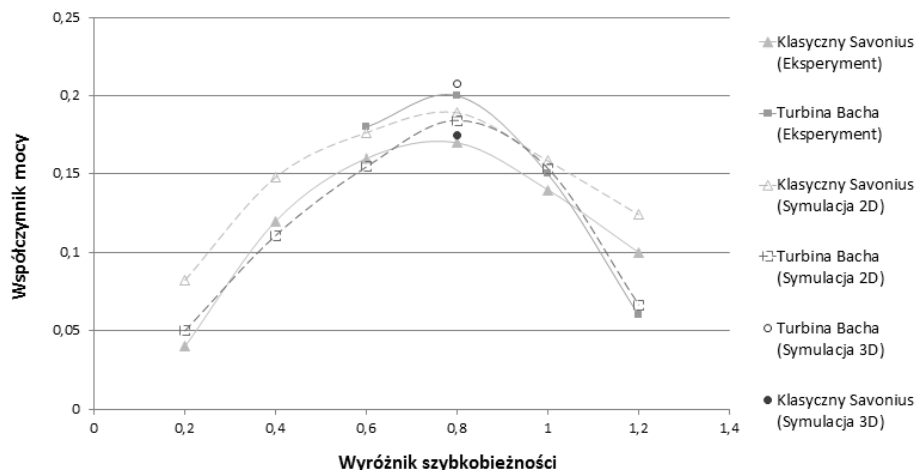
Jako warunek brzegowy na wlocie do domeny została zdefiniowana prędkość napływającego wiatru w zależności od zakładanego wyróżnika szybkobieżności ( $TSR = \lambda = \omega R/U$ , gdzie  $\omega$  – prędkość kątowna wirnika,  $R$  – promień wirnika,  $U$  – prędkość wiatru). Stanowi to swego rodzaju ograniczenie stosowanego modelu, gdyż zmiana prędkości czynnika powoduje jednocześnie zmianę liczby Reynoldsa. Jednakże, dzięki stałej prędkości obrotowej wirnika, uzyskano zgodność węzłów siatek dla każdego kroku czasowego, co spowodowało ograniczenie interpolacji między domeną stacjonarną i obrotową. Dodatkowo, na wlocie zdefiniowano niski poziom intensywności turbulencji (1%) jak w [5]. Na wylocie założono ciśnienie atmosferyczne (równe 1 bar). W związku z tym, że zarówno sama turbina jak i spodziewany charakter przepływu posiadają płaszczyznę symetrii w środku wysokości wirnika, możliwe było zastosowanie w obliczeniach 3D symetrii jako warunku brzegowego, na tej płaszczyźnie. Z kolei w obliczeniach 2D symetria zadana została po obydwu stronach rozwiązywanej warstwy (szerszy opis metodyki obliczeń dla tego przypadku przedstawiony jest w [8]). W przypadku łopat turbiny oraz tarczy obrzeża założono warunek bez poślizgu (no-slip wall), czyli zerową prędkość powietrza na ściankach.

#### 4. WERYFIKACJA WYNIKÓW

W celu weryfikacji wyników przeprowadzonych symulacji, otrzymane dane skonfrontowano z rezultatami eksperymentu przeprowadzonego przez Kamojiego et al. [5]. Eksperyment ten przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym i dotyczył on klasycznej turbiny Savoniusa oraz turbiny Bacha. Zależność między współczynnikiem mocy (stosunek mocy przechwyconej przez łopaty turbiny do mocy dostępnej w wietrze –  $2T\omega/\rho U^3 DH$ , gdzie  $T$  – moment obrotowy,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $D$  – średnica wirnika,  $H$  – wysokość wirnika) oraz wyróżnikiem szybkobieżności (stosunek prędkości obrotowej końca łopatki do prędkości wiatru) dla turbiny badanych przez Kamojiego et al. zaprezentowano na Rys. 2, wraz z wynikami symulacji 2D i 3D.

Można zauważyć, że istnieją pewne różnice między wynikami eksperymentalnymi a symulacjami. W przypadku symulacji 2D należy pamiętać, że model 2D nie bierze pod uwagę efektów trójwymiarowych (zwłaszcza wirów, które są źródłem istotnych strat) na końcach łopatek w pobliżu tarcz ograniczających turbinę od dołu i góry. Ponadto, dodatkowe straty mogą być powodowane przez opór tocny wału turbiny. Tłumaczy to przeszacowanie mocy dla przypadku klasycznego wirnika. Niestety w przypadku wirnika Bacha symulacje 2D wyraźnie niedoszacowują uzyskaną moc dla wyróżników szybkobieżności poniżej 1,0 co świadczy o innych niezidentyfikowanych mankamentach zastosowanej metody. Z kolei prezentowane wyniki symulacji 3D są jednoznaczne i wskazują na kilkuprocentowe przeszacowanie

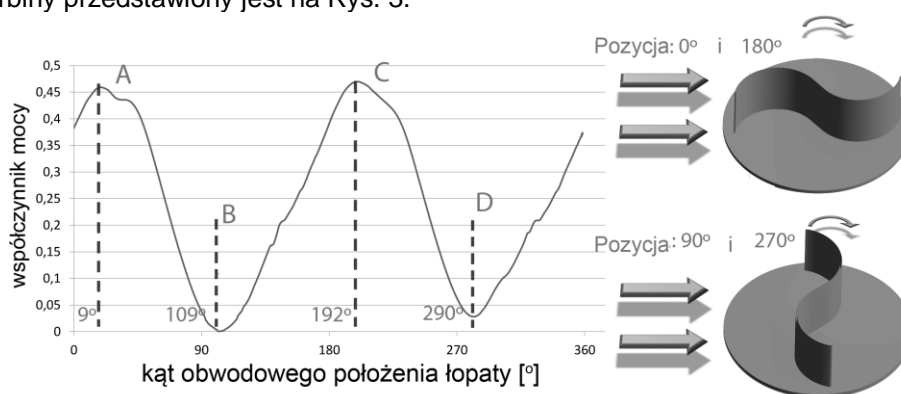
uzyskiwanej mocy w odniesieniu do badań eksperymentalnych. Niestety ze względu na znaczący rozmiar zadań i długi czas obliczeń nie wykonano jeszcze szerszych obliczeń, tj. poza punktem optymalnej wartości współczynnika szybkobieżności.



Rys. 2. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem  
 Fig. 2. Comparison of the simulation and experimental data

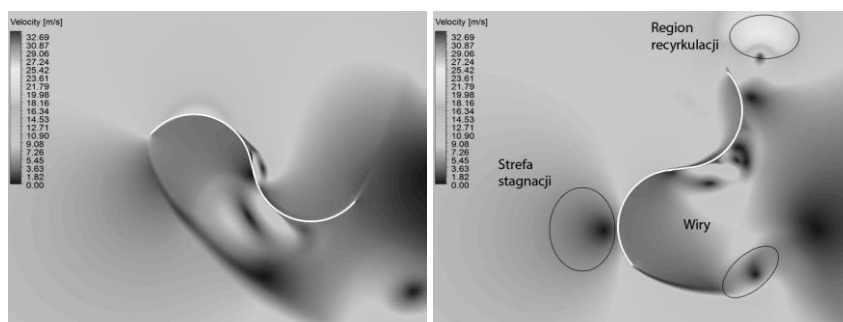
### 5. WYNIKI DLA TURBINY BACHA

W celu zademonstrowania jak zachowuje się przepływ, przy różnych ustawieniach kątowych turbiny, wybrano przypadek dla najbardziej reprezentatywnego wyróżnika szybkobieżności, tj. 0,8 dla którego moc osiąga największą wartość. Wykres współczynnika mocy dla jednego, pełnego obrotu turbiny przedstawiony jest na Rys. 3.



Rys. 3. Współczynnik mocy dla turbiny wiatrowej Bacha i TSR = 0,8  
 Fig. 3. Coefficient of power for the Bach-type wind turbine for TSR = 0.8

Pozycja wirnika odpowiadająca najwyższemu współczynnikowi mocy osiągnięta jest dwukrotnie w czasie jednego obrotu. Można zatem stwierdzić, że zawiera on dwa bardzo zbliżone choć nie identyczne cykle. Zaznaczono najbardziej charakterystyczne punkty wykresu, tj. A i C gdy moc osiąga wartości maksymalne, natomiast B i D dla wartości minimalnych. Ponadto, należy zauważyć, że współczynnik mocy dla swojego minimum osiąga niemal wartość zerową, co może mieć wpływ na utrudnienie startu takiej turbiny przy danym ustawieniu kątowym.

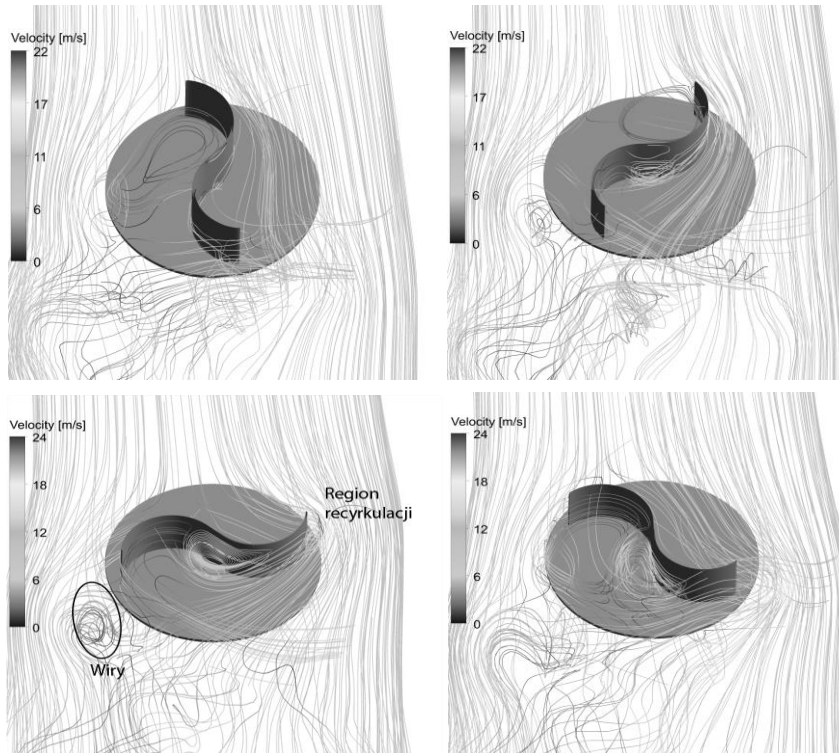


Rys. 4. Rozkład prędkości w układzie stacjonarym dla punktów charakterystycznych A i B

Fig. 4. Distribution of velocity in stationary frame for the characteristic points A and B

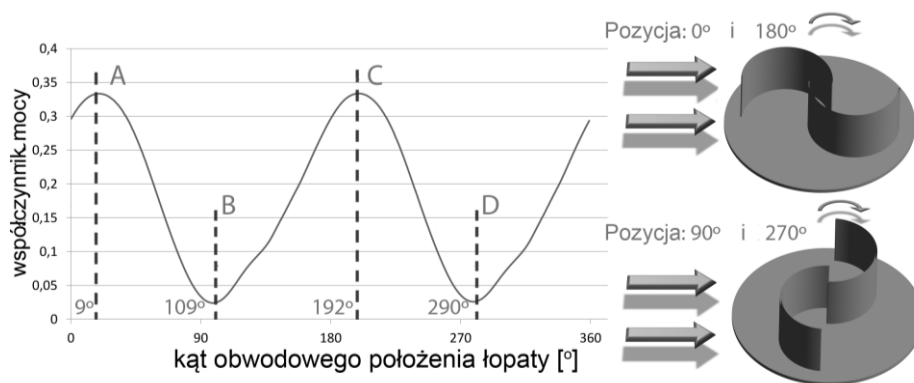
Na Rys. 4 można zauważyć stopień skomplikowania struktury przepływu oraz jej zmienność w zależności od położenia kąтового wirnika. W położeniu A, gdy uzyskiwany jest największy moment obrotowy, widoczne jest wyraźne przyspieszenie czynnika na powierzchni wypukłej łopatki nacierającej (poruszającej się zgodnie z kierunkiem wiatru) co powoduje powstawanie siły nośnej napędzającej turbinę. Z kolei dla położenia B po stronie wypukłej powracającej łopatki zostaje wytworzona strefa stagnacji zmniejszająca moment obrotowy turbiny generowany przez łopatkę nacierającą. Na te podstawowe zjawiska nałożone są oddziaływania licznych stref oderwań (recyrkulacji) zarówno na powierzchni wypukłej łopaty nacierającej jak i powracającej.

W celu zapewnienia lepszego oglądu struktur przepływu oraz zobrazowania schematu ich powstawania przygotowano Rys. 5. Przedstawiono na nim linie prądu dla położenia wirnika 0,45, 90 i 135° (napływ od góry). Podobnie jak na Rys. 4 widoczny jest duży stopień skomplikowania struktury przepływu z licznymi strefami zawirowań i recyrkulacji. Można zauważyć że mają one zdecydowanie trójwymiarowy charakter co może wyjaśniać dlaczego symulacje 2D odznaczały się gorszą zgodnością z eksperymentem. Ukształtowanie łopatek, w tym zmniejszony kąt łuku wytwarza większą siłę nośną na łopatkę nacierającą dla pozycji wirnika w pobliżu punktów A i C oraz niższy opór w trakcie przemieszczania się w powietrzu. Istotnym czynnikiem wpływającym na pole przepływu wokół turbiny jest brak szczeliny międzyłopatkowej. Powoduje to zmniejszenia przeciwnego momentu obrotowego na powracającej łopacie.



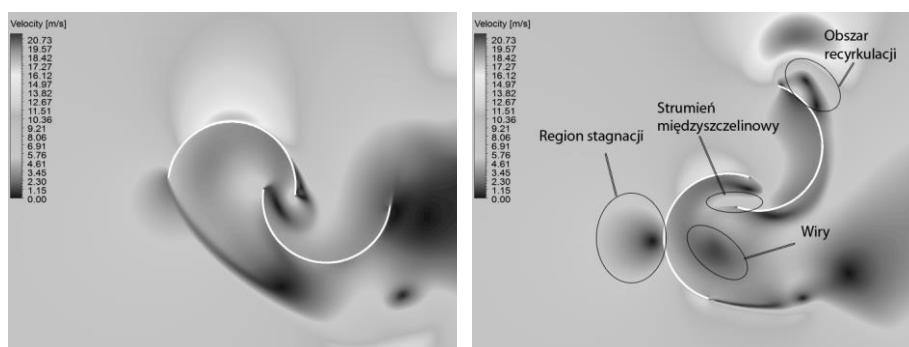
Rys. 5. Rozkład prędkości w układzie stacjonarnym dla turbiny Bacha  
 Fig. 5. Velocity distribution in strn. frame for the Bach-type Savonius rotor

6. WYNIKI DLA KLASYCZNEGO SAVONIUSA



Rys. 6. Współczynnik mocy dla klasycznej turbiny Savoniusa i TSR = 0,8  
 Fig. 6. Coefficient of power for the Classical Savonius wind turbine for TSR = 0.8

Wykres współczynnika mocy dla jednego, pełnego obrotu wirnika klasycznej turbiny Savoniusa przedstawiony jest na Rys. 6 dla wyróżnika szybkoobrotowości równego 0,8. Ponownie jak poprzednio zaznaczono charakterystyczne punkty pracy wirnika A i C dla maksimum współczynnika mocy oraz B i D dla minimum. W przypadku turbiny klasycznej Savoniusa, podobnie jak dla turbiny Bacha pozycje kątowe ekstremów współczynnika mocy są niemal identyczne. Dlatego, w tym przypadku również można założyć, że na jeden obrót składają się dwa prawie jednakowe cykle.



Rys. 7. Rozkład prędkości w stacjonarnym układzie odniesienia dla Savoniusa klasycznego dla punktów charakterystycznych A i B

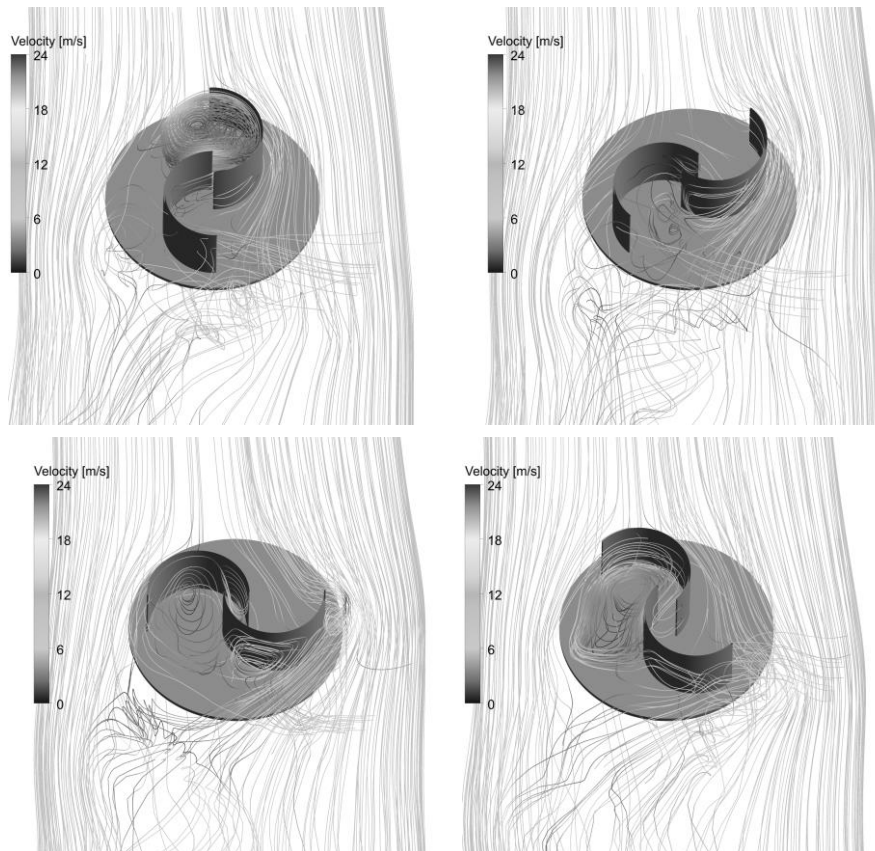
Fig. 7. Velocity distribution in stn. frame for the Classical Savonius rotor for characteristic points A and B

Obraz struktury przepływowej przedstawiony na Rys. 7 dla klasycznej turbiny Savoniusa jest podobny do przedstawionego na Rys. 4 dla turbiny Bacha. Podstawowe zjawiska przepływowe wynikające z charakteru pracy tego typu turbiny są wyraźnie widoczne, tj. w położeniu A obserwuje się przyspieszenie czynnika na części wypukłej łopatki nacierającej z uwagi na pojawienie się tzw. efektu Coandy; w położeniu B widoczna jest strefa stagnacji na łopatkę powracającej. Podobnie jak w poprzednio omawianym przypadku towarzyszy temu szereg wirów, (recyrkulacji, oderwań).

Jednak obecność szczeliny międzyłopatkowej istotnie modyfikuje strukturę przepływu. W położeniu A przepływ, który formuje się po wklęsłej stronie łopatki nacierającej kieruje czynnik na stronę wklęsłą łopatki powracającej skutkuje zmniejszeniem ciśnienia pod łopatką nacierającą, co powoduje zmniejszenie momentu obrotowego generowanego przez tą łopatkę. Z kolei w położeniu B strumień międzyłopatkowy skierowany na stronę wklęsłą łopatki powracającej zwiększając ciśnienie w tej strefie. W efekcie negatywny udział powracającej łopatki w całym mechanizmie powstawania momentu obrotowego zostaje znacząco zmniejszony. W efekcie globalny wpływ obecności szczeliny międzyłopatkowej na osiągi turbin Savoniusa jest pozytywny, co zostało potwierdzone przez wielu badaczy [6,7]. Istotnym czynnikiem jest oczywiście rozmiar szczeliny. Szereg źródeł wskazuje na wartość ok. 0,2 średnicy jako jest optymalną [6]. Niemniej jednak badania [5] dla turbiny z wirnikiem



w konfiguracji Bacha wskazują na negatywny wpływ obecności szczeliny. Należy więc sądzić, że przepływ przez szczelinę międzyłopatkową daje różne efekty w zależności od konfiguracji geometrycznej wirnika.



Rys. 8. Rozkład prędkości w stacjonarnym układzie odniesienia dla różnych pozycji kątowych klasycznego wirnika Savoniusa

Fig. 8. Distribution of the velocity in stationary frame for different angular positions of the Classical Savonius rotor

Na Rys. 8 przedstawiono linie prądu dla położen wirnika 0, 45, 90 i 135° (napływ od góry). Podobnie jak poprzednio można zauważyć zdecydowanie trójwymiarowy charakter skomplikowanych struktur wirowych (recyrkulacji). Linie prądu czytelnie obrazują charakter przepływu przez szczelinę międzyłopatkową z napływem czynnika na stronę wklęsłą łopatki powracającej oraz z dodatkowym zawirowaniem w samej szczelinie. Za wirnikiem można także zaobserwować formację wirów, podobną do struktury znanej jako ścieżka wirowa von Karmana.

## WNIOSKI

Przedstawione w artykule wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Porównanie wartości eksperymentalnych oraz danych otrzymanych na drodze symulacji jasno pokazuje, że symulacje 2D w większym stopniu odbiegają od wyników eksperymentu niż symulacje 3D. Jednakże, tego typu symulacje 3D są dużo droższe (pochłaniają znacznie więcej czasu) niż symulacje 2D.
- Turbina Bacha, która w omawianym przypadku nie posiada szczeliny między łopatkami, ślad aerodynamiczny zajmuje dużo większy obszar niż w przypadku turbiny klasycznej. Można zatem stwierdzić, że nie tylko parametry wydajnościowe powinny być brane pod uwagę przy badaniu tego typu turbin, ale także to jak wpływają one na swoje otoczenie podczas pracy.
- Obecność strumienia przepływającego przez szczelinę międzyłopatową sprawia, że negatywny udział powracającej łopatki w całym mechanizmie powstawania momentu obrotowego zostaje zmniejszony, co korzystnie wpływa na sprawność klasycznej turbiny Savoniusa.

## LITERATURA

- [1] Spera D.A., *Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering*. ASME Press, 2009.
- [2] Wagner H.J. and Mathur J., *Introduction to wind energy systems: basics, technology and operation*. Green energy and technology. Springer, 2009.
- [3] Fujisawa N. and Gotoh F., *Experimental study on the aerodynamic performance of a Savonius rotor*. Journal of Solar Energy Engineering, 116(3):148-152, 1994.
- [4] Ogawa T., *Theoretical study on the flow about Savonius rotor*. ASME J. Fluids Eng., 106:85-90, 1984.
- [5] Kamoji L.M.A., Kedare S.B. and Prabhu S.V., *Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor*. Applied Energy, 86(7-8):1064-1073, 2009.
- [6] Zhao Z. and Zheng and Y. Xu, X. *Research on the improvement of the performance of savonius rotor based on numerical study*. In Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on, page 1-6, 2009.
- [7] Zhou T. and Rempfer D., *Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines*. Renewable Energy, 51(0):373-381, 2013.
- [8] Kacprzak K., Liśkiewicz G. and Sobczak K., *Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines*. Renewable Energy, 60: 578-585, 2013.