

WYBÓR LOKALIZACJI ZABUDOWY MAŁYCH TURBIN WIATROWYCH NA PODSTAWIE BADAŃ SYMULACYJNYCH ZJAWISK W GEOMETRII 3D

Zbigniew PLUTECKI, Paweł SATTLER, Krystian RYSZCZYK

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę oceny wietrzności wiatru na podstawie historycznych danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej zjawisk na wybranym obszarze przestrzeni miejskiej. Badania symulacyjne przeprowadzono z uwzględnieniem przepływów turbulentnych wykorzystując do tego celu pół-empiryczny model $k-\varepsilon$ z dobranymi indywidualnie współczynnikami. Dzięki modyfikacji współczynników modelu uzyskano zgodność jakościową z pomiarami eksperymentalnymi. Wyniki badań symulacyjnych wykorzystano następnie do wyznaczenia w gęstej zabudowie miejskiej stref intensywnej wietrzności pod kątem zabudowy w nich małych turbin wiatrowych. Badania wykonano w oparciu o własne pomiary prędkości i kierunku wiatru oraz obliczenia symulacyjne wykonane w środowisku *Ansys Fluent*.

Słowa kluczowe:

małe turbiny wiatrowe, energia wiatru, badania symulacyjne, przestrzeń miejska

1. Wstęp

Obecna polityka energetyczno-klimatyczna Unii Europejskiej ukierunkowana jest w stronę zmniejszania emisji szkodliwych substancji do atmosfery przy równoczesnym wzroście efektywności energetycznej oraz wzroście udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w produkcji energii elektrycznej. Spełnienie tych założeń wiąże się z promowaniem inwestycjami w nowe źródła energii elektrycznej zarówno w skali mega (źródła energii dla potrzeb przemysłu) jak i mikro (bezpośredni odbiorcy). Polska jest zobowiązana do uzyskania 15% udziału OZE w zużyciu energii elektrycznej do roku 2020 r. Wg danych Urzędu Regulacji Energetyki udział ten wynosił w 2012 ok. 10,5 % co jest wynikiem zadowalającym. Dla porównania średni udział OZE w krajach Unii Europejskiej stanowi 13% całkowitego zużycia energii elektrycznej [1].

Stosowanie odnawialnych źródeł energii to głównie domena obszarów o małym stopniu zurbanizowania. Na tych obszarach dużo łatwiej jest wskazać dobrą lokalizację pod zabudowę farm fotowoltaicznych czy wiatrowych. W przypadku stosowania turbin wiatrowych na uzyskaną efektywność ekonomiczną inwestycji w bardzo dużym stopniu wpływa znajomość średnio-rocznych wartości prędkości wiatru. W zabudowie miejskiej dodatkowo niezbędna jest znajomość szorstkości terenu. W klasycznym podejściu do projektowania wykorzystuje się do tego celu współczynniki szorstkości terenu, których stosowanie nie gwarantuje jednak należytej dokładności wyników analizy.

Obecne możliwości techniczne pozwalają na prowadzenie dokładnych analiz, których celem jest wskazanie właściwej lokalizacji dla zabudowy turbin wiatrowych na terenach miejskich. Autorzy publikacji zastosowali do tego celu badania hybrydowe, które wykorzystują dostępne techniki pomiaru prędkości i kierunku wiatru realizowane w konkretnej lokalizacji oraz modelowanie zjawisk przepływowych z uwzględnieniem

topologii terenu i lokalnych warunków wynikających z konkretnej zabudowy terenu. Wykorzystanie w przedmiotowej analizie badań symulacyjnych pozwala na opracowanie tzw. map lokalnej wietrzności na podstawie, której można wskazać najwłaściwsze miejsca dla zabudowy turbin wiatrowych.

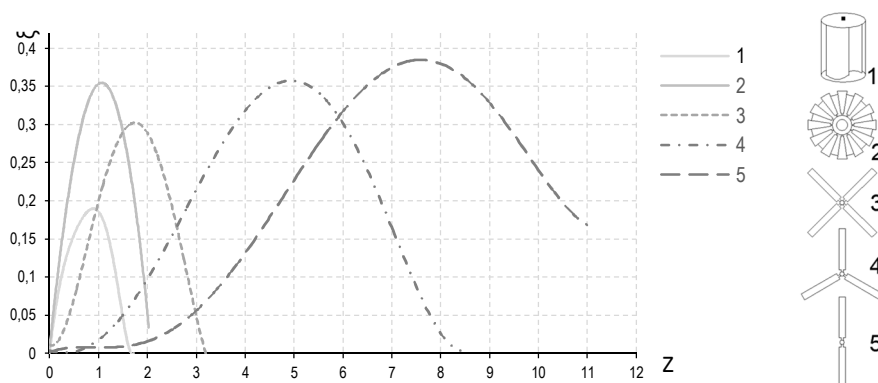
2. Możliwości i ograniczenia stosowalności małych turbin wiatrowych

Oceny właściwości turbin wiatrowych dokonuje się w oparciu o parametry techniczne. Najważniejszym z nich jest współczynnik wykorzystania wiatru ξ wyrażony wzorem:

$$\xi = \frac{E_0 - E_2}{E_0} \cdot \eta, \quad [-] \quad (1)$$

gdzie: E_0 - energia strumienia przed wirnikiem, E_2 - energia strumienia za wirnikiem, η – sprawność wirnika

Ponadto do oceny efektywności technicznej stosuje się wyróżnik szybkobieżności Z , który wyraża stosunek prędkości obwodowej końca łopatki do prędkości wiatru. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki wykorzystania wiatru w funkcji wyróżnika szybkobieżności Z dla różnych konstrukcji turbin wiatrowych.



Rys. 1. Współczynnik wykorzystania wiatru dla typowych konstrukcji generatorów wiatrowych

Biorąc pod uwagę uwarunkowania związane z dostępnością rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie małych i średnich turbin wiatrowych oraz częstość występowania wiatru i jego prędkości oraz zmienności kierunku do zabudowy w warunkach miejskich preferowanymi konstrukcjami są turbiny z pionową osią obrotu.

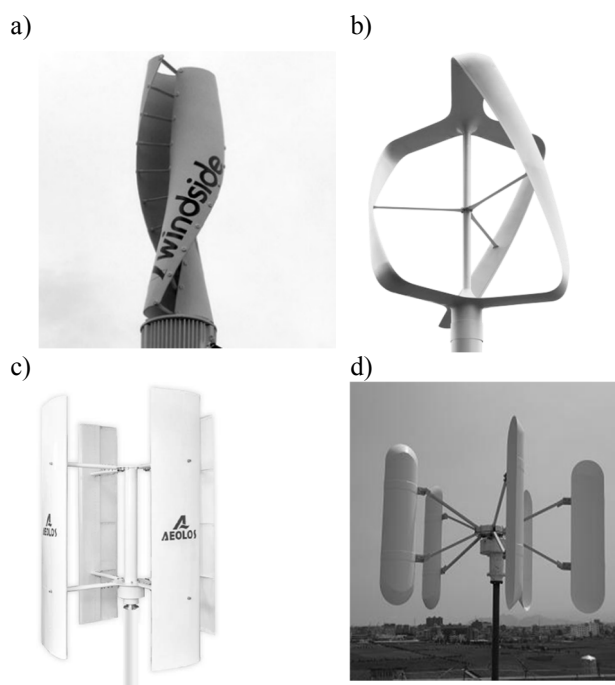
Większość konstrukcji turbin wiatrowych VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*) bazuje na trzech podstawowych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Są to silniki *Savonius'a*, *Darrieus'a* oraz rotory typu *H*. Przykłady takich rozwiązań przedstawiono na rysunku 2.

W porównaniu z turbinami o poziomej osi, turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu wykonują pracę niezależnie od kierunku wiatru a przy tym nie wymagają zatrzymania przy wiatrach huraganowych (powyżej 40m/s) ponieważ kształt wiatraka jak i wbudowane sprzęgła magnetyczne mogą bezpiecznie obniżyć prędkość obrotową takich turbin.

Do zalet należy zaliczyć niewielką prędkość początkową wiatru przy której generator zaczyna wytwarzać prąd, cichą pracę, która nie generuje dużych drgań przenoszonych na konstrukcję budynku, a przy zachowaniu wytycznych producentów, udzielana jest

gwarancja na bezawaryjną pracę nawet do 10 lat. W zabudowie miejskiej ważnym aspektem jest również estetyczny wygląd turbin.

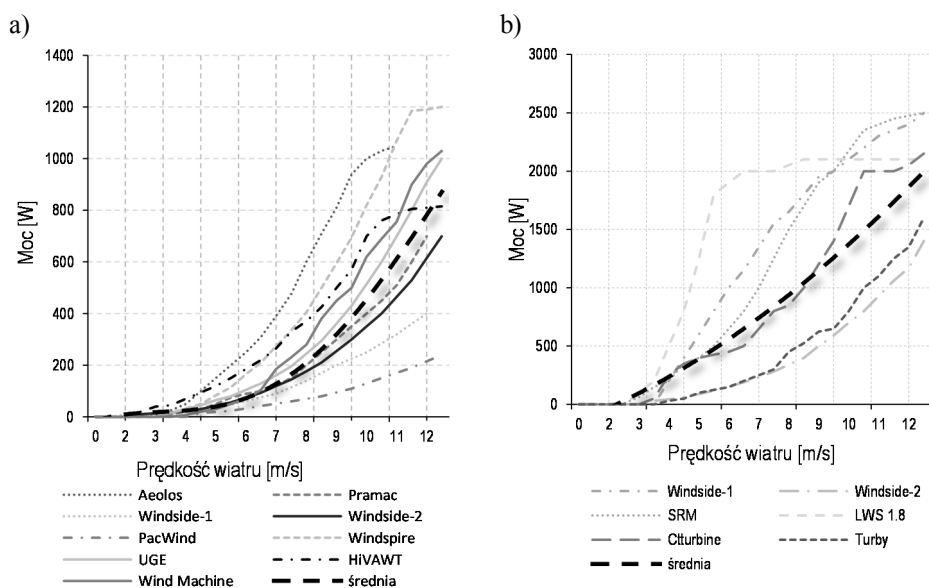
Główną wadą turbin z pionową osią pionową jest sam kształt turbin, który powoduje że napędzana przez jedną z łopatek turbina jest jednocześnie hamowana przez przeciwległą łopatkę. To negatywnie wpływa na sprawność turbiny i przyczynia się do osiągania niewielkich prędkości obrotowych. Dla poprawy efektywności takich turbin stosuje się generatory wolnobieżne lub wyposażone w przekładnię. Porównanie sprawności oferowanych na polskim rynku turbin wiatrowych z pionową osią obrotu przedstawiono na rysunku 3. Wynika z niego duże zróżnicowanie w osiągniętej sprawności i powinno stanowić podstawę racjonalnego wyboru przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnej. Na rysunku dodatkowo zaznaczono charakterystykę średnią (gruba linia przerywana), poziom której zdaniem autorów powinien stanowić tzw. kryterium jakości *BAT* (*Best Available Technology* – najlepsze dostępne techniki).



Rys. 2. Rozwiązania konstrukcyjne wybranych wirników turbin wiatrowych: a) *Windside* WS-4 o mocy 2kW; b) *Pramac* - 1kW; c) *Aeolos* - 1kW; d) *Kino Electrics* - 1kW,

3. Propozycja badań własnych

Do badań wytypowano pewien fragment terenu miasta Opola wraz ze znajdującą się na nim zabudową i ukształtowaniem terenu. Przyjęty do modelowania obszar został wybrany ponieważ są na nim prowadzone od kilku lat pomiary prędkości i kierunku wiatru. Wyznaczone na tej podstawie średnie wieloletnie prędkości i kierunki wiatru wykorzystano w analizie, której wybrane wyniki przedstawiono poniżej.



Rys. 3. Porównanie wybranych turbin wiatrowych pod względem osiągniętej mocy przy różnej mocy nominalnej: a) 1kWe, b) 2kWe

4. Założenia i uproszczenia

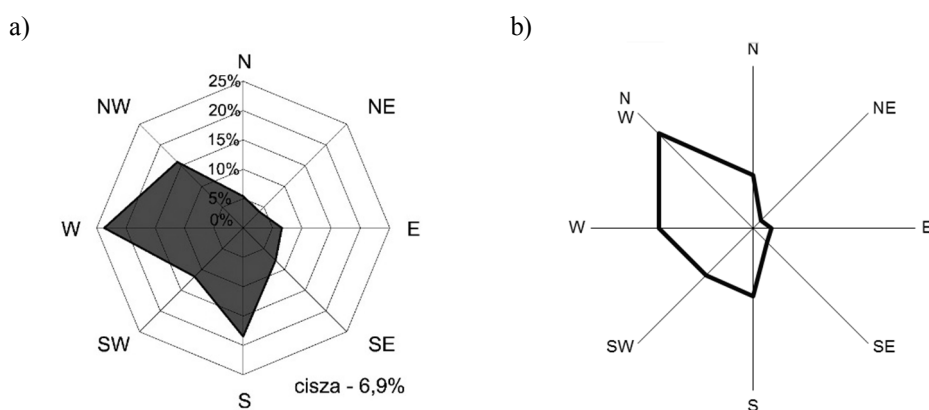
Dla potrzeb realizacji badań przyjęto pewne założenia i uproszczenia. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: uproszczenie geometrii obiektów budowlanych, zieleni wysokiej i niskiej oraz ukształtowania terenu. Obiekty budowlane zamodelowano jako proste bryły, których gabaryty odwzorowują kształt i wymiary zewnętrzne obiektów rzeczywistych. Modelownie obiektów zrealizowano na podstawie archiwalnej dokumentacji technicznej. Natomiast gabaryty obiektów nie posiadających dokumentacji zostały przyjęte na podstawie innych źródeł takich jak: mapy geodezyjne, mapy satelitarne, zdjęcia obiektów a także własne pomiary wykonane przy użyciu dalmierza laserowego. Dla potrzeb lepszego odwzorowania geometrii zagospodarowania terenu w modelu zostały uwzględnione elementy żywej architektury krajobrazu jakimi są drzewa i krzewy. Roślinność drzewiasta tworzy naturalną osłonę przed wiatrem, która to może ograniczyć prędkość wiatrów w granicach 20-80% [2]. Teren ze względu na niewielkie różnice poziomów przyjęto jako płaski.

5. Wyniki pomiaru częstości i róży wiatrów

Miasto Opole leży na obszarze Niziny Śląskiej w rejonie Równiny Opolskiej rozciętej doliną Odry. Główne parametry klimatu województwa opolskiego są równoważne z cechami klimatu umiarkowanego. Na podstawie danych meteorologicznych można stwierdzić że klimat należy do łagodnych.

Klimat miasta jest w dużym stopniu uwarunkowany doliną Odry, która jest główną osią przemieszczania się powietrza z południa (przez Bramę Morawską) i z zachodu (wzdłuż nizin środkoeuropejskich). Ciepłe i wilgotne powietrze południowe jak i znad Atlantyku

powoduje stabilizację warunków termicznych przejawiającą się niską amplitudą temperatur w ciągu roku [3]. Położenie Opolu w dolinie Odry wiąże się także z negatywnymi następstwami. W okresach bezwietrznych dochodzi do częstego zamglenia oraz podwyższenia wilgotności powietrza. W Opolu dominuje zachodni i południowy kierunek wiatru (rys. 4a). Procentowy udział w ciągu całego roku wynosi odpowiednio 23,7% oraz 18,5%. W poszczególnych miesiącach częstość występowania i kierunek wiatru może wyglądać nieco inaczej. Dla przykładu w listopadzie dominującym jest wiatr z kierunku północno-zachodniego.



Rys.4. Róża wiatrów w Opolu: a) wartości średnie roczne, b) wartości średnie w miesiącu listopadzie

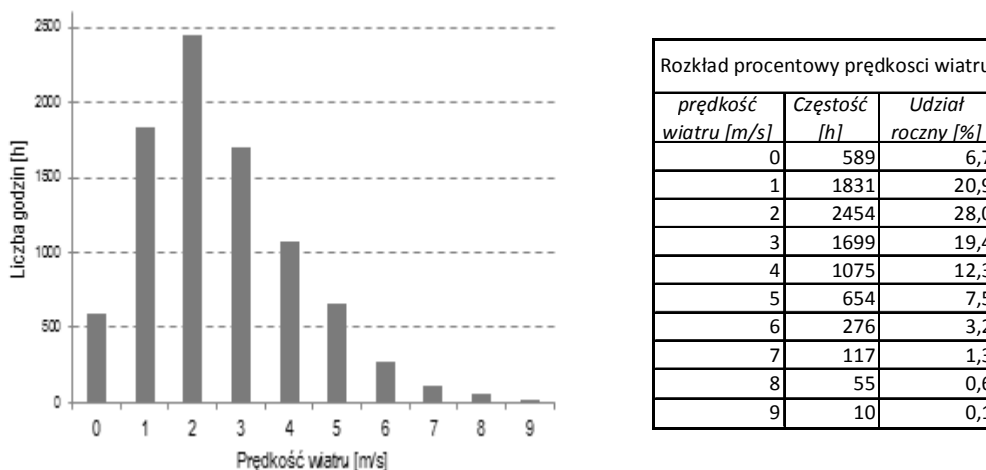
Do obliczeń wykorzystano dane meteorologiczne wg [4] oraz pomiary własne wykonane na dachu jednego z budynków zlokalizowanych w analizowanej strefie. Wartości średnioroczne wyznaczono jako wartości występujące w typowym roku statystycznym, który wyznacza się na podstawie wieloletnich pomiarów. Dla Opolu historia ta sięga 30 lat (1971-2000). Pomiary własne obejmują okres 3 lat.

Podstawą sporządzania analiz wietrzności danego terenu jest znajomość rozkładu częstości występowania danej prędkości wiatru w ciągu roku. Najwłaściwszą metodą przedstawienia rozkładu prędkości jest forma graficzna w postaci histogramu. Powstaje ona poprzez wstępne uporządkowanie i pogrupowanie danych pomiarowych, poprzez kryterium prędkości wiatru. Dla badania rozkładu prędkości każda z grup jest przedziałem kolejnych prędkości wiatru o jednostkowym skoku. Każdy przedział prędkości wiatru ma swoją wyznaczoną liczbę godzin wyznaczoną na podstawie jej wartości występowania w ciągu roku [7].

$$f_i = \frac{n_i}{N}, \quad [-] \quad (2)$$

Częstość występowania wiatrów w analizowanym obszarze przedstawiono na rysunku 5. Wynika z niego, że największy godzinowy udział mają wiatry o prędkości w przedziale od 1 m/s do 5 m/s. Podane wartości wyznaczono z dokładnością do jednej pełnej godziny,

przy niepewności pomiarowej urządzeń sięgającej kilka procent, co spełnia warunki wstępnego oszacowania wietrzności w danej lokalizacji.



Rys.5. Histogram prędkości wiatru dla miasta Opola. Opracowanie własne na podstawie [4]

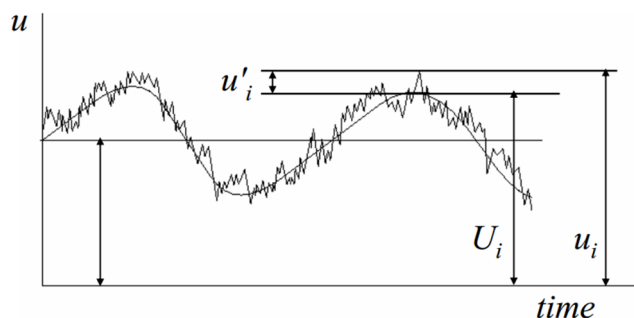
6. Opis założeń modelu do symulacji zjawisk przepływowych

Podstawę analizy zjawisk przepływowych w geometrii 3D stanowią równania ruchu zwane równaniami *Naviera Stokes'a* dla przepływów laminarnych oraz równania *Reynoldsa* w zakresie przepływów turbulentnych. W zakresie badanego obiektu ruch powietrza należy analizować z uwzględnieniem hipotezy *Osborne Reynoldsa* (1842-1912), która zapisuje parametry przepływu jako sumy wartości średnich oraz powstających lokalnych fluktuacji turbulentnych:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (3)$$

gdzie u_i – prędkość przepływu uśrednionego, p_i – ciśnienie płynu

Graficzne przedstawienie tej hipotezy dla jednej z płaszczyzn przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Wartości prędkości przepływu wg hipotezy *Reynoldsa* [5]

Dla wybranego kierunku uśrednioną wartość fluktuacji można wyznaczyć ze wzoru:

$$\bar{u}'(x, t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u'(x, t) dt \quad (4)$$

Do wyznaczenia naprężeń turbulentnych zastosowano hipotezę *Boussinesqua*, na podstawie której wartości naprężenia zależą od składowych tensora prędkości deformacji ruchu uśrednionego oraz od tak zwanej lepkości turbulentnej μ_t . Koncepcję tę wyraża zależność [Plutecki_2012]:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

Po uwzględnieniu powyższej hipotezy równanie ruchu przyjmuje postać:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial \rho k}{\partial x_i} - g_i \rho \beta (T - T_0) \quad (6)$$

w którym współczynnik μ_{ef} jest sumą współczynników lepkości laminarnej i turbulentnej

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

i nazywany jest współczynnikiem lepkości efektywnej.

Modele turbulencji budowane w oparciu o hipotezę *Boussinesqua* wymagają wyznaczenia wartości lepkości turbulentnej μ_t . Biorąc pod uwagę swoje wcześniejsze doświadczenia, w tym względzie, autorzy przyjęli za najkorzystniejszy dwurównaniowy model turbulencji, którego podstawą jest równanie transportu kinetycznej energii turbulencji k , definiowanej jako [6,68]:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (8)$$

oraz równanie dyssypacji kinetycznej energii turbulencji ε , definiowanej jako:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \quad (9)$$

Obecnie jest stosowanych kilka modeli wykorzystujących powyższe zależności (8 i 9), które potocznie noszą nazwę *modeli k-ε*. Z pośród nich do dalszych zastosowań przyjęto model turbulencji *Realizable k-ε* ze względu na składnik związany z obecnością siły wyporu, który został uwzględniony również w równaniach ruchu. W modelu *Realizable k-ε* rozkłady kinetycznej energii turbulencji k i dyssypacji kinetycznej energii turbulencji ε uzyskuje się z równań:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho a_{ij}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (11)$$

Po rozwiązaniu równań (10) i (11) lepkość turbulentna μ_t będzie obliczana z zależności:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

W skład modelu turbulencji, opisanego równaniami (10) ÷ (12), wchodzi zestaw stałych współczynników liczbowych $C_{1\varepsilon}$, C_2 , σ_k , σ_ε , które są przyjmowane na podstawie doświadczeń. Do obliczeń przyjęto wartości stałych modelu *Realizable k-ε* według tabeli 4.

Tab. 4. Wartości zmiennych opisujących przyjęty model

Wartości	c_μ	σ_k	σ_ε	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$
model k-ε standardowy	0,09	1,00	1,3	1,44	1,92
model k-ε zmodyfikowany	0,0324	1,0	1,85	1,44	1,92

7. Implementacja modelu

Geometrię obszaru obliczeniowego wykonano w środowisku *Autocad 2013*. Do realizacji badań symulacyjnych wykorzystano środowisko *Ansys* w wersji 15, w którym zawarte są narzędzia służące nie tylko do modelowania zjawisk przepływowych płynów, ale również moduły służące m.in. do wygenerowania geometrii obiektu lub jej importu z zewnętrznego oprogramowania, dyskretyzacji obszaru obliczeniowego, moduł wykonujący obliczenia numeryczne oraz moduł wizualizacji wyników z przedstawieniem ich w formie graficznej.

Zasadnicze obliczenia numeryczne wykonano w programie *Ansys - Fluent*. Program ten jest dedykowany do modelowania zjawisk związanych z przepływami płynów ściśliwych jak i nieściśliwych oraz uwzględnienia również zjawisk z zakresu przepływu ciepła. Dla potrzeb realizacji badań symulacyjnych przyjęto następujące warunki brzegowe:

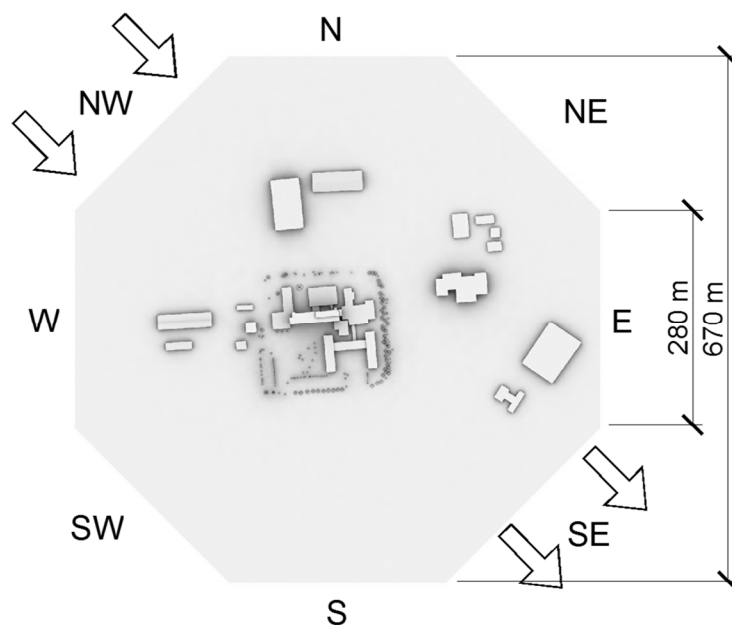
- kierunek wiatru - północno zachodni o zmiennej prędkości w zakresie 3 ÷ 5 m/s ,
- ciśnienie odpowiadające średniej wartości ciśnienia atmosferycznego 101325 Pa,
- płyn - powietrze o temperaturze 15°C,
- wymiana ciepła – brak,
- stan ustalony.

8. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych

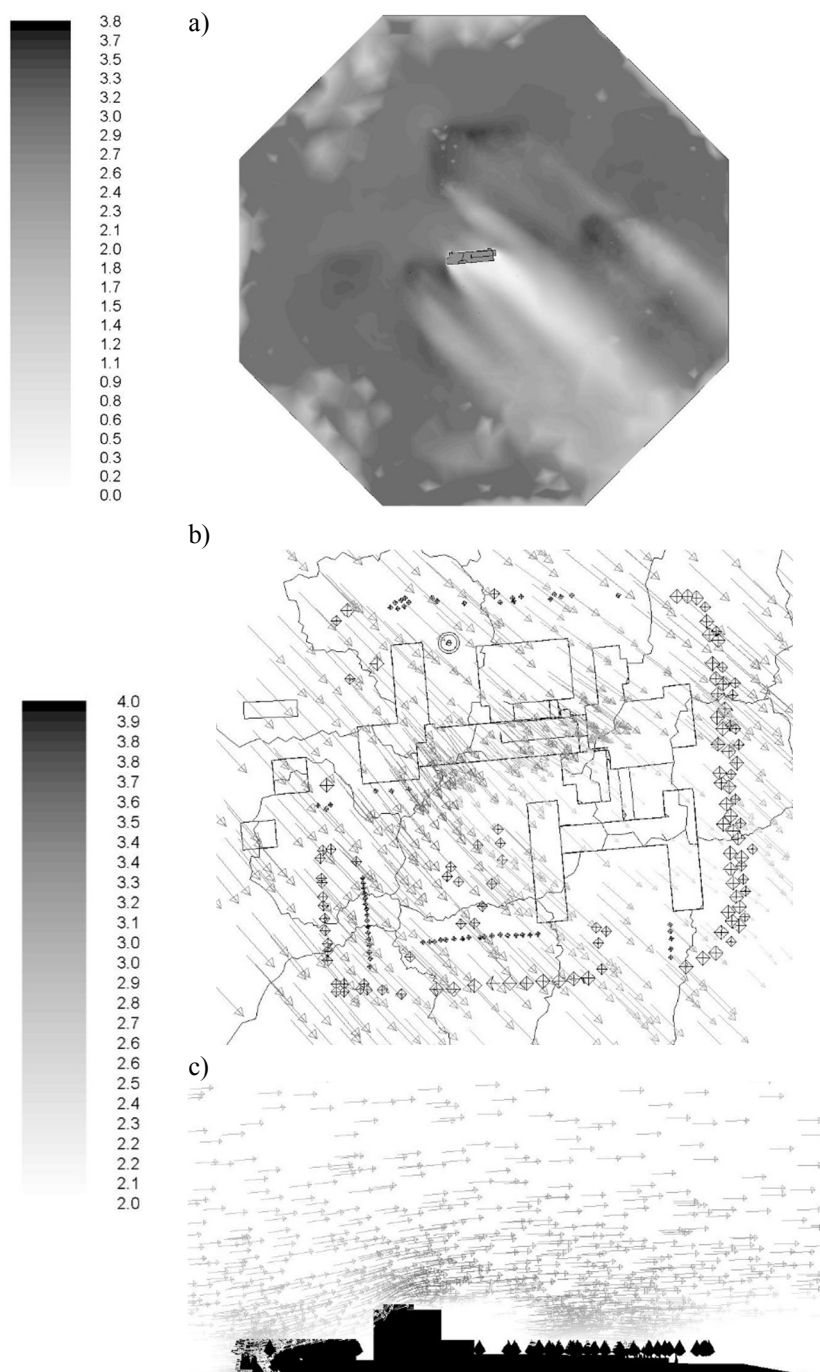
Obszar obliczeniowy z wraz z obiektami oraz opisem najważniejszych warunków obliczeniowych przedstawiono na rysunku 7. Na kolejnym rysunku (8a, 8b, 8c)

przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń w postaci rozkładu prędkości wiatru na trzech różnych wysokościach w płaszczyznach równoległych do kierunku wiatru (północno-zachodniego). Wynika z niego między innymi, że w badanym obszarze występują miejsca o zwiększonej wietrzności spowodowanej głównie ukształtowaniem i zagospodarowaniem terenu. Największe prędkości wiatru zaobserwowano na wysokości około 2 – 4m nad krawędzią ściany i dachu najwyższego budynku od strony kierunku wiatru. W tej lokalizacji prędkość powietrza jest dwukrotnie większa niż na pozostałych wysokościach badanego obszaru. Jest spowodowane znaczną zmianą kierunku przepływu mas powietrza wywołanego przeszkodą w postaci budynku.

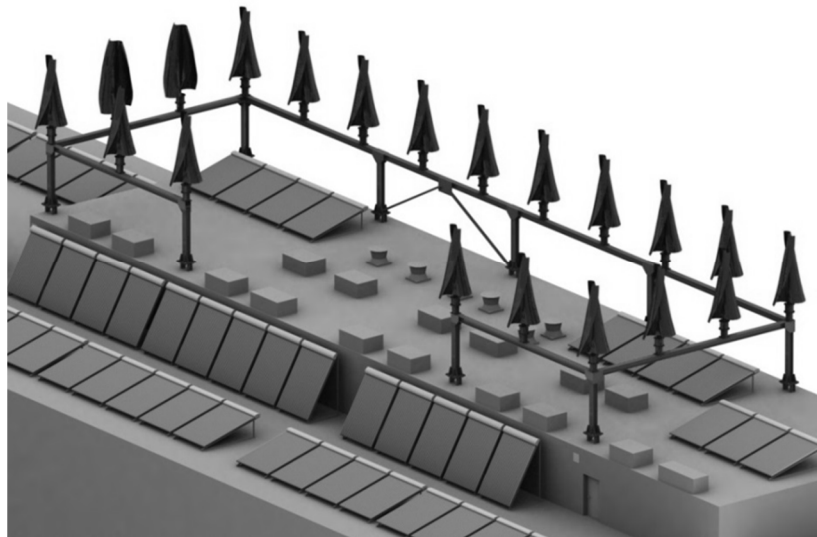
Właściwe badania symulacyjne obejmowały wykonanie obliczeń przy różnych kierunkach wiatru i przy różnej prędkości wiatru odpowiadających najczęściej występującym warunkom rzeczywistym jakie zmierzono w wybranych miejscach badanego obszaru. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń symulacyjnych i przy uwzględnieniu częstości występowania kierunku wiatru (róża wiatrów) autorzy wskazali najkorzystniejsze miejsce do zabudowy małych turbin wiatrowych. Przykład rozwiązania zabudowy turbin wiatrowych o mocy nominalnej 2kW w ilości 20 szt. przedstawiono na rysunku 9. Zaproponowana konfiguracja i sposób montażu turbin wiatrowych zapewnia stabilną produkcję energii elektrycznej na poziomie 50% łącznej mocy zainstalowanych turbin bez względu na chwilowy kierunek wiatru.



Rys.7. Przyjęty obszar obliczeniowy



Rys.8. Przykładowe wyniki obliczeń: a) mapa rozkładu prędkości powietrza oraz rozkład wektorów prędkości wiatru w płaszczyźnie: b) poziomej na wysokości $h = 20\text{m}$ i c) w płaszczyźnie pionowej badanego obszaru.



Rys.9. Przykład rozwiązania zabudowy małych turbin wiatrowych na dachu budynku zlokalizowanego w badanym obszarze - na dachu budynku zlokalizowane są również kolektory słoneczne

9. Wnioski

W artykule przedstawiono najważniejsze zdaniem autorów kryteria na podstawie których należy rozpatrywać zasadność budowy lokalnych źródeł energii elektrycznej w zabudowie wysoce zurbanizowanej. Najważniejszym kryterium technicznych przy wyborze konstrukcji małych turbin wiatrowych powinna być charakterystyka mocy w funkcji prędkości wiatru (sprawność). Wskazano w tym zakresie własne kryterium jakościowe. O osiągniętej efektywności ekonomicznej będą decydować ponadto trwałość i niezawodność turbin wiatrowych, koszt ich zakupu, koszt serwisu i remontów.

Bardzo ważnym elementem decydującym o zasadności budowy małych farm wiatrowych w zabudowie miejskiej to wybór właściwego miejsca ich montażu. W artykule zaproponowano sposób wyznaczania stref, w których zabudowa turbin spowoduje wykorzystanie lokalnych uwarunkowań intensyfikujących średni zakres występowania prędkości wiatru w wyniku ukształtowania i zagospodarowania terenu. Można w ten sposób zwiększyć roczną produkcję energii elektrycznej o blisko 25%.

Analiza wyników badań symulacyjnych pozwoliła stwierdzić, iż uzyskane rozkłady pól prędkości są zbliżone do wartości rzeczywistych, które zmierzono lokalnie na wybranych obiektach przy średniej prędkości wiatru odpowiadającej przyjętym warunkom obliczeń. Było to możliwe dzięki dokładności odwzorowania obszaru obliczeniowego oraz metody modelowania zjawisk przepływowych. Zaproponowany kształt obszaru obliczeniowego pozwala na prowadzenie badań wielowariantowych poprzez prostą zmianę wartości brzegowych na granicy obszaru obliczeniowego. Dzięki temu można analizować wpływ kierunku i prędkości wiatru na rozkład prędkości w dowolnym miejscu badanego obszaru. Za pomocą prezentowanej metody mogą być wyznaczane lokalizacje dla zabudowy turbin wiatrowych w innych obszarach miasta lub całych aglomeracjach miejskich.

Literatura

1. Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dn. 10 listopada 2009r.
2. Szopińska E., Zygmunt-Rubaszek J.: Propozycje standardów w zakresie kształtowania zieleni wysokiej miejskich tras komunikacyjnych, Wrocław 2010, str. 2-5
3. Badora K., Hebda G.: Inwentaryzacja przyrodnicza miasta Opola, Dane archiwalne Urząd Miasta Opola 2007, str. 4-6
4. Narowski P.G., Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 11, 2006.
5. Celik I.B., Introductory Turbulence Modeling, West Virginia University Mechanical & Aerospace Engineering Dept. Virginia 1999, str 26-30.
6. Wallbank T.: WindSim Validation Study CFD validation in Complex terrain, 2008.
7. Plutecki Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji, Studia i monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012r.

Dr hab. inż. Zbigniew Plutecki¹, prof. PO

Mgr inż. Paweł Sattler²

Mgr inż. Krystian Ryszczuk²

¹) Katedra Zarządzania Energetyką

²) Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych

Politechnika Opolska

45-758 Opole, ul. Prószkowska 76

tel.: (0-77) 449 80 24

tel.: (0-77) 449 80 23

e-mail: z.plutecki@po.opole.pl

p.sattler@po.opole.pl

k.ryszczuk@po.opole.pl