

Roman Buczkowski
Bartłomiej Igliński
Marcin Cichosz

Technologie aeroenergetyczne



WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2014



Spis treści

Słowo wstępne	9
Wprowadzenie.....	11
1. Wiatr – powstawanie i rodzaje.....	23
1.1. Wiatr – definicja i mechanizm powstawania	23
1.2. Typy wiatrów.....	25
1.2.1. Pasaty.....	25
1.2.2. Monsuny	26
1.2.3. Bryza.....	27
1.2.4. Fen.....	29
1.2.5. Inne rodzaje wiatrów.....	30
1.3. Siła wiatru. Skala Beauforta	31
Literatura	34
2. Typy elektrowni wiatrowych.....	37
2.1. Podział elektrowni wiatrowych.....	37
2.2. Pierwsze turbiny produkujące prąd elektryczny	38
2.3. Współczesne turbiny o poziomej osi obrotu.....	41
2.3.1. Budowa turbiny o poziomej osi obrotu	42
2.4. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu.....	45
2.5. Turbiny wyposażone w dyfuzor.....	49
2.6. Inne rozwiązania konstrukcyjne turbin wiatrowych	50
2.7. Przenośne turbiny wiatrowe	55
2.8. Wieża słoneczna.....	58
2.9. Projekty turbin wiatrowych	59
2.10. Prognozy dla turbin wiatrowych	61
Literatura	62



3. Podstawy aerodynamiki wiatraków	67
3.1. Zasoby energetyczne wiatru	67
3.2. Konstrukcja turbin wiatrowych a wyróżnik szybkobieżności	71
3.3. Profile stosowane w konstrukcjach łopat elektrowni wiatrowych	73
3.4. Podstawowe pojęcia z aerodynamiki	78
3.4.1. Równanie ciągłości	79
3.4.2. Prawo Bernoulliego	79
3.4.3. Ciśnienie spiętrzenia przed przeszkodą	81
3.4.4. Przepływy potencjalne	83
3.4.5. Cyrkulacja i ruch wirowy	83
3.4.6. Zjawisko Magnusa	84
3.4.7. Przepływy burzliwe i warstwa przyścienna	85
3.5. Kształt opływowy	86
3.5.1. Czołowe parcie wiatru	87
3.6. Nacisk wiatru na płaszczyzny ustawione ukośnie	88
3.7. Nacisk wiatru na ciała o profilach opływowych	89
3.8. Współczynniki aerodynamiczne	90
3.8.1. Doskonałość profilu	93
3.9. Siła nośna wybranych profili	95
3.9.1. Zagadnienie oporu indukcyjnego	97
Literatura	99
4. Aeroenergetyka w Polsce	105
4.1. Historia wiatraków w Polsce	105
4.1.1. Wiatrak koźlak – budowa i zasada działania	107
4.1.2. Wiatrak wieżowy – budowa i zasada działania	112
4.1.3. Wiatrak paltrak – budowa i zasada działania	113
4.1.4. Inne typy wiatraków drewnianych w Polsce	115
4.2. Wiatraki w kulturze i religii	116
4.3. Skanseny z wiatrakami	118
4.4. Warunki wietrzne	121
4.5. Potencjał aeroenergetyki	125
4.6. Aeroenergetyka w Polsce – stan obecny	130
4.6.1. Przemysł i zatrudnienie w polskiej aeroenergetyce	134
4.6.2. System wsparcia aeroenergetyki	136
4.7. Wymagania formalnoprawne wybudowania elektrowni wiatrowej	136

4.8. Ocena oddziaływania elektrowni wiatrowej na środowisko	141
4.9. Montaż elektrowni wiatrowej	156
4.10. Scenariusze rozwoju aeroenergetyki	160
4.11. Aeroenergetyka w Polsce – badania ankietowe.....	162
Literatura	163
5. Aeroenergetyka na świecie.....	169
5.1. Żeglarstwo	169
5.2. Historia aeroenergetyki na świecie	172
5.3. Współczesne wykorzystanie energii wiatru na świecie	174
5.4. Rozwój aeroenergetyki morskiej	179
5.5. Największe na świecie lądowe farmy wiatrowe.....	182
5.6. Największe na świecie morskie farmy wiatrowe	187
Literatura	189
6. Oddziaływanie elektrowni wiatrowych na środowisko.....	195
6.1. Wpływ elektrowni wiatrowych na człowieka	195
6.2. Wpływ elektrowni wiatrowych na zwierzęta.....	198
6.2.1. Wpływ elektrowni wiatrowych na ptaki	198
6.2.2. Wpływ elektrowni wiatrowych na nietoperze.....	201
6.2.3. Wpływ morskich elektrowni wiatrowych na ryby.....	202
6.2.4. Wpływ elektrowni wiatrowych na inne zwierzęta.....	202
6.3. Wpływ elektrowni wiatrowych na krajobraz i mikroklimat	203
6.4. Czy warto rozwijać aeroenergetykę?	204
Literatura	213





Słowo wstępne

Przekazujemy Państwu opracowanie monograficzne *Technologie aeroenergetyczne*, mając nadzieję, że wzbudzi Państwa zainteresowanie. Naszym zamierzeniem było zaprezentowanie stanu aktualnego i perspektyw rozwoju energetyki opartej na energii wiatru. Jest to zarazem kontynuacja naszych wcześniejszych opracowań związanych z tematyką energetyki odnawialnej zatytułowanych: *Technologie bioenergetyczne*, *Technologie geoenergetyczne* oraz *Technologie helioenergetyczne*.

Ogromna siła wiatru zainspirowała naszych przodków do jej wykorzystania w celach gospodarczych. Niewielu z nas zdaje sobie sprawę, że wielkie odkrycia geograficzne były możliwe dzięki energii wiatru, która napędzała żaglowce. Pierwszy opis wiatraka do transportowania wody powstał w Indiach 400 lat p.n.e., a 200 lat p.n.e. w Chinach stosowano wiatraki w kształcie kołowrotów do nawadniania pól uprawnych. Najwcześniejsze zachowane pisma urzędowe, mówiące o gospodarczym wykorzystaniu energii wiatru w Polsce, pochodzą z końca XIII w. Pierwszym dokumentem jest zezwolenie na budowę młynów poruszanych wodą lub wiatrem, nadane klasztorowi w Białym Buku przez księcia Wiesława z Rugii. Intensywny rozwój młynów wietrznych w Polsce nastąpił w XIX w. Koniec XIX w. to nowy rozdział aeroenergetyki – wykorzystanie wiatraków do produkcji prądu elektrycznego. Obecnie obserwuje się prawdziwy rozkwit aeroenergetyki na świecie.

Turbiny wiatrowe produkują niemal darmową energię odnawialną, nie przyczyniają się do emisji gazów cieplarnianych, mogą pracować zarówno na lądzie, jak i na morzu. Niewłaściwie zaprojektowane i posadowione mogą jednak negatywnie oddziaływać na zdrowie człowieka, środowisko i krajobraz. Należy więc z aeroenergetyką postępować zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.



W naszej ocenie opublikowany materiał w przeważającym stopniu ma charakter faktograficzny, a przytoczone rozwiązania proekologiczne z całą pewnością wymagają pełniejszej analizy technicznej. Licząc zatem na życzliwe przyjęcie przekazanego Państwu opracowania, wyrażamy pełne przekonanie, iż kolejna edycja monografii poświęconej aeroenergetyce pozwoli nam zamieścić przykłady wdrażanych technologii proekologicznych w tym obszarze.

Autorzy



Wprowadzenie

Człowiek od dawna wykorzystuje energię do celów gospodarczych. Początkowo była to energia odnawialna, oparta na biomasie, energii Słońca, geotermii czy wietrze. Rewolucja przemysłowa i promocja paliw kopalnych sprawiły, że to węgiel i ropa naftowa są obecnie najważniejszymi źródłami energii w większości krajów na świecie. Do lat 70. XX w. paliwa kopalne były tanie, obecnie ich ceny rosną w szybkim tempie, dławiąc gospodarkę wielu państw.

Ostatnie lata to powrót energetyki do źródeł odnawialnych. Na całym świecie buduje się biogazownie rolnicze, elektrownie: wodne, słoneczne i wiatrowe czy elektrociepłownie geotermalne. Wbrew obiegowym opiniom to nie chęć ochrony środowiska (aczkolwiek bardzo ważna), ale zmniejszające się zasoby paliw kopalnych i przede wszystkim ich coraz wyższa cena są głównym motorem powrotu światowej energetyki do źródeł odnawialnych.

Rozwój energetyki odnawialnej ma ogromne znaczenie dla realizacji polityki energetycznej Polski do 2030 r. [1]. Zwiększenie wykorzystania tych źródeł niesie za sobą większy stopień uniezależnienia się od dostaw z importu. Promowanie wykorzystania OZE pozwala na zwielokrotnienie stopnia dywersyfikacji źródeł dostaw oraz na stworzenie warunków do rozwoju energetyki rozproszonej, opartej na lokalnie dostępnych surowcach. Energetyka odnawialna to zwykle niewielkie jednostki wytwórcze, zlokalizowane blisko odbiorcy, co pozwala na podniesienie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego i zmniejszenie strat przesyłowych. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych cechuje się niewielką lub zerową emisją zanieczyszczeń, co zapewnia pozytywne efekty ekologiczne. Rozwój energetyki odnawialnej przyczynia się również do rozwoju słabiej rozwiniętych regionów (Polska wschodnia i północna) bogatych w zasoby energii odnawialnej.

Technologie geoenergetyczne obejmują technologie związane z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii z wnętrza Ziemi [2]. Energia geotermiczna jest wewnątrz-



nym ciepłem Ziemi zgromadzonym w magmie, skałach i płynach (woda, para wodna, ropa naftowa itp.); energia geotermalna obejmuje natomiast część energii geotermicznej zawartej w wodzie, parze wodnej oraz gorących suchych skałach. Od wielu lat stosuje się bezpośrednie wykorzystanie energii geotermalnej: baseny i kąpieliska z wodą geotermalną, ogrzewanie budynków mieszkalnych, stawów hodowlanych i szklarni, suszenie płodów rolnych, topnienie śniegu itp. Od ponad 100 lat nowy rozdział technologii geoenergetycznych to wytwarzanie prądu elektrycznego w elektrowniach geotermalnych.

Polska należy do krajów posiadających bogate złoża wód geotermalnych o niskiej i średniej entalpii. 80% kraju ma dobre warunki do pozyskiwania ciepła geotermalnego na cele grzewcze, rekreacyjne i balneologiczne. Obecnie w Polsce działa 6 ciepłowni geotermalnych w: Pyrzycach, Stargardzie Szczecińskim, Uniejowie, Mszczonowie i Bańskiej Niżnej. Pierwszym zakładem, który rozpoczął działalność w Polsce, była Geotermia Podhalańska. Źródłem ciepła dla PEC Geotermii Podhalańskiej są wody termalne wydobywane z wapieni i dolomitów triasu środkowego oraz eocenu numulitowego. Wody te są ujmowane dwoma otworami produkcyjnymi: Bańska IG-1 (il. 1) i Bańska PGP-1 oraz zatłaczane dwoma otworami chłonnymi: Biały Dunajec PAN-1 i Biały Dunajec PGP. Zatwierdzone zasoby eksploatacyjne dla otworu Bańska PGP-1 to 550 m³/h, dla otworu Bańska IG-1 120 m³/h, natomiast zasoby dyspozycyjne to 23 600 m³/dobę. Temperatura wód na wypływie osiąga temperaturę 82–87°C, a ciśnienie na głowicy ma wartość 2,7 MPa, mineralizacja wód nie przekracza 3 g/dm³ [2–4].

Wody geotermalne wykorzystuje się w Polsce do celów balneologicznych już od kilku wieków, w ostatnich latach silnie rozwija się „przemysł” rekreacyjny wykorzystujący ciepłe wody w „termach”. Status leczniczej wody termalnej nadaje się wodzie podziemnej wykazującej na wypływie temperaturę co najmniej 20°C [5]. Wśród ogółu wód termalnych rozpoznanych dotąd w Polsce dominują wody chlorkowo-sodowe, jodkowe, żelaziste o mineralizacji powyżej 1,5%. Występują one w województwach: łódzkim, lubelskim, podlaskim, kujawsko-pomorskim, wielkopolskim, lubuskim, małopolskim i mazowieckim. Znacznie rzadsze są wody chlorkowo-wodorowęglanowo-sodowe, jodkowe rozpoznane w województwie łódzkim i mazowieckim [5]. Spośród 44 uzdrowisk w Polsce 6 posiada wody termalne i stosuje je do kuracji [2].

Obecnie energia geotermalna na świecie wykorzystywana jest w 73 krajach, w 71 krajach jest to bezpośrednie wykorzystanie (ogrzewanie, suszenie, balneologia itp.), a w 24 krajach również do produkcji prądu elektrycznego. Jeszcze w 1960 r. elektrownie geotermalne pracowały zaledwie w 5 krajach (Włochy, Islandia, Nowa Zelandia, Kenia, Japonia), w 2005 r. już w 24 krajach świata. Największy udział mocy mają USA (3086 MW) i Filipiny (1904 MW) [2].





Il. 1. Otwór wydobywczy Bańska IG-1 (fot. B. Igliński)

Technologie helioenergetyczne obejmują technologie związane z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii Słońca [6]. Pasywne (bierne) pozyskiwanie ciepła polega na zamianie energii promieniowania słonecznego na ciepło, opartej na zjawiskach znanych w fizyce budowli. W tym celu wykorzystuje się tradycyjne lub nowe struktury budynku; przepływ uzyskanej energii zachodzi w sposób naturalny z dopuszczeniem elementów regulujących komfort cieplny. W systemach biernych funkcję „kolektorów” pełnią przeszklenia, elementy bądź całe domy. Przez przeszklenia promieniowanie słoneczne wnika do wnętrza w formie fal widzialnych i podczerwonych, w znikomej ilości ultrafioletowych i trafia na specjalnie do tego celu przystosowane elementy pochłaniające. Mogą to być ściany wewnętrzne, posadzki, stropy itp. Elementy pochłaniające, nagrzewając się, emitują długofalowe promieniowanie ciepłe, które ogrzewa pomieszczenia. Opisane zjawisko nazywa się „efektem szklarniowym”, który razem z ruchami konwekcyjnymi powietrza, przenikaniem i przewodzeniem, jest podstawą działania biernych systemów słonecznych [7–9].

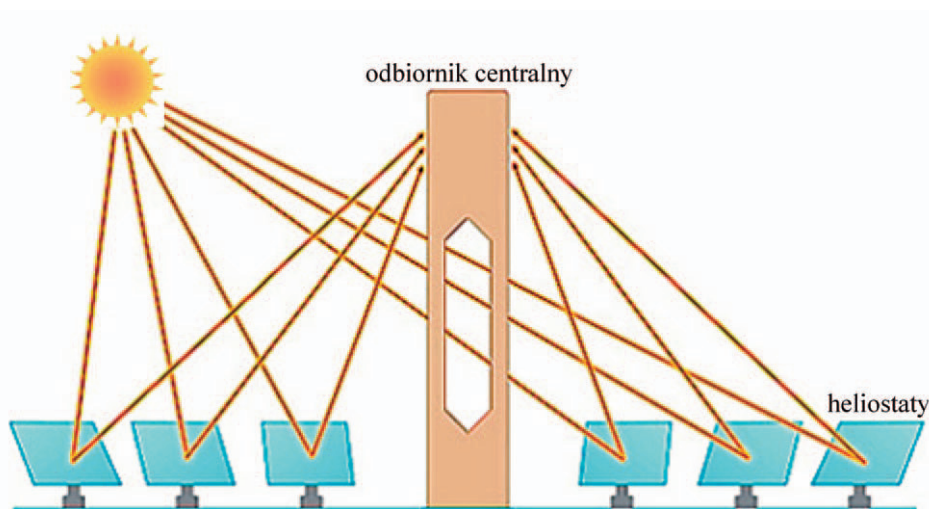
Aktywne systemy ogrzewania pozwalają wykorzystywać ciepło słoneczne do ogrzewania (kolektory niskotemperaturowe) i do produkcji ciepła bądź prądu



(kolektory średnio- i wysokotemperaturowe). Kolektory słoneczne stanowią obecnie najczęściej używaną grupę urządzeń pozwalających na wykorzystanie promieniowania słonecznego [10].

Kolektory skupiające (średnio- i wysokotemperaturowe) dzięki zastosowaniu układu lusterek skupiają energię promieniowania punktowo lub liniowo, co umożliwia większą koncentrację energii na absorberze, a co za tym idzie wyższą temperaturę czynnika roboczego (100–300°C). Stosuje się je w procesach technologicznych, w których potrzebny jest płyn o wysokiej temperaturze. Znalazły zastosowanie w elektrowniach heliometrycznych lub do przetapiania metali w wielkich piecach słonecznych, gdzie promienie słoneczne skupione w jednym miejscu osiągają temperaturę nawet 3000°C [6, 11].

W wieżowych elektrowniach słonecznych promieniowanie skupiane jest na szczycie specjalnie zbudowanej wieży przez zestaw indywidualnych, podążających za słońcem lusterek (tzw. heliostatów) (il. 2). W tej technologii absorber znajdujący się na szczycie wieży osiąga temperaturę powyżej 1000°C i przekazuje ciepło nośnikowi energii, który napędza turbiny [12].

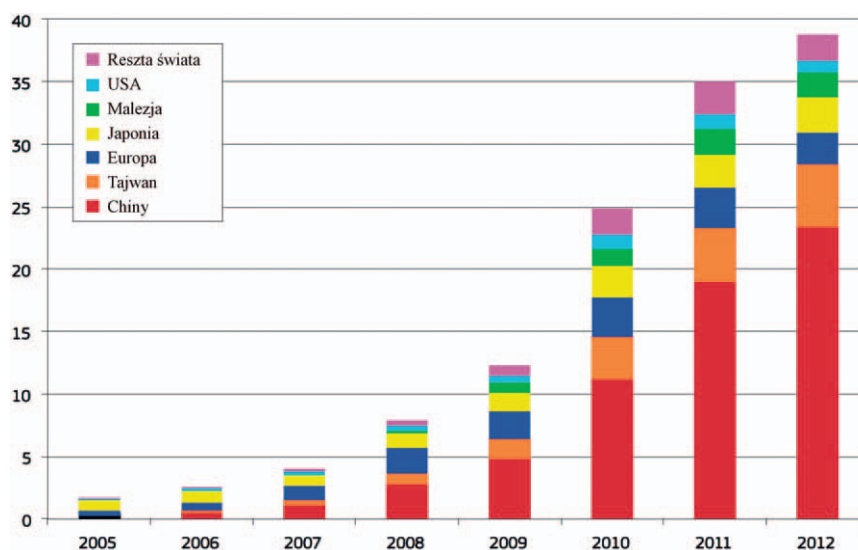


Il. 2. Zasada działania wieżowej elektrowni słonecznej

W Polsce praktycznie na każdym kroku spotykamy kolektory słoneczne. Instalowane są najczęściej na dachach domów, na basenach, na budynkach szpitalnych, na urzędach, kościołach itp. W przeciwieństwie do kolektorów słonecznych, fotowoltaika praktycznie nie rozwija się w Polsce. Na koniec roku 2013 [13] działało zaledwie 14 małych instalacji fotowoltaicznych o łącznej mocy 1,75 MW.



Na całym świecie kolektory słoneczne są bardzo popularne jako główne lub uzupełniające źródło ciepła. Pod koniec 2011 r. w 56 krajach świata sumaryczna moc kolektorów słonecznych osiągnęła wartość 235 GW. Zdecydowana większość kolektorów pracuje w Chinach: 152 GW i w Europie: 39 GW [14]. Energetyka słoneczna, przede wszystkim fotowoltaika jest najszybciej rozwijającą się gałęzią przemysłu na świecie, niezależnie od kryzysu światowego. W ciągu 7 lat moc wyprodukowanych ogniw fotowoltaicznych wzrosła 15-krotnie (il. 3). Przewiduje się, że w 2014 r. będzie to znaczący wzrost, podobny do wzrostu w 2010 r. [15]. Globalne inwestycje w energię słoneczną w 2012 r. wyniosły 140 mld dolarów. Największym producentem ogniw są Chiny i Tajwan. W Europie znaczącym producentem (i odbiorcą) są Niemcy.



Il. 3. Moc [GW] wyprodukowanych ogniw słonecznych na świecie w latach 2005–2012 [7]

Technologie hydroenergetyczne obejmują technologie związane z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii wody (rzek, fal i pływów). Na ziemiach polskich już w XI w. młyny wodne były częstym widokiem. Koła wodne poza młynarstwem znajdowały stopniowo zastosowanie m.in. w tartakach, garbarniach i olejarniach, a także w innych gałęziach przemysłu. W dokumentach, jakie przechowały się z XI i XII w., opisy młynów są często spotykane. Nowym rozdziałem wykorzystania siły wody było wprowadzenie w XIX w. turbin wodnych i generatorów przystosowanych do wytwarzania prądu elektrycznego. Pierwszą elektrownię wodną uruchomiono w 1882 r. na rzece Fox River w Appleton (USA) [16].



Obeenie elektrownie wodne są najintensywniej wykorzystywanym źródłem odnawialnej energii. W 2012 r. dostarczyły cznie 3673 TWh energii elektrycznej, co stanowi 16% cakowitzej produkcji energii elektrycznej na świecie. Największe elektrownie wodne mają moc przekraczającą 10 GW. Norwegia, Demokratyczna Republika Konga, Paragwaj i Brazylia uzyskują ponad 75% swojej energii elektrycznej z elektrowni wodnych [17]. Elektrownie wodne są stosunkowo tanim źródłem energii i mogą szybko zmienia generowaną moc w zależności od zapotrzebowania. Ich wadą jest ograniczona liczba lokalizacji, w których można je budować. Ponadto budowa zapór dla elektrowni wodnych pociąga za sobą zahamowanie naturalnego biegu rzeki i tworzenie zbiorników retencyjnych, zmieniających rodowisko. Wad duszej energetyki wodnej nie ma mala energetyka wodna (MEW). Male elektrownie wodne wpywuj korzystnie na poziom wód gruntowych i retencj wód, uspokajają nurt rzeki i zatrzymuj zjawiska erozji dennej i bocznej. Wyposażone w odpowiednie urządzenia ochrony ryb nie powodują szkód dla rodowiska [18].

Technologie bioenergetyczne obejmują technologie związane z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii i paliw z biomasy [19]. Biomasa jest najmniej kapitałochłonnym, odnawialnym źródłem energii. Jej produkcja może praktycznie przebiega samoistnie, np. w puszczech, na stepach i akach, a także w oceanach i w zbiornikach wody słodkiej. Biomas najczciej dzieli się ze wzgledu na stan skupienia. Stała biomasa to m.in. drewno, biomasa roślin energetycznych, stałe odpady roślinne, zwierzęce, stała frakcja biodegradowalna odpadów komunalnych. Biopaliwa ciekłe to przede wszystkim oleje roślinne, alkohole i etery, które mogą być wykorzystane jako dodatek bd samoistne paliwo. Biogaz, pozyskany z biomasy stałej i ciekłej, znajduje zastosowanie jako paliwo bd jest spalany i w kogeneracji produkowany jest prąd elektryczny i ciepło [19].

Polska posiada duże zasoby biomasy, mówi się, że mogłaby sta się „zielonym Kuwejtem Europy”. Największe możliwości produkcji energii daje soa zbo i rzepak, odpady z przemysłu rolno-spożywczego i odpady drewna leśnego [20]. Znaczne ilości odpadów drzewnych powstają podczas wycinki i trzebieży lasów. Przyjmując, że 15% pozyskiwanego drewna to drewno odpadowe (cze kory, drobnicy gaeziowej, odpadów kawałkowych powstających podczas wycinki), wówczas rocznie w Polsce można zagospodarowa na cele energetyczne około 2 tys. m³ drewna. 85% energii odnawialnej pochodzi ze spalania bd wspospalania biomasy stałej. Na cele energetyczne wykorzystuje się odpadową biomas leśną i rolnic. Nadwki soy zbożowej to około 11 mln Mg.

Wykorzystanie drewna na cele opałowe ma w Polsce długą tradycj, zwaszcz jeśli chodzi o spalanie drewna w indywidualnych kotłowniach o małej mocy. Liczb gospodarstw indywidualnych wyposażonych w kotły na drewno ładowane ręcznie szacuje się na około 100 tys., przy czym ich moc jest rzędu kilku kW. Największe



ciepłownie na biomase znajdują się w okolicach Szczecinka, w Barlinku, Brodnicy, Morągu, Hajnówce i Pieszku. Pierwsza kotłownia na słomę została uruchomiona w 1996 r., obecnie działa ich kilkadziesiąt [21].

Od 2–3 lat Polska jest światowym liderem, jeśli chodzi o współspalanie biomasy z węglem (il. 4). W 2012 r. w Elektrowni Szczecin (Zespół Elektrowni Dolna Odra SA) oddano do eksploatacji największy w Polsce i jeden z największych w Europie kocioł fluidalny opalany biomasa, o parametrach technologicznych pary: 230 t/h, 535 °C, 70 bar. Produkcja „zielonej” energii elektrycznej to około 440 GWh/rok, a produkcja ciepła stanowi 1,9 TJ/rok [22].



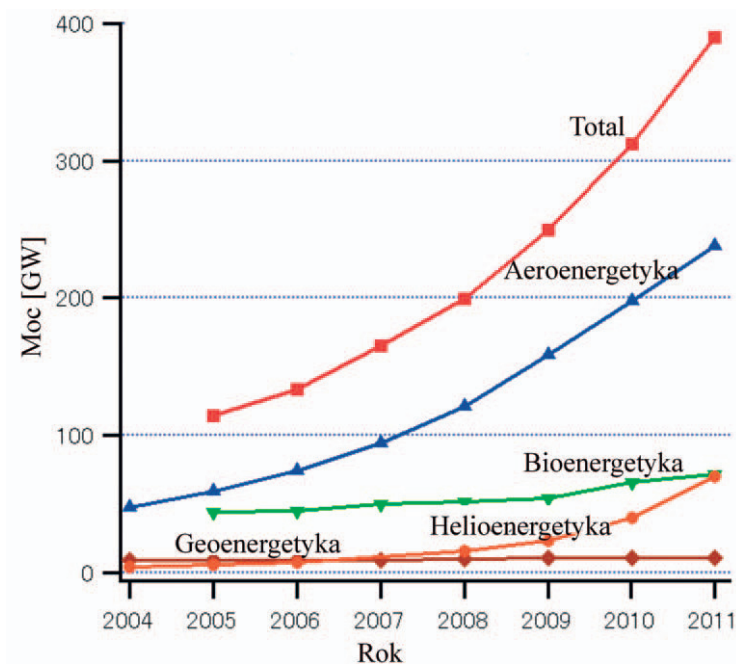
Il. 4. Elektrownie i elektrociepłownie\współpalające biomasa z węglem
(opracowanie własne)

Spośród roślin oleistych uprawianych w Polsce do celów spożywczych i motoryzacyjnych zdecydowane pierwsze miejsce zajmuje rzepak. W 2012 r. wyprodukowano 553 tys. Mg estrów metylowych i 158 tys. Mg bioetanolu. Łączna zdolność produkcyjna zakładów odwadniających etanol w Polsce wynosi 700 mln dm³. Obecnie największe zakłady wytwarzające bioetanol znajdują się w Starogardzie Gdańskim, Obornikach i Wrocławiu. Z kolei największym producentem biodiesla jest Rafineria Trzebinia SA, wytwórnie w miejscowości Surochów, w Tychach i Malborku [21, 22].



W ostatnich latach dobrze rozwija się technologia biogazowa – wg stanu na grudzień 2013 r. – w Polsce pracuje 231 biogazowni o łącznej mocy 162 MW_e. Od połowy lat 90. ubiegłego wieku biogazownie funkcjonowały przy oczyszczalniach ścieków i na składowiskach odpadów. W latach 2008–2013 powstały 42 biogazownie rolnicze [13]. Polska jako kraj rolniczy posiada ogromny potencjał biogazu. W średnich i dużych oczyszczalniach ścieków opłacalne jest pozyskiwanie biogazu z osadów ściekowych – jego potencjał techniczny wynosi około 25 mln m³. Ilość odpadów komunalnych powstających w gospodarstwach domowych i obiektach użyteczności publicznej wynosi około 12 Tg, z czego ponad połowa to odpady ulegające biodegradacji. Zakładając, że potencjał techniczny stanowi 15% potencjału teoretycznego, ilość biogazu możliwa do pozyskania z odpadów komunalnych wynosi około 80 mln m³. Polska posiada szeroką gamę substratów do produkcji biogazu rolniczego: odchody zwierzęce, odpady rolnicze czy odpady spożywcze. W Polsce hoduje się 5,7 mln sztuk bydła, 15,2 mln świń, 155 mln kur [23]. Zagospodarowanie gnojowicy pozwoliłoby pozyskać około 1800 mln m³ biogazu.

Największy udział w światowej produkcji energii ma energetyka wodna – jak już wspomniano, dostarcza 16% energii elektrycznej. Moc elektrowni wodnych zwiększa się nieznacznie, a największy wzrost mocy obserwuje się w przypadku aeroenergetyki (il. 5) [24].



Il. 5. Moc energetyki odnawialnej (z wyłączeniem hydroenergetyki) na świecie [24]



W niniejszej monografii pragniemy Państwu przybliżyć technologie aeroenergetyczne, czyli związane z pozyskiwaniem i wykorzystaniem energii wiatru. Nie tylko na świecie, ale również w Polsce w ostatnich latach rozwija się ona bardzo dobrze. Z każdym rokiem przybywa siłowni wiatrowych, planowane są morskie farmy wiatrowe. Mimo wszystko turbiny wiatrowe to nadal coś nowego, pojawiają się więc obawy o ich oddziaływanie na zdrowie człowieka, środowisko i krajobraz. Zachęcamy więc do lektury.

Jeśli jesteście Państwo zainteresowani tematyką energetyki odnawialnej, zachęcamy do przeczytania naszych wcześniejszych monografii: *Technologie geoenergetyczne* [2], *Technologie helioenergetyczne* [6] oraz *Technologie bioenergetyczne* [19].

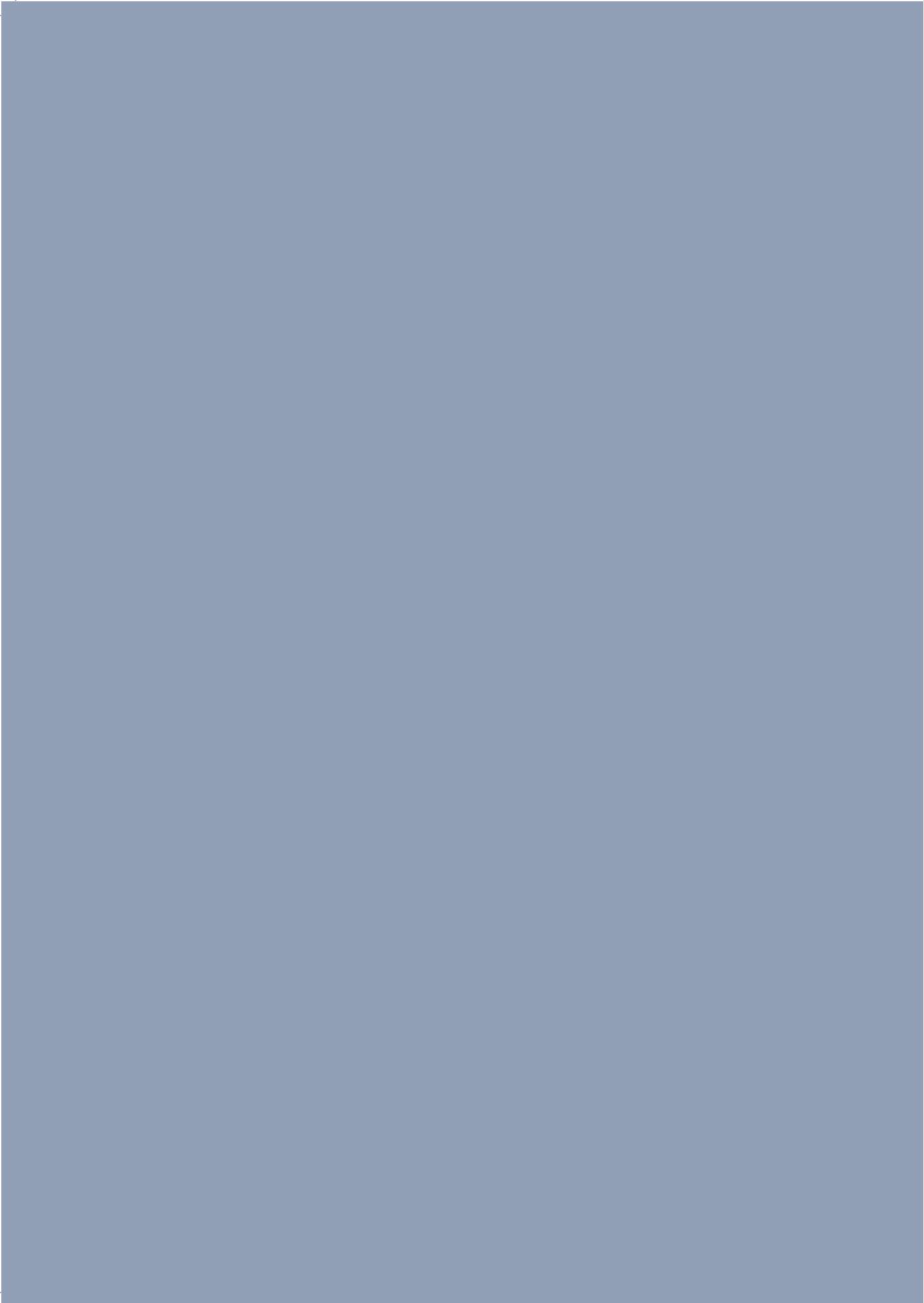
Literatura

- [1] Rada Ministrów, *Polityka energetyczna Polski do 2030 r.*, Warszawa 2009.
- [2] B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, G. Piechota, *Technologie geoenergetyczne*, WN UMK, Toruń 2010.
- [3] W. Wartak, A. Wróbel, W. Ignacok, *PEC Geotermia Podhalańska SA – Ciepłowniczy Zakład Geotermalny na Podhalu: Doświadczenia, wybrane aspekty pracy, perspektywy*, „Technika Poszukiwań Geologicznych” 27 (2), 2007, s. 125–131.
- [4] C. Ślimak, W. Wartak, *PEC Geotermia Podhalańska S.A. doświadczenia, stan obecny, perspektywy rozwoju*, „Technika Poszukiwań Geologicznych” 28 (2), 2009, s. 123–132.
- [5] T. Latour, *Aktualny stan i dalsze możliwości wykorzystania w Polsce wód termalnych do celów leczniczych, profilaktycznych oraz rekreacji*, „Technika Poszukiwań Geologicznych” 46 (2), 2007, s. 63–67.
- [6] B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, G. Ojczyk, M. Plaskacz-Dziuba, G. Piechota, *Technologie helioenergetyczne*, WN UMK, Toruń 2013.
- [7] M. A. Wołoszyn, *Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1991.
- [8] R. Piotrowski, P. Dominiak, *Budowa domu pasywnego krok po kroku*, „Przewodnik Budowlany”, Warszawa 2012.
- [9] R. Wnuk, *Budowa domu pasywnego w praktyce*, „Przewodnik Budowlany”, Warszawa 2012.
- [10] J. Dobriański, *Wymiana ciepła w instalacjach słonecznych z płaskimi kolektorami*, Wyd. UWM w Olsztynie, Olsztyn 2009.
- [11] M. S. Jamel, A. A. Rahman, A. H. Shamsuddin, *Advances in the integration of solar thermal energy with conventional and non-conventional power plants*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 20, 2013, s. 71–81.



- [12] S. Alexopoulos, B. Hoffschmidt, *Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus*, "Renewable Energy" 35, 2010, s. 1352–1356.
- [13] URE, Mapa Odnawialnych Źródeł Energii, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.htm> (wejście 03.02.2014).
- [14] F. Mauthner, W. Weiss, *Solar heat worldwide. Markets and contribution to the energy supply 2011. Edition 2013*, IEA Solar Heating&Cooling Programme, may 2013.
- [15] European Commission, *PV Status Report 2013*, Publications Office of the European Union, Luxemburg 2013.
- [16] J. Liu et al., *Sustainability in hydropower development – A case study*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 19, 2013, s. 230–237.
- [17] *Statistical Review of World Energy*, <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy> (wejście 08.02.2014).
- [18] M. S. Rudnicki, *Odtwarzanie małych elektrowni wodnych*, Oficyna Wydawnicza OKP Zachodniopomorskie Centrum Edukacyjne, Szczecin 2003.
- [19] B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, WN UMK, Toruń 2009.
- [20] Pigan M, *Raport o stanie lasów w Polsce 2009*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2010.
- [21] B. Igliński, A. Iglińska, W. Kujawski, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Bioenergy in Poland*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 15 (6), 2011, s. 2099–3007.
- [22] R. Buczkowski, B. Igliński, M. Cichosz, G. Ojczyk, M. Stańczak, G. Piechota, *Biomasa w energetyce*, WN UMK, Toruń 2012.
- [23] *Rocznik statystyczny rolnictwa 2012*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2012.
- [24] *Renewables Global Futures Report*, <http://www.ren21.net> (wejście 10.03.2014).







1. Wiatr – powstawanie i rodzaje

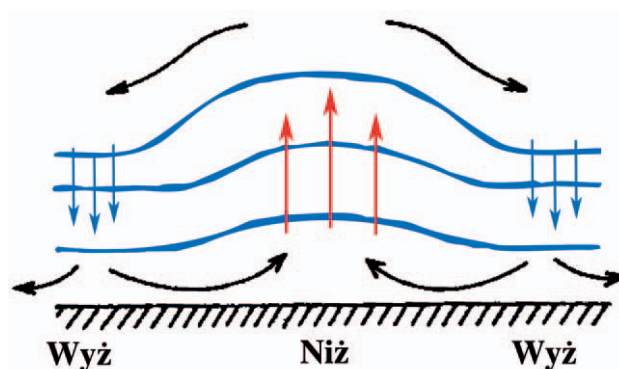
Opisując technologie aeroenergetyczne, bez wątpienia trzeba zwrócić uwagę na źródło energii odnawialnej, czyli wiatr. Wiatr towarzyszy nam w życiu codziennym – czasem niesie duże zniszczenia, czasem jest wyglądany ze zniecierpliwieniem. Polskie miasta w bezwietrzne dni spowijane są niebezpiecznym smogiem, powstającym podczas spalania paliw konwencjonalnych. A czy zastanawialiście się Państwo, skąd się bierze wiatr? Takie pytanie często zadajemy studentom, większość z nich nie potrafi odpowiedzieć na to pytanie.

1.1. Wiatr – definicja i mechanizm powstawania

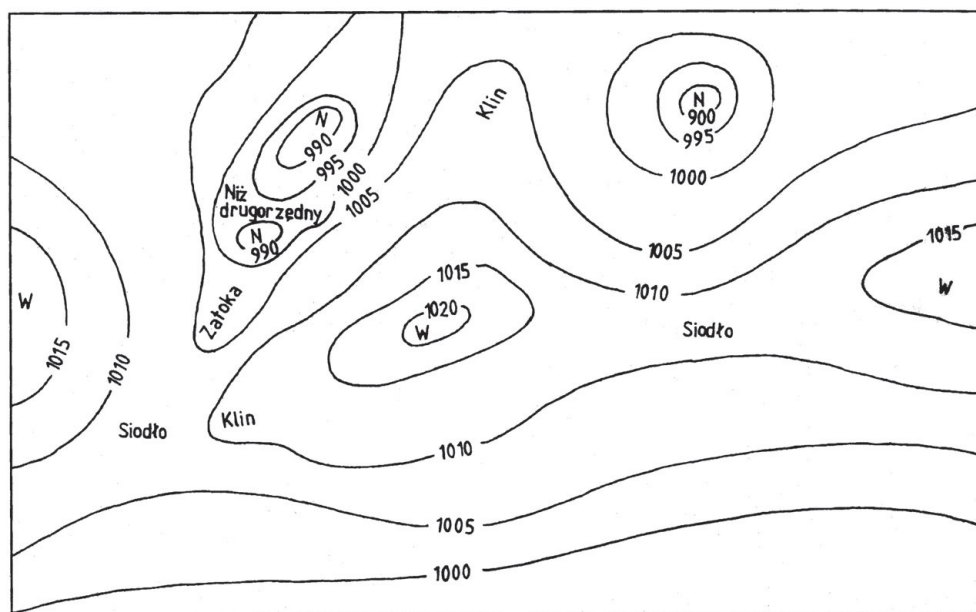
Wiatr definiuje się jako poziomy ruch mas powietrza, który przemieszcza się od wyżu do niżu. Promienie słoneczne ogrzewają pewien obszar Ziemi bardziej niż sąsiednie. Przyczyn tego zjawiska jest wiele, np. ciemniejszy kolor gleby i wody powoduje inne pochłanianie ciepła. Powietrze znajdujące się nad ciemnym podłożem zaczyna się nagrzewać, czyli rozszerza się. Masa tego powietrza będzie się rozprzestrzeniać w kierunku niższego ciśnienia, więc ku górze. Wypiętrzanie słupa powietrza powoduje jego przepływ górą nad sąsiednie obszary (il. 1), gdzie następuje wzrost ciśnienia (powstaje wyż). Z kolei nad obszarem nagrzany kształtuje się niż. Różnica ciśnień wywołuje wiatr [1, 2].

W praktyce rozkład ciśnienia na danym obszarze może przybierać bardzo różne i skomplikowane formy. Na ilustracji 2 liniami ciągłymi zaznaczono przykładowy przebieg izobar, czyli linii łączących punkty o jednakowym ciśnieniu (podanym w hektopaskalach) i układów barycznych. Izobary mają kształty zbliżone do okręgów, elips i linii prostych, wyżej są zwykle bardziej rozległe od niżów i charakteryzują się mniejszym gradientem ciśnienia, czyli mniejszą zmianą ciśnienia wraz z odległością.





Il. 1. Mechanizm powstawania ośrodków niskiego i wysokiego ciśnienia oraz związanych z nimi wiatrów [1]



Il. 2. Typowe układy baryczne [1]

Dwa wyży występujące obok siebie zwykle oddzielone są zatoką niskiego ciśnienia (niżową), a dwa inne – klinem wysokiego ciśnienia. Obszar rozciągający się między dwoma niżami i dwoma wyżami jest określany jako siodło [1].

Zazwyczaj kierunek ruchu powietrza jest równoległy do powierzchni Ziemi, chociaż w zależności od ukształtowania terenu może przebiegać np. z góry w dół.



W średnich szerokościach geograficznych, ze względu na siłę Coriolisa, wiatr wieje zazwyczaj równoległe do linii takiego samego ciśnienia (wiatr geostroficzny). Na podstawie wieloletnich badań stwierdzono, że prędkość i kierunek wiatru cechują charakterystyczne zmiany zarówno w ciągu doby, jak i całego roku. Zazwyczaj w nocy prędkość wiatru jest mniejsza, rano wzrasta i osiąga maksymalne wartości w godzinach popołudniowych [3]. W Polsce roczny rozkład prędkości wiatru związany jest z porami roku; zwykle najsilniejszy wiatr wieje w okresie jesienno-zimowym i wiosennym, w okresie letnim zaś jego prędkość znacznie spada.

Do pomiarów wiatru służy anemometr (wiatromierz). Siłę wiatru można też mierzyć za pomocą: technik satelitarnych (teledetekcja), skaterometrów wykorzystujących zjawisko fal kapilarnych na wodzie (refleks słońca), teledetekcyjnych metod akustycznych sodar, obserwacji poruszających się chmur, radaru, sond meteorologicznych i innych technik [4].

Geograficzny kierunek wiatru to kierunek, z którego wieje wiatr. Przykładowo NW oznacza wiatr wiejący z północnego zachodu. Na mapach pogody zaś kierunek wiatru wskazują groty strzałek, a liczba i długość kresek tworzących bełt strzały odpowiada sile wiatru, zgodnie z zasadą podaną w legendzie mapy [4].

1.2. Typy wiatrów

1.2.1. Pasaty

Pasaty to stałe ciepłe wiatry o umiarkowanej sile (3–4°B), wiejące w strefie międzyzwrotnikowej między 35° szerokości północnej i 35° szerokości południowej (wykorzystywane przez żaglowce). Na półkuli północnej pasaty wieją z kierunku NE, a na południowej z SE (zgodnie z działaniem siły Coriolisa, powodującej odchylenie kierunku ruchu ciał poruszających się prosto, na półkuli północnej w prawo, a na południowej – w lewo) [5, 6].

Pasaty biorą swój początek w Międzyzwrotnikowej Strefie Zbieżności. Powierzchnia Ziemi w strefie równikowej intensywnie się nagrzewa. Ogrzane wilgotne powietrze, zwiększając swoją objętość, unosi się, a jego ciśnienie przy powierzchni spada i tworzy się niż baryczny. Para wodna zawarta w tym powietrzu ulega kondensacji i daje początek codziennym opadom nad równikiem, zwanym deszczami zenitalnymi. Powietrze zawierające już niewiele wilgoci unosi się wyżej i ochładza, a następnie odpływa w kierunku biegunów, odchylając swój kierunek ruchu w wyniku działania siły Coriolisa na NW na półkuli północnej i SW na półkuli południowej – są to antypasaty. Suche i chłodne powietrze opada nad zwrotnikami, dając początek wyżom zwrotnikowym. Opadając, ociepla się adiabatywnie – stąd w strefie zwrotnikowej znajdują się całoroczne ośrodki antycyklo-



nalne (wyzowe), warunkujące niemal bezchmurną, suchą, gorącą pogodę z bardzo niewielkimi opadami. To ciepłe i suche powietrze znad zwrotników zaczyna się przemieszczać ku równikowi, ponieważ obszar ten ma wyższe ciśnienie atmosferyczne niż strefa równikowa [5, 6].

Jak już wspomniano, antypasaty to umiarkowanie ciepłe, stałe prądy powietrza o kierunku zachodnim, wiejące w strefie równikowej na wysokości 2000–3000 m, niosące gorące powietrze od równika w kierunku zwrotników, gdzie na skutek obrotowego ruchu Ziemi zmieniają kierunek na wschodni i spływają w dół, po czym jako pasaty wracają w kierunku równika [5, 6].

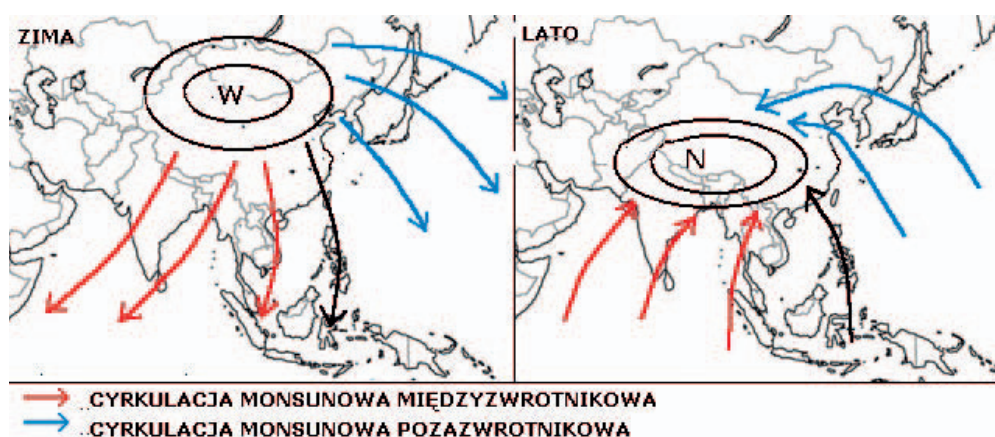
1.2.2. Monsuny

Monsunami nazywa się sezonowe wiatry między oceanem a lądem, powstające u południowych i wschodnich wybrzeży Azji oraz w Zatoce Gwinejskiej i Ameryce Środkowej. Monsuny (z grec. *μουσώνες* – *zmienny*), które zmieniają kierunek w zależności od pory roku (il. 3), to:

- monsun letni (morski) – wiatr wieje od morza w stronę lądu (niskie ciśnienie nad lądem i wysokie nad morzem), przynosząc pogodę deszczową,
- monsun zimowy (lądowy) – wiatr wieje od lądu w kierunku morza (wysokie ciśnienie nad lądem i niskie nad morzem), przynosząc pogodę suchą [7, 8].

Jeszcze niedawno głównej przyczyny powstawania monsunów upatrywano w różnym nagrzewaniu się powierzchni lądowych i wodnych. Latem ląd nagrzewa się szybciej niż woda, co powoduje unoszenie się nagrzanego powietrza, a tym samym spadek ciśnienia. W związku z różnicą ciśnień między wodą a lądem pojawiają się gwałtowne wiatry wiejące znad morza w głąb lądu. Zimą niż tworzą się nad cieplejszymi wodami, co powoduje przemieszczanie się monsunów od lądu w stronę morza (wiatry wieją z obszarów o wyższym ciśnieniu do obszarów o niższym ciśnieniu). Obecnie powstawanie monsunów tłumaczy się przesuwaniem się w ciągu roku Międzyzwrotnikowej Strefy Zbieżności (MSZ). Latem, za punktem podłonecznym, linia MSZ przesuwa się na północ od równika daleko w głąb kontynentu azjatyckiego, w związku z czym pasaty przekraczają równik i zmieniają kierunek z południowo-wschodniego na południowo-zachodni i przynoszą znad oceanu zachmurzenie i opady. Zimą dzieje się odwrotnie. Nowa teoria nie traktuje pasatów jako zaburzenia ogólnej cyrkulacji atmosfery, ale mówi, że są one składową ogólną cyrkulacji atmosfery. Teoria ta znajduje potwierdzenie, gdyż badania nie potwierdziły istnienia górnych prądów – antymonsunów, przeciwnych do monsunów, których obecność jest przyjmowana w pierwszej przedstawionej teorii. Monsun letni ma duże znaczenie dla rolnictwa w Azji – pomaga nawadniać suche obszary w głębi kontynentu. Monsun letni jest wiatrem ciepłym i wilgotnym, a monsun zimowy jest wiatrem suchym, a zarazem zimnym (il. 3) [7–9].





Il. 3. Cyrkulacja monsunowa [10]

1.2.3. Bryza

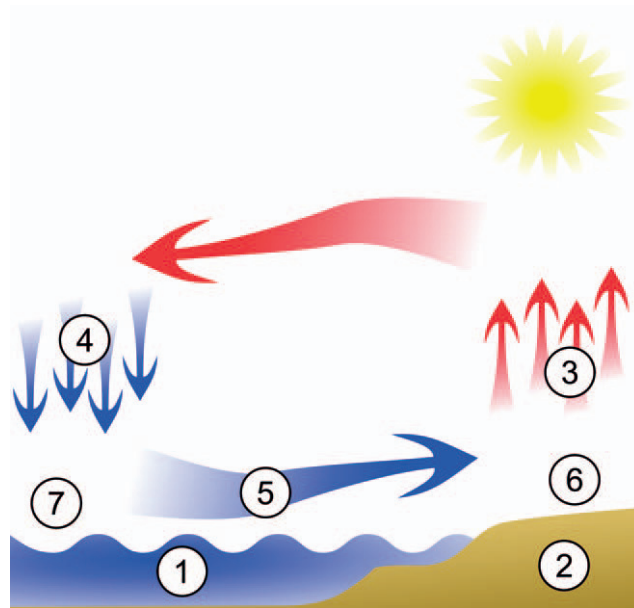
Wypoczywając nad morzem, spotykamy się z bryzą, czyli wiatrem wiejącym na granicy dwóch obszarów, w tym wypadku wody i lądu. Zmiany kierunku wiatru, występujące zwykle w rytmie dobowym, wywołane są różnicami w tempie nagrzewania się tych obszarów [2, 11]. Na wybrzeżu morskim w dzień ląd nagrzewa się szybciej niż woda, dlatego cieplejsze powietrze nad lądem unosi się (powodując spadek ciśnienia na powierzchni lądu), a na jego miejsce pojawia się chłodniejsze i bardziej wilgotne powietrze znad morza. Bryza dzienna (morska) wieje zatem znad morza na ląd (il. 4). Natomiast w nocy woda oddaje ciepło wolniej niż ląd, dlatego ciśnienie nad wodą jest niższe niż na powierzchni lądu, co powoduje zmianę kierunku wiatru. Bryza nocna (lądowa) przynosi nad wodę suche powietrze znad lądu. Bryza ma typowy zasięg do 20–30 km od linii brzegowej w stronę wody. W stronę lądu zasięg ten jest mniejszy i uzależniony od charakteru powierzchni (il. 5).

Front bryzowy jest zjawiskiem związanym z bryzą morską. Zimne powietrze znad wody wypiera ciepłe powietrze znad lądu i w strefie konwergencji tworzy się płytki zimny front. Czasami nad frontem widać chmury typu cumulus powodowane przez wynoszenie się powietrza na froncie. Maksymalny zasięg bryzy morskiej wynosi około 130 km [13].

Analogicznymi do bryzy zjawiskami są: wiatry górskie i dolinne powstające przy bezchmurnej pogodzie w cieplej porze roku; bryza miejska i leśna – związane z gradientem temperatury oraz wiatry monsunowe – powstające na większą skalę przestrzenną i w cyklu półrocznym.

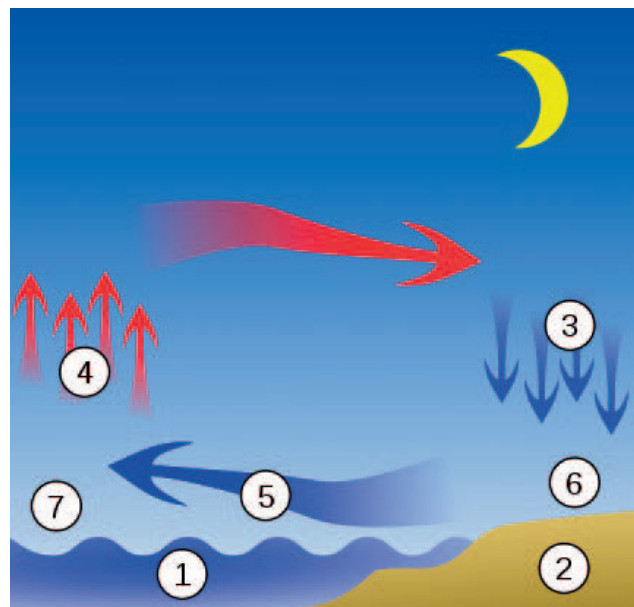
Przewidywanie bryzy morskiej jest istotne w strefie brzegowej. Przykładowo w Polsce badano własności bryzy morskiej przy studiach nad lokalizacją Elektrow-





Il. 4. Bryza w ciągu dnia:

1 – chłodna woda, 2 – ciepły ląd, 3 – ciepłe powietrze, 4 – chłodne powietrze,
5 – wilgotne, chłodne powietrze, 6 – niż 7 – wyż (A. J. Fijałkowski [12])



Il. 5. Bryza nocą:

1 – ciepła woda, 2 – chłodny ląd, 3 – chłodne powietrze, 4 – ciepłe powietrze,
5 – suche, zimne powietrze, 6 – wyż, 7 – niż (A. J. Fijałkowski [12])

ni Jądrowej w Żarnowcu [14]. Prognoza bryzy morskiej jest istotna w olimpijskim żeglarstwie wyczynowym. Rozwój bryzy morskiej zależy nie tylko od gradientu temperatury pomiędzy powietrzem nad lądem i wodą, ale także od kierunku i siły wiatru w dużej skali. W 1962 r. Biggs i Graves [15] wprowadzili indeks bryzowy zdefiniowany jako:

$$\varepsilon = \frac{U^2}{c_p \Delta T} \quad (1)$$

gdzie: $c_p = 1000 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ jest ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu, U jest prędkością wiatru, a ΔT jest różnicą temperatury pomiędzy powietrzem nad lądem i powietrzem nad wodą i określa wpływ wiatrów synoptycznych na rozwój bryzy morskiej. Dla wartości większych niż 3–10 bryza morska nie może się rozwinąć [16].

1.2.4. Fen

Fenem (z niem. *Föhn*) nazywa się ciepły i suchy wiatr wiejący z gór w kierunku dolin. W wyniku zmian fizycznych następuje ogrzewanie i osuszanie spadającego powietrza oraz gwałtowne podwyższenie temperatury w obszarze oddziaływania fenu. W Tatrach fen nazywany jest halnym [2].

Wiatry fenowe mogą spowodować znaczne podniesienie temperatury – nawet o 20°C w ciągu kilku minut, jak to się niekiedy zdarza w Ameryce Północnej. Nagłe porywy wiatrów fenowych są przyczyną szkód w gospodarstwach rolnych, a także w leśnictwie. Warto wspomnieć o halnym, który wiał w Polsce w grudniu 2013 r., powodując znaczne straty w drzewostanie, w Zakopanem ucierpiało wiele budynków, a kilkadziesiąt osób zostało rannych [17].

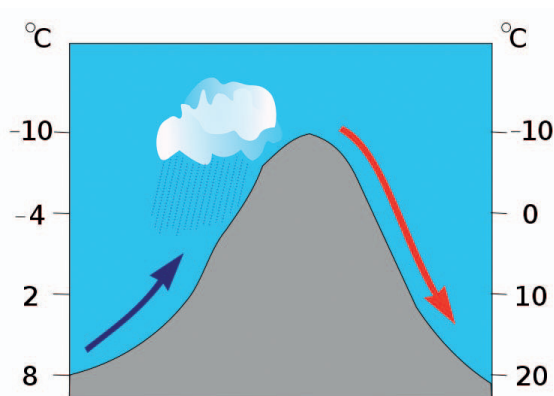
Powstawanie i cechy fizyczne wiatrów fenowych wynikają z różnic, jakie występują w trakcie zmian temperatury powietrza wilgotnego i suchego w wyniku zmiany ciśnienia (gradient adiabatyczny). Warunkiem powstania tego wiatru jest różnica ciśnienia atmosferycznego po obu stronach bariery górskiej. Różnica ta wymusza ruch powietrza. Powietrze, napotykać góry, unosi się, ochładzając się wilgotnadiabatyycznie, tj. około $0,6^\circ\text{C}$ na 100 m wysokości. W czasie unoszenia się powietrza następuje kondensacja – tworzą się chmury i padają deszcze. Suche już powietrze przekracza barierę szczytów górskich i opada po drugiej stronie ku dolinom. Opadając, ogrzewa się, ale tym razem suchoadiabatycznie, tj. około 1°C na 100 m (il. 6). Stąd też wiatry fenowe są suche oraz znacznie cieplejsze niż powietrze na tej samej wysokości po przeciwnej stronie gór. Im wyższa jest bariera górská, tym ta różnica może być większa. Różnica temperatury powstaje wyłącznie w wyniku skraplania się pary wodnej zawartej w powietrzu. Jeżeli napływające powietrze jest suche lub góra jest zbyt niska, by zaszło skraplanie, to powietrze



nie ogrzewa się po stronie zawietrznej. Zjawisko to zachodzi tylko do pewnej wysokości góry. Powyżej, gdy temperatura rozprężonego powietrza jest niska i nie zawiera ono już prawie pary wodnej, wysokość góry nie ma już znaczenia dla tego procesu. Niektóre nazwy regionalne fenu to:

- *halny* – Tatry, Beskidy,
- *Berkvint, Polák* – Góry Orlickie po stronie czeskiej,
- *Föhn* – Alpy,
- *puelche* – Chile (Andy),
- *zonda* – Argentyna (Andy),
- *austrul* – Karpaty Rumuńskie,
- *chinook* – Góry Skaliste,
- *Santa Ana winds* – Południowa Kalifornia, USA,
- *Diablo winds* – Północna Kalifornia, USA,
- *Bergwind* – Afryka Południowa [18].

W wysokich górach zjawiskiem wywołanym fenem jest inwersja opadów.



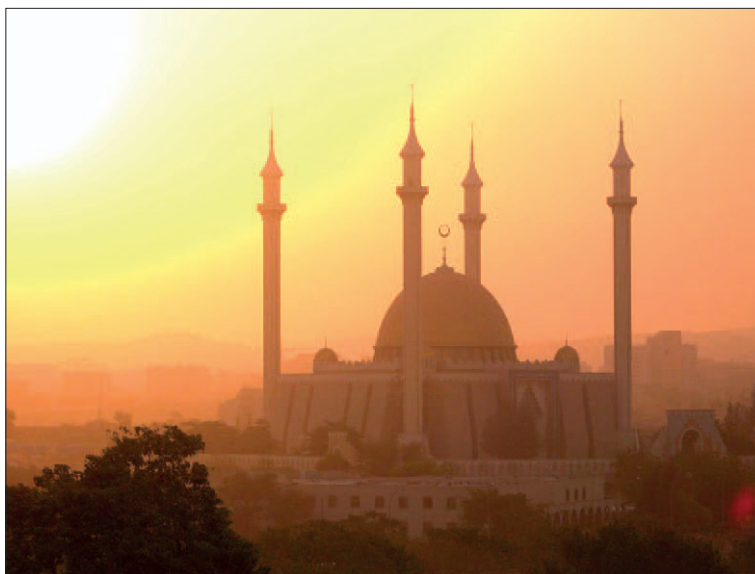
Il. 6. Zasada powstawanie fenu [12]

1.2.5. Inne rodzaje wiatrów

Na całym świecie wieją wiatry, których mechanizm powstawania jest podobny, a nazwy różne (np. fen). Poniżej przedstawiono wybrane rodzaje wiatrów, jeśli jesteście Państwo zainteresowani tą tematyką, zachęcamy do przestudiowania literatury [1–9, 19].

Harmattan (z języka twi: *harmatan*) to silny północno-wschodni wiatr wiejący w porze suchej z nad Sahary na wybrzeże Zatoki Gwinejskiej, a także na zachodnie wybrzeże Afryki Północnej. Suchy, pylny i gorący wiatr pasatowy przynoszący znaczny spadek względnej wilgotności powietrza nawet do 1% (il. 7) [2, 20].





Il. 7. Widok na meczet w Abudży w czasie harmattanu (fot. H. Martin [12])

Samum (z arab. *samma* = 'truć') to gwałtowny, suchy i gorący południowy wiatr, wiejący na pustyniach Afryki Północnej i Półwyspu Arabskiego oraz w ich sąsiedztwie. Samumy wywołują burze pyłowe i piaskowe. Występują najczęściej w okresie od kwietnia do czerwca [2].

Tramontana (z łac. *transmontanus* = mieszkający za górami) to chłodny wiatr północny lub północno-wschodni, wiejący na zachodnim wybrzeżu Włoch i Korsyki. Powstaje w sytuacji, gdy nad Morzem Adriatyckim panuje niskie ciśnienie, a nad zachodnią częścią Morza Śródziemnego lub w Alpach – wysokie. We Francji jest to także wiatr północno-zachodni w południowej części kraju oraz w północnej Katalonii. Wieje wzdłuż Pirenejów i południowo-wschodniej części Masywu Centralnego. Często (mylnie) nazywany jest mistralem, który jest wywołany podobnymi czynnikami i ma zbliżoną charakterystykę [2, 21].

Jak już wcześniej wspomniano, istnieje wiele rodzajów wiatru. Bardzo często nadawane im są lokalne nazwy. Przykładowo tylko dla wiatrów jeziora Bajkał mieszkańcy wymieniają około 30 rodzajów wiatru [22].

1.3. Siła wiatru. Skala Beauforta

Miarą siły wiatru jest jego prędkość. Często siłę wiatru określa się według 13-stopniowej (0–12) skali Beauforta (tab. 1), opartej na wynikach obserwacji skutków wywołanych przez wiatr na morzu lub lądzie. Skalę utworzył w 1806 r. Francis



Tab. 1. Skala Beauforta [1, 23, 24]

Stopnie [°B]	Nazwa wiatru	Prędkość wiatru [km/h]	Objawy na morzu	Objawy na lądzie
0	cisza	<1	lustrzana gładź	spokój, dym unosi się pionowo
1	bardzo słaby powiew	1–5	zmarszczki na wodzie	delikatny ruch powietrza nieznacznie odchyła dym
2	słaby wiatr	6–11	pasma drobnych fal	wiatr wyczuwalny na skórze, liście szeleszczą
3	łagodny wiatr	12–19	fala dłuższa, można rozróżnić grzbiety fal	liście i małe gałązki poruszają się
4	umiarkowany wiatr	20–28	słychać słaby plusk, występuje biała piana	gałęzie zaczynają się poruszać, wiatr unosi z ziemi kurz i suche liście
5	dość silny wiatr	29–38	wyraźny szum morza, fale do 1,2 m długości, gęste białe grzebienie	wyprostowują się duże flagi, wiatr gwizdże w uszach
6	silny wiatr	39–49	szum morza przypomina turkot, fale z pianą na grzbietach i bryzgi	poruszają się grube gałęzie drzew, wiatr zrywa kapelusze z głów
7	bardzo silny wiatr	50–61	fale piętrzą się, całe morze pokryte pianą, głośny szum morza	poruszają się największe gałęzie drzew, pod wiatr idzie się z wysiłkiem
8	sztorm/wicher	62–74	tworzą się pasma piany wzdłuż kierunku wiatru	łamią się drobne gałęzie, samochody skręcają pod wpływem wiatru
9	silny sztorm	75–88	bardzo duże fale (2,75 m) z gęstą pianą, grzbiety fal zaczynają się związać, ryk morza urywany	wiatr łamie duże gałęzie, uszkadza dachy, przewraca kominy
10	bardzo silny sztorm	89–102	cała powierzchnia morza robi się biała od piany, ryk morza coraz potężniejszy, ograniczona widoczność	drzewa wrywane z korzeniami, poważne zniszczenia konstrukcji
11	gwałtowny sztorm	103–117	wiatr zrywa grzebienie fal, tworząc zamieć wodną, ryk morza zmienia się w nieartykułowany hałas	znaczna część konstrukcji zniszczona
12	huragan	>117	olbrzymie fale, zamieć wodna wykluczająca widoczność, zagłuszający ryk morza	masowe i powszechne zniszczenia konstrukcji

Beaufort, irlandzki hydrograf, oficer floty brytyjskiej. Początkowo nie określała ona prędkości wiatru, lecz wymieniała ilościowe cechy od 0 do 12, określające sposób, w jaki powinny pływać żaglowce – od *wystarczającego, aby mieć sterowność, do takiego, przy którym „płótna” nie mogą wytrzymać*. Skala stała się standardem w zapisach dzienników okrętowych floty królewskiej w końcu lat 30. XIX w. Skala Beauforta została zaadaptowana do użytku na lądzie w latach 50. XIX w. Jej wartości posłużyły do cechowania liczby obrotów anemometrów. Taka skala została zestandaryzowana dopiero w 1932 r. i od tego czasu zaczęła wchodzić do użytku w meteorologii [1, 23, 24].

Siłę wiatru podaje się najczęściej w m/s lub w km/h, przy czym 1 m/s odpowiada 3,6 km/h. Czasami używa się innych jednostek dla określenia prędkości wiatru: 1 węzeł odpowiada 1,852 km/h oraz 0,514 m/s; 1 mila to z kolei 1,61 km/h i 0,45 m/s.

W wyborze lokalizacji pod elektrownię wiatrową dużą rolę odgrywa szorstkość terenu, ma ona bowiem wpływ na rozkład prędkości wiatru w funkcji wysokości (tab. 2) [25].

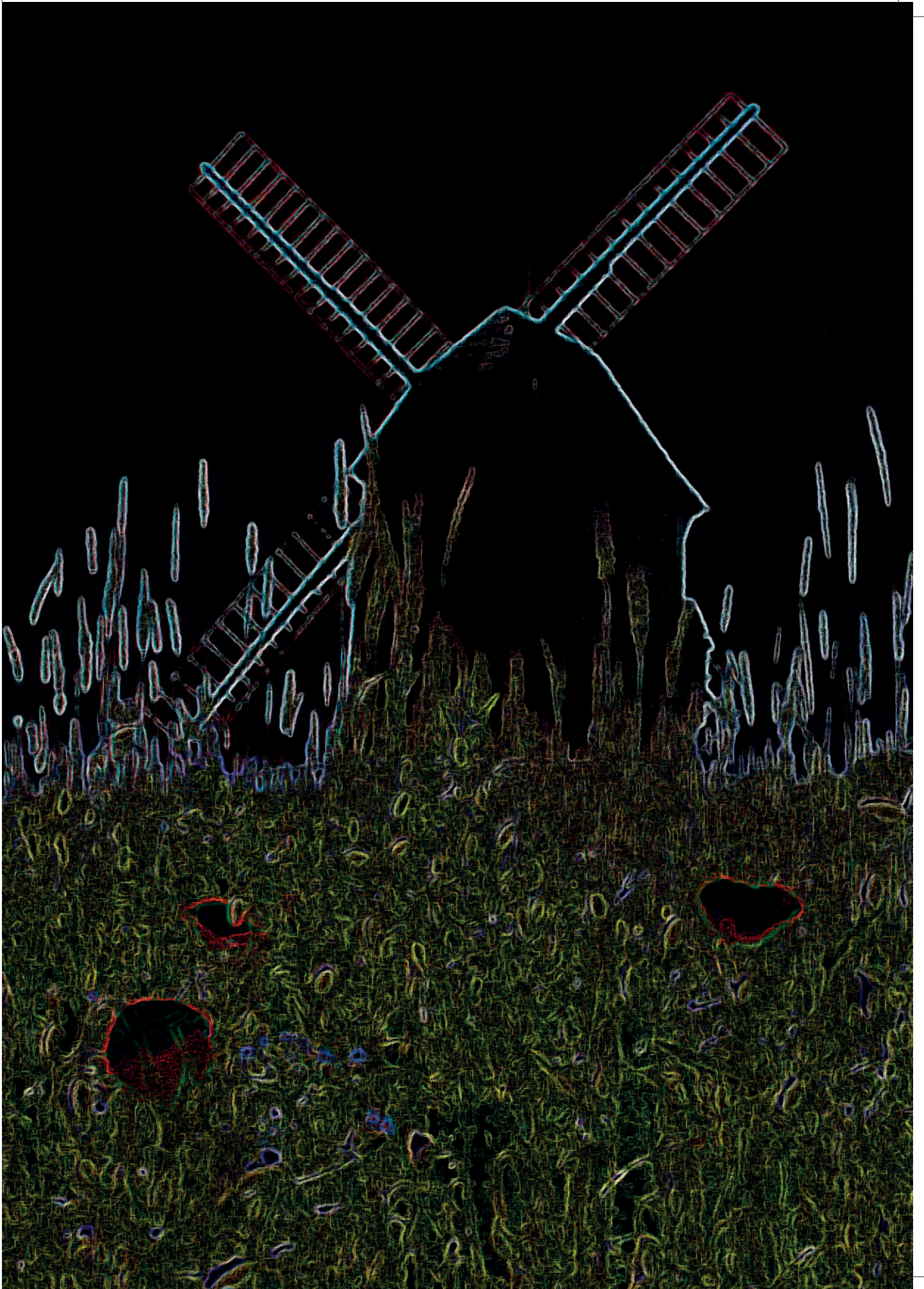
Tab. 2. Skala szorstkości [25]

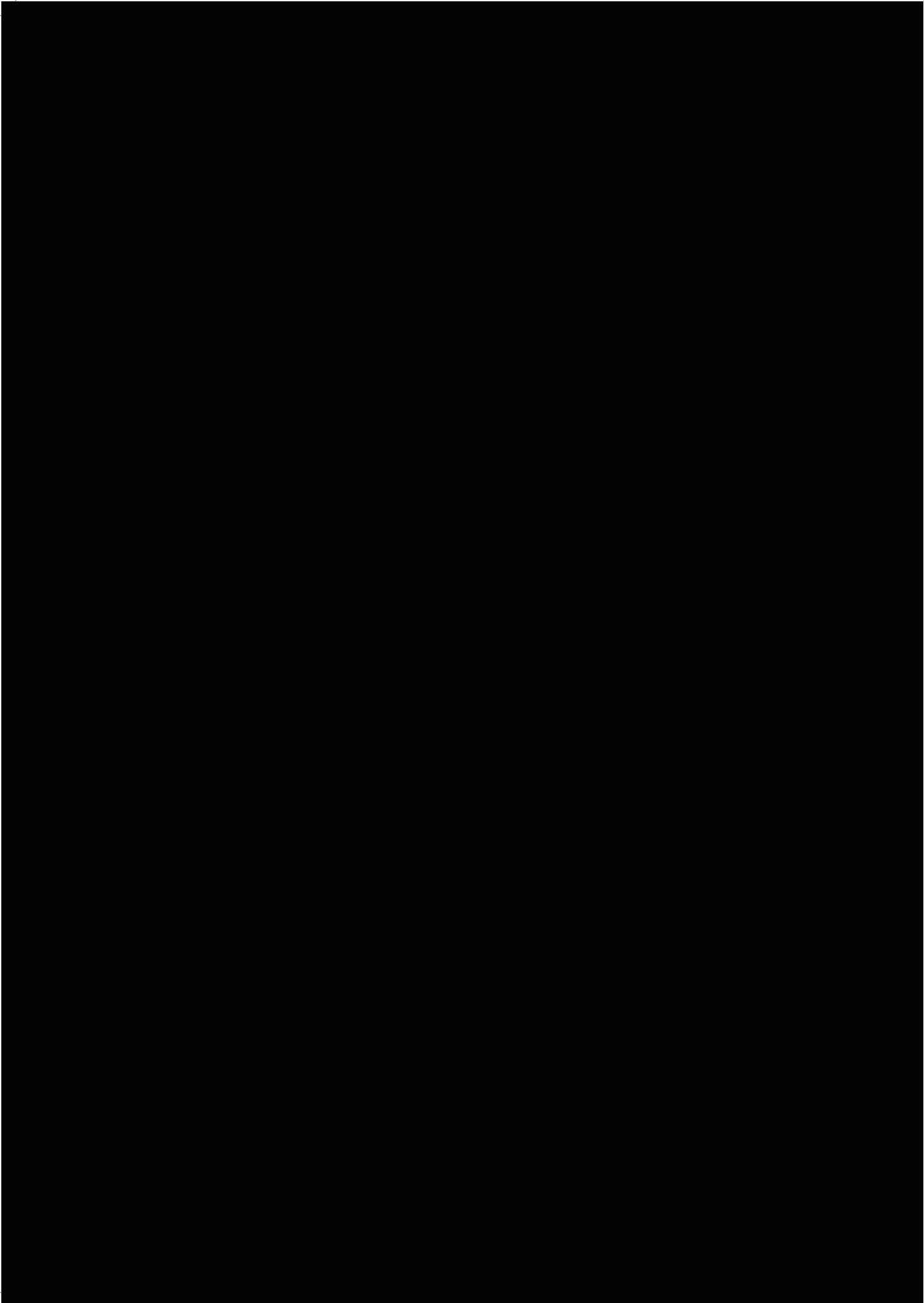
Klasa szorstkości	Szorstkość długość [m]	Energia [%]	Rodzaj terenu
0	0,0002	100	powierzchnia wody
0,5	0,0024	73	całkowicie otwarty teren, np. betonowe lotnisko, trawiasta łąka
1	0,03	52	otwarte pola uprawne z pojedynczą, niską zabudową
1,5	0,055	45	tereny uprawne, zabudowania w odległości min 1250 m
2	0,1	39	tereny uprawne, zabudowania w odległości min 500 m
2,5	0,2	31	tereny uprawne, zabudowania w odległości min 250 m
3	0,4	24	wsie, małe miasteczka, las, teren pofałdowany
3,5	0,8	18	duże miasta z wysokimi budynkami
4	1,6	13	bardzo duże miasta z wysokimi budynkami i drapaczami chmur



Literatura

- [1] J. Czajewski, *Meteorologia dla żeglarzy*, Oficyna Wydawnicza Alma-Press, Warszawa 2001.
- [2] A. Woś, *ABC meteorologii*, WN UAM, Poznań 2005.
- [3] I. Soliński, *Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 1999.
- [4] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Wiatr> (wejście 15.02.2014).
- [5] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Pasat> (wejście 15.02.2014).
- [6] G. E. Pięter, F. Augustinus, *The influence of the trade winds on the coastal development of the Guianas a various scale levels: a synthesis*, "Marine Geology" 208, 2004, s. 145–151.
- [7] K. Kozuchowski, J. Wibig, J. Degirmendzić, *Meteorologia i klimatologia*, WN PWN, Warszawa 2007.
- [8] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Monsun> (wejście 16.02.2014).
- [9] A. Woś, *Meteorologia dla geografów*, WN PWN 2002 (wejście 16.02.2014).
- [10] http://geografia_liceum.republika.pl/monsun.html (wejście 16.02.2014).
- [11] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Bryza> (wejście 28.02.2014).
- [12] Rysunek z zasobów Wikimedia Commons.
- [13] E. Adams, *Four ways to win the sea breeze game*, "Sailing World", March, 1997, s. 44–49.
- [14] M. Augustynowicz, P. J. Flatau, *Numerical study of the sea-breeze phenomena*, "Acta Geophysica Polonica" 29, 1981, s. 117–122.
- [15] W. G. Biggs, M. E. Graves, *A lake breeze index*, "Journal of Applied Meteorology" 1, s. 474–480.
- [16] A. Porson, D. G. Steyn, G. Schayes, *Formulation of an index for sea breezes in opposing winds*, "Journal of Applied Meteorology and Climatology" 46, 2007, s. 1257–1263.
- [17] <http://polska.newsweek.pl/jakie-szkody-spowodowal-halny-w-tatrach-bilans-newsweek-pl,artykuly,277636,1.html> (wejście 10.03.2014).
- [18] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Fen> (wejście 15.02.2014).
- [19] A. Flaga, *Inżynieria wiatrowa: podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa 2008.
- [20] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Harmattan> (wejście 24.02.2014).
- [21] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Tramontana> (wejście 24.02.2014).
- [22] http://pl.wikipedia.org/wiki/Wiatry_jeziora_Bajka%C5%82 (wejście 24.02.2014).
- [23] S. Huler, *Defining the Wind: The Beaufort Scale, and How a 19th-Century Admiral Turned Science into Poetry*, Clown 2004.
- [24] http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodlu_en/files/szorstkosc.htm (wejście 03.03.2014).







2. Typy elektrowni wiatrowych

2.1. Podział elektrowni wiatrowych

Elektrownie wiatrowe dzielone są na typy ze względu na zastosowanie (przydomowe lub przemysłowe), moc (mikro, małe i duże) oraz lokalizację (lądowe i morskie). Do zastosowań przydomowych (na potrzeby własne użytkownika) wykorzystywane są mikro i małe elektrownie. Duże elektrownie przemysłowe są przystosowane do sprzedaży energii. Poniżej przedstawiono szczegółowy opis podziału elektrowni wiatrowych ze względu na moc:

1. Mikroelektrownie wiatrowe – o mocy poniżej 100 W. Używa się ich najczęściej do ładowania baterii akumulatorów stanowiących zasilanie obwodów wydzielonych – w miejscach, gdzie sieć elektroenergetyczna nie występuje. Takie elektrownie można wykorzystać do zasilania przez akumulatory części oświetlenia domu: pojedynczych lamp, a nawet poszczególnych pomieszczeń czy urządzeń.
2. Małe elektrownie wiatrowe – o mocy od 100 W do 50 kW. Elektrownie z tej grupy mogą zapewniać energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet w małych firmach. W warunkach przydomowych najpopularniejsze są elektrownie 3–5 kW. Moc takich elektrowni, wspomaganą energią zmagazynowaną w akumulatorach, wystarczy do zasilania oświetlenia, układów pompowych, sprzętu i urządzeń domowych.
3. Duże elektrownie wiatrowe (w praktyce powyżej 100 kW), oprócz tego, że mogą zasiląć dom, stosowane są przede wszystkim do wytwarzania prądu, który sprzedaje się do sieci elektroenergetycznej. Taka elektrownia musi spełniać szczegółowe wymagania lokalnego operatora sieci. Potrzebna jest oczywiście jego zgoda na takie przyłączenie [1, 2].



Podstawowym kryterium podziału elektrowni wiatrowych jest położenie osi obrotu wirnika, zgodnie z którym rozróżnia się dwa rodzaje elektrowni:

- z poziomą osią obrotu – HAWT (ang. *Horizontal Axis Wind Turbines*), są to najczęściej instalowane turbiny na słupie,
- z pionową osią obrotu – VAWT (ang. *Vertical Axis Wind Turbines*),

Podziału elektrowni wiatrowych można również dokonać ze względu na inne kryteria:

- sposób wykorzystania produkowanej energii wyróżnia się siłownie energetyczne i siłownie mechaniczne (np. pompowe),
- liczbę płatów wirnika – elektrownie jedno-, dwu-, trzy-, cztero- i wielopłatowe,
- usytuowanie wirnika względem kierunku wiatru i masztu (w elektrowniach typu HAWT),
- dowietrzne (ang. *up-wind*) oraz odwietrzne (ang. *down-wind*),
- szybkobieżność – elektrownie wolnobieżne, średnobieżne i szybkobieżne.

Małe Turbiny Wiatrowe (MTW), ze względu na małą moc pojedynczej turbiny, wydają się mało istotne, jednakże po zsumowaniu mocy wszystkich jednostek mogą stanowić istotny potencjał energii z OZE. MTW mają wiele zalet, a są to:

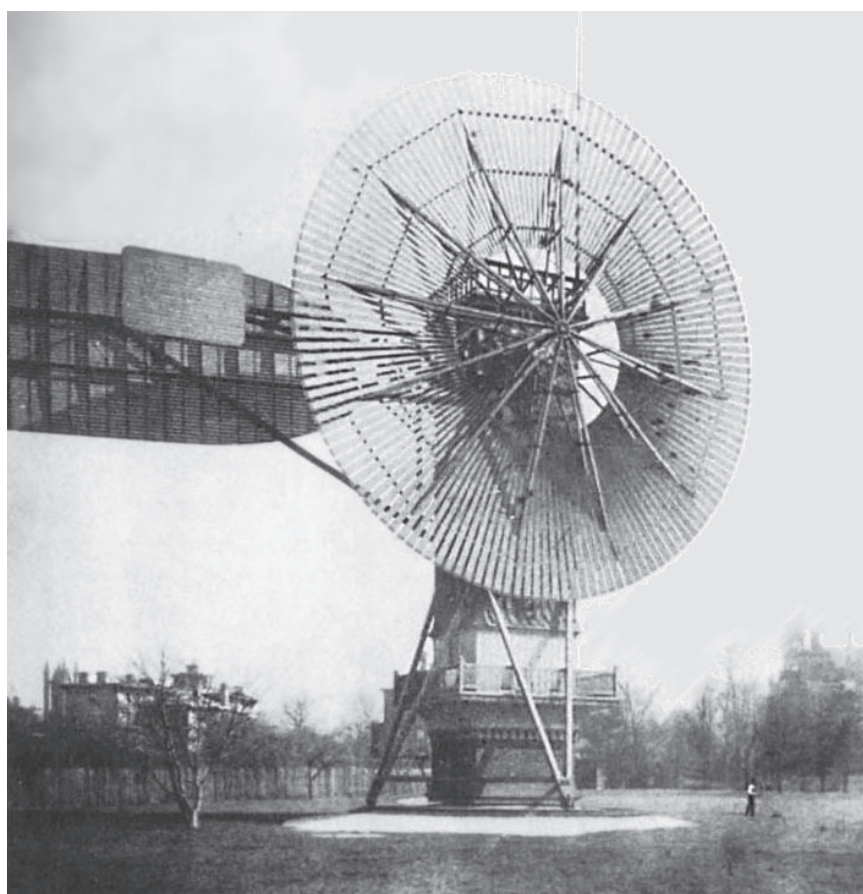
- łatwa instalacja elektrowni,
- niskie koszty inwestycyjne i wytwarzania energii,
- elektrownie rozpoczynają pracę przy prędkości wiatru 2 m/s,
- elektrownie mogą być eksploatowane niemal w każdym miejscu, ich negatywne oddziaływanie na środowisko jest znikome,
- nie wymagają linii przesyłowych [1, 2].

2.2. Pierwsze turbiny produkujące prąd elektryczny

Energia wiatru od dawna była wykorzystywana w drewnianych wiatrakach. Ich opis znajdują Państwo w rozdziale *Aeroenergetyka w Polsce* oraz w licznych opracowaniach literaturowych [3–5].

Rozwój przemysłu sprawił, że zaczęto poszukiwać nowych źródeł elektryczności. Na przełomie lat 1887/1888 Charles F. Brush zbudował pierwszą samoczynnie działającą siłownię wiatrową produkującą energię elektryczną (il. 1). Elektrownia została wykonana z drzewa cedrowego i składała się ze 144 łopat, miała 17 m średnicy i ważyła 80 Mg. Elektrownia Brusha pracowała przez 20 lat, zasilając akumulatory. Pomimo dużych rozmiarów, miała ona moc 12 kW, co było spowodowane zastosowaniem wielobrotowego i wielopłatowego wirnika [6].





Il. 1. Pierwsza turbina wiatrowa zbudowana przez Charles'a Brusha (autor nieznany [7])

Wadę turbiny Brusha wyeliminował Duńczyk Poul la Cour – zaczął on badać turbiny wyposażone w kilka łopat (il. 2). Co ciekawe, badania prowadzone były w prototypie tunelu aerodynamicznego. Ich owocem było wybudowanie w 1891 r. w Akov instalacji testowej, a w 1897 r. siłowni wiatrowej, z której produkowano prąd niezbędny w procesie elektrolizy. Otrzymywany w ten sposób wodór wykorzystywany był do oświetlenia¹ [8]. Przed wybuchem II wojny światowej na obszarze Danii pracowało przeszło 1300 turbin, w USA zaś aż 6 milionów.

W 1934 r. amerykański inżynier Palmer Putnam, po wybudowaniu letniego domu stwierdził, że rachunki za elektryczność są zbyt wysokie. Z drugiej strony tereny wokół domu charakteryzowały się dobrymi warunkami wietrznymi, więc

¹ Co ciekawe, w wielu kręgach naukowych uważa się, że wykorzystanie energii elektrycznej wytworzonej w siłowni wiatrowej do produkcji wodoru jest nowym, perspektywnym pomysłem.





Il. 2. Pierwsza turbina zbudowana przez Poula la Cour [9]

postanowił zbudować turbinę wiatrową. Nadmiar energii elektrycznej mógłby być przekazywany do sieci, a w przypadku braku wiatru energia mogłaby być pobierana z sieci. Putnam doszedł do wniosku, że aby inwestycja była opłacalna, turbina powinna mieć powyżej 1 MW mocy. W ten sposób omawiana turbina stała się prekursorem obecnych wielkich turbin współpracujących z siecią. Pod koniec 1939 r. rozpoczęto projektowanie i budowanie poszczególnych części elektrowni. Projekt obejmował wirnik o średnicy 53,3 m, składający się z 2 łopat wykonanych ze stali nierdzewnej, każda o długości 20 m i szerokości 3,4 m. Łopaty, które ważyły 7,3 Mg każda, mocowane były do mechanizmu osiowego turbiny na wysokości 36,6 m nad poziomem gruntu. Wykorzystano generator firmy General Electric o mocy 1,25 MW, pracujący przy napięciu znamionowym 2400 V i znamionowej prędkości obrotowej wynoszącej 600 obrotów/minutę [10, 11].

Po raz pierwszy energia elektryczna została wytworzona przez turbinę w październiku 1941 r. Przez następne 16 miesięcy turbina przepracowała ponad 1000 godzin przy prędkości wiatru dochodzącej do 113 km/h. W następstwie silnej



wichury, gdy prędkość wiatru dochodziła do blisko 200 km/h, został uszkodzony wał turbiny. Wał wymieniono, niestety w marcu 1945 r. urwała się jedna z dwóch łopat turbiny. Na skutek braku materiałów budowlanych, wynikającego z działań wojennych, elektrowni nie naprawiano. Pomimo że elektrownia Putnama² pracowała niecałe 4 lata, zdobyte doświadczenie pozwoliło wyeliminować błędy w konstrukcji przyszłych turbin [10, 11].

2.3. Współczesne turbiny o poziomej osi obrotu

W 1950 r. Johannes Juul skonstruował pierwszą turbinę wiatrową wyposażoną w generator prądu przemiennego, 7 lat później wybudował pierwszą „współczesną” elektrownię wiatrową o mocy 200 kW (il. 3). Obecnie turbinę tę można zobaczyć w Energy Museum (Energimuseet) w pobliżu Bjerrinbro w Danii [12].



Il. 3. Turbina Johanesa Juula [13]

² Turbina Putnama jest często nazywana Smitha-Putnama, gdyż Morgan Smith pomagał przy jej projektowaniu i budowie.



Na przestrzeni lat 60. i 70. XX w. w Europie najpopularniejsze były trójłopatowe turbiny o mocy z zakresu od 10 do 25 kW. W tamtych czasach większość konstrukcji była dziełem pasjonatów, przykładem może być Christian Riisager, który w latach 1974–1979 wybudował około 30 turbin wiatrowych. Do 1973 r. aeroenergetyka nie odgrywała niemal żadnej roli w energetyce światowej. Pierwszy kryzys naftowy sprawił jednak, że zarówno naukowcy, jak i energetycy zaczęli rozwijać odnawialne źródła energii, w tym aeroenergetykę. W USA rząd federalny wprowadził energetykę wiatrową do krajowego programu badań i rozwoju. W efekcie w stanie Ohio zainstalowano prototypową turbinę nazwaną MOD-0, o mocy 1 MW, a następnie kolejne – MOD-0A i MOD-2. Agencja NASA również przyczyniła się do rozwoju energetyki wiatrowej – wybudowana przy jej współudziale turbina nad rzeką Columbia miała łopaty o długości około 100 m [14].

Przemysł zainteresował się elektrowniami wiatrowymi na początku lat 80. XX w. Z inicjatywy duńskich zakładów energetycznych zdecydowano się na opracowanie turbiny o mocy 660 kW. Kolejne lata to rozwiązywanie wielu problemów technicznych związanych z konstrukcją generatora, wytrzymałością mechaniczną, doborem odpowiednich materiałów na wieże i łopaty wirników. Ostatnie 20 lat to prawdziwy rozkwit aeroenergetyki na świecie.

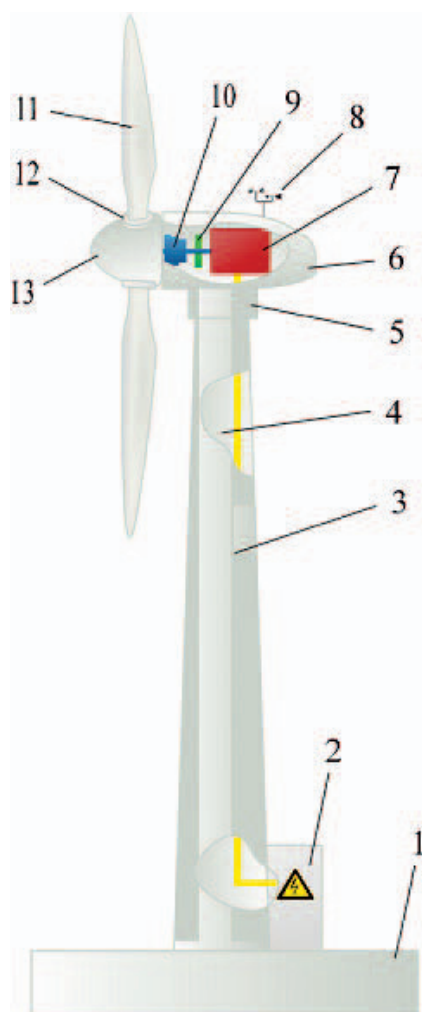
2.3.1. Budowa turbiny o poziomej osi obrotu

Jak już wcześniej wspomniano, na świecie najbardziej rozpowszechnione są turbiny o poziomej osi obrotu, składające się z:

- wieży nośnej z fundamentem,
- gondoli zawierającej generator, przekładnię, łożyska, przekształtnik energo-elektroniczny, układy smarowania, chłodzenia, hamowania, transformator blokowy (w większości przypadków) oraz układy sterowania położeniem turbiny względem wiatru,
- turbiny wiatrowej zawierającej wirnik, łopaty i układy sterowania ich położeniem,
- kabli wyprowadzających energię,
- układów sterowania elektrownią wiatrową wraz z układami pomiarowymi oraz systemami telekomunikacji [15].

Wirnik ma zwykle trzy łopaty, choć istnieją także konstrukcje, w których łopat jest mniej – dwie lub nawet jedna – bądź więcej, przykładem mogą być kilkunastołopatowe wiatraki amerykańskie, używane do napędzania pomp wodnych. Wirnik i gondola umieszczone są na wieży (il. 4). Najważniejszą częścią elektrowni wiatrowej jest wirnik, w którym dokonuje się zamiana energii wiatru na energię mechaniczną. Osadzony jest on na wale, poprzez który napędzany jest generator.





Il. 4. Budowa turbiny wiatrowej:

- 1 – fundament, 2 – wyjście do sieci elektroenergetycznej, 3 – wieża,
- 4 – drabinka wejściowa, 5 – serwomechanizm kierunkowania elektrowni,
- 6 – gondola, 7 – generator, 8 – wiatromierz, 9 – hamulec postojowy,
- 10 – skrzynia przekładniowa, 11 – łopata wirnika,
- 12 – siłownik mechanizmu przestawiania łopat,
- 13 – piasta (fot. Arne Nordmann [7])

Wirnik obraca się najczęściej z prędkością 15–20 obr./min, natomiast typowy generator asynchroniczny wytwarza energię elektryczną przy prędkości ponad 1500 obr./min. W związku z tym niezbędne jest użycie skrzyni przekładniowej, w której dokonuje się zwiększenie prędkości obrotowej. Najczęściej spotyka się



wirniki trójłopatowe, zbudowane z włókna szklanego wzmocnionego poliestrem. W piaście wirnika umieszczony jest serwomechanizm, pozwalający na ustawienie kąta nachylenia łopatek (skoku). Gondola musi mieć możliwość obracania się o 360° , aby zawsze można ustawić ją pod wiatr. W związku z tym na szczycie wieży zainstalowany jest silnik, który dzięki przekładni zębatej może ją obracać. W elektrowniach małej mocy, gdzie masa gondoli jest mała, jej ustawienie pod wiatr zapewnia ster kierunkowy zintegrowany z gondolą. Pracą mechanizmu ustawienia łopatek i kierunkowania elektrowni zarządza układ mikroprocesorowy na podstawie danych wejściowych (np. prędkości i kierunku wiatru). Ponadto w gondoli znajdują się: transformator, łożyska, układy smarowania oraz hamulec zapewniający zatrzymanie wirnika w sytuacjach awaryjnych [16].

Większość współczesnych elektrowni wiatrowych jest wyposażona w stosowane w siłowniach wiatrowych o stałej prędkości obrotowej generatory asynchroniczne. Zaletą tego typu siłowni jest łatwość podłączenia do sieci energetycznej, wadą zaś konieczność używania przekładni o dużym stopniu przełożenia – największą moc użyteczną wytwarzają generatory asynchroniczne, pracują bowiem przy prędkości obrotowej znacznie przekraczającej prędkość obrotową wirnika. Inną wadą takich rozwiązań to spadek ogólnej sprawności elektrowni, wywołany stałą prędkością obrotową wirnika, niezależną od prędkości wiatru, a także fakt, że przekładnie o dużym stopniu przełożenia stanowią najbardziej awaryjne i hałaśliwy zespół siłowni wiatrowej [15, 16].

Generatory asynchroniczne klatkowe stosowane w elektrowniach wiatrowych budowane są często jako maszyny o zmiennej (przełączanej) liczbie par biegunów (zazwyczaj o 2 i 3 parach biegunów). Znane są również konstrukcje zawierające dwa niezależne generatory w jednej obudowie. Tak zwany mały generator, którego prędkość synchroniczna wynosi 750 obr./min, pracuje przy słabych wiatrach. Kiedy prędkość wiatru wzrasta, uruchamiany zostaje „duży generator”, którego prędkość synchroniczna wynosi 1500 obr./min.

Turbiny wiatrowe są zazwyczaj przyłączane do sieci średniego napięcia (10–30 kV) i dlatego muszą być wyposażone w transformatory blokowe. Umieszcza się je w kontenerze stawianym przy wieży elektrowni, w samej wieży lub w przypadku jednostek o większej mocy znamionowej, w gondoli [15, 16].

Praca elektrowni wiatrowej jest zdeterminowana praktycznie tylko przez warunki wiatrowe, tj. prędkość wiatru oraz jego zmienność w czasie. Wyróżnia się cztery podstawowe tryby pracy elektrowni wiatrowej:

- 1) postój elektrowni wiatrowej (w gotowości do pracy) – gdy wiatr wieje zbyt słabo lub jest cisza,
- 2) praca z obciążeniem częściowym (nieznamionowym) – wiatr wieje z mniejszą prędkością niż prędkość znamionowa,



- 3) praca ze stałą i jednocześnie znamionową mocą – wiatr wieje z prędkością znamionową bądź większą,
- 4) postój elektrowni wiatrowej (w gotowości do pracy) – wiatr wieje zbyt mocno [15, 17].

Dokładny opis zjawisk fizycznych zachodzących w turbinie wiatrowej znajdują Państwo w rozdziale *Podstawy aerodynamiki wiatraków*.

2.4. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu

W wielu krajach pracują turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*). Uważa się, że jednym z prekursorów turbiny VAWT był Francuz Georges Jean Marie Darrieus, który opatentował ją w 1931 r. Turbina Darrieusa (il. 5) ma 2 lub 3 długie cienkie łopaty w kształcie pętli „C”, łączące się na górze i dole osi obrotu, albo łopaty proste równoległe do osi obrotu. Najważniejszą zaletą turbin VAWT jest ich skuteczne działanie niezależnie od kierunku wiatru. Turbina ma dobrą wydajność, natomiast do jej wad należą:

- 1) pulsujący moment obrotowy (redukowany przez zwiększenie liczby łopat do 3),
- 2) trudności z montażem wysoko pionowej osi obrotu, przez co wieża pracuje w wolniejszym, bardziej turbulentnym przepływie powietrza przy ziemi,
- 3) mały początkowy moment obrotowy i dlatego potrzebuje dodatkowego źródła zasilania albo wirnika Savoniusa [8, 18].

Turbina Savoniusa została skonstruowana przez fińskiego inżyniera S. J. Savoniusa w 1922 r. (il. 6). Przekrój poziomy wirnika tej turbiny jest zbliżony do litery „S”. Różnica sił oddziaływania wiatru na wklęsłą i wypukłą stronę łopat powoduje obrót wirnika, niestety, turbina obraca się wolno i dlatego ma małe zastosowanie do generowania elektryczności. Używana jest do pompowania wody, anemometrów, zasilania boi głębinowych. Stosowana wtedy, kiedy niezawodność i koszty są ważniejsze niż wydajność. Najczęściej turbina Savoniusa ma jedynie 2 łopaty, gdyż większa ich liczba zmniejsza jej sprawność. Łopaty te powinny być obrócone względem siebie o 90° w celu wyrównania momentu startowego, a średnica otworu między łopatami powinna zawierać się w przedziale od $0,1 \div 0,15$ średnicy jednej łopaty. Stosunek wysokości do średnicy powinien być dostosowany do warunków, w jakich ma pracować. Im wyższy stosunek wysokości do średnicy, tym wyższa sprawność, lecz dzieje się to kosztem wytrzymałości konstrukcji [17, 18].

Istnieją rozwiązania będące połączeniem turbiny Darrieusa z wirnikiem Savoniusa. Z połączenia korzystnych cech konstrukcyjnych i aerodynamicznych obu turbin (il. 7), przy jednoczesnym wyeliminowaniu cech ujemnych, otrzymano szereg zmodyfikowanych turbin, takich jak:





Il. 5. Turbina Darrieusa w Quebecu, Kanada
(fot. Spiritrock4u [7])

- turbina TURBY o mocy 2,5 kW, opracowana w Holandii, z przeznaczeniem do pracy na dachu budynku, z możliwością wykorzystania energii wiatru wiejącego zarówno poziomo, jak i pod różnym kątem – co jest możliwe dzięki ukośnie ustawionym łopatom;
- turbina H-Darrieusa – opracowana w Austrii, w kształcie litery H, z trzema pionowymi łopatom z mechanizmem odśrodkowym, układem sprężyn umożliwiających samoregulację obrotów przy różnych prędkościach wiatru; zamontowany na 5,5-metrowym maszcie wirnik o średnicy 1,9 m z łopatomami o długości 2 m osiąga moc 1,5 kW;





Il. 6. Turbina Savoniusa
(fot. Toro Oimatsu [7])

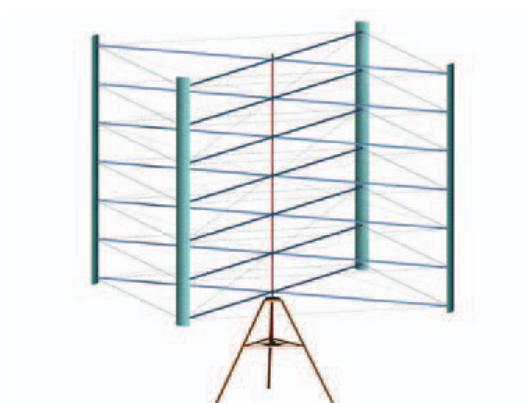
- turbina Wind Rotor o mocy 0,75–6 kW ma 2 łopaty szersze niż w turbinie H-Darrieusa, ale węższe niż w turbinie Savoniusa,
- turbina świdrowa (śrubowa), zbudowana w Danii, dzięki śrubowemu skręcaniu się łopat jej praca jest stabilna i cicha [1, 19].

Od 2005 r. amerykański Departament Energii wspiera prace badawcze zmierzające do zaadaptowania dla potrzeb małej energetyki wiatrowej prototypu turbiny wiatrowej LBNL-T2-0203-RU o pionowej osi obrotu (il. 8) [20].





Il. 7. Turbina będąca połączeniem turbiny Darrieusa i Savoniusa, Tajwan (fot. Fred Hsu [7])



Il. 8. Projekt turbiny wiatrowej LBNL-T2-0203-RU [20]

2.5. Turbiny wyposażone w dyfuzor

Zasada działania turbin wyposażonych w dyfuzor typu DAWT (*Diffuser Augmented Wind Turbine*) jest związana z prawem Bernoulliego, które dotyczy zachowania się gazu w rurze o różnych średnicach na wlocie i wylocie. Gaz po przejściu przez dyfuzor zwiększa swoją prędkość przepływu. Jeśli tradycyjny wirnik umieścimy w przewężeniu tunelu, to będzie on wirował szybciej w porównaniu z jego odpowiednikiem umieszczonym na zewnątrz dyfuzora. Badania nad powyższym zjawiskiem były prowadzone już w latach 50. XX w., jednak dopiero w latach 70. w zakładach Grummana wykonano i zbadano pierwsze prototypy turbin wiatrowych tego typu. W konsekwencji odkryto, że obecność szczeliny w dyfuzorze (w płaszczyźnie tunelu) wpływa na zwiększenie sprawności wirnika. Zwążający się wlot powoduje wzrost prędkości przepływu przed wirnikiem, natomiast dzięki szczelinie w dyfuzorze, która znajduje się za wirnikiem, powstaje strefa podciśnienia. W efekcie otrzymuje się dodatkowy przyrost prędkości przepływu powietrza przez wirnik [21]. Komercyjne rozwiązanie o nazwie Maxi Vortec ma moc 3,5 MW i wyposażone jest w wirnik o średnicy 54 m, co w przeliczeniu na powierzchnię wirnika daje aż 1,54 m², dzięki czemu wydajność jest 3-krotnie wyższa niż w przypadku turbin klasycznych. Na ilustracji 9 przedstawiono turbinę SWT-7-pro, którą można kupić w Polsce za 112 tys. PLN [22]. Średnica wirnika wynosi 3,35 m, minimalna średnica dyfuzora – 4,2 m, maksymalna średnica dyfuzora – 5,7 m. Konstrukcja jest bardzo wytrzymała na silne wiatry (do 55 m/s) [22, 23].



Il. 9. Turbina SWT-7-pro [22]



Renewable Devices Swift Turbines Ltd. opracowała i wprowadziła na rynek turbinę dachową typu Swift (*Swift roof-mounted wind turbine*), którą ze względu na małe gabaryty można z powodzeniem zastosować na konstrukcjach dachowych hal produkcyjnych, zabudowań gospodarskich, sklepów, stacji benzynowych czy budynków mieszkalnych (il. 10). Turbina składa się z 5 śmigieł umieszczonych w pierścieniu o średnicy 1,6–2,1 m (w zależności od mocy). Do rotora przymocowane są 2 tzw. płetwy ogonowe (ang. *twin tail fins*) ukierunkowujące turbinę na wiatr. Zastosowanie 5 śmigieł powoduje, że jest to turbina strukturalnie mocniejsza i bardziej wytrzymała od typowego rozwiązania z 3 śmigłami. Pierścień zmniejsza hałas, a jego stożkowy kształt (dyfuzor) pozwala lepiej zasysać wiatr, zwiększając jego prędkość. Turbina Swift nie wymaga kosztownych konstrukcji nośnych, pracuje cicho, nie powoduje wibracji, a do tego jest tania i prosta w montażu i konserwacji [24].



Il. 10. Turbiny Swift [24]

2.6. Inne rozwiązania konstrukcyjne turbin wiatrowych

Od 2008 r. w Kanadzie dostępne są turbiny o pionowej osi obrotu o nazwie Magwind (il. 11). Turbiny mają kształt naporstka, wysokość 2 m, średnicę 1,2 m, ciężar 113 kg. Według konstruktorów, Thomasa Priest-Browna i Jima Rowana,



dach o wysokości 3 m i spadzie 30° pozwala podwoić ilość wyprodukowanej energii względem standardowych instalacji na powierzchniach płaskich. Turbiny Magwind bardzo dobrze pracują w zmiennych warunkach wietrznych, zakres prędkości wiatru wynosi 2,2–44 m/s [25].



Il. 11. Turbina Magwind [25]

Firma AeroVironment Inc. specjalizuje się w opracowywaniu i wdrażaniu „miejskich” turbin wiatrowych (il. 12). Są to turbiny pozbawione wibracji, o zmniejszonym poziomie hałasu, działające nawet przy niewielkim wietrze. Firma dostosowuje się do potrzeb klientów, dzięki czemu turbiny są dobrze wkomponowane w krajobraz [26].



Il. 12. Turbiny firmy AeroVironment Inc. [26]



Firma Mariah Power sprzedaje turbiny o nazwie handlowej Windspire (il. 13). Jest to typowa turbina dla odbiorcy indywidualnego. Można ją samemu złożyć i zamontować zgodnie z instrukcją obsługi. Turbiny Windspire mają 5-letnią gwarancję, są niemal bezgłośne (do 20 dB) i tanie – koszt turbiny 1,2 kW wynosi 4995 USD [27].



Il. 13. Turbina Windspire [27]

Konstruktorzy firmy Aerotecture International Inc. zaproponowali nowe rozwiązanie turbin wiatrowych – tzw. aeroturbin (il. 14). Kształt wirnika opatentowanej turbiny zbliżony jest do generatora Savoniusa. Testowane są różne rozwiązania prototypów aeroturbin, które różnią się kątem skrzywienia powierzchni obrotowych silnika, wykorzystywanymi materiałami, rozmiarami geometrycznymi, oddawaną mocą oraz położeniem turbiny względem kierunku wiatru. Ze względu na niewielką masę i rozmiary geometryczne oraz zastąpienie ciężkich i wysokich konstrukcji słupowych (wieżowych) lekkimi aluminiowymi, mogą one być z powodzeniem instalowane na istniejących lub nowo budowanych dachach budynków mieszkalnych, halach produkcyjnych, magazynach. Istnieje również możliwość ich podwieszania pod konstrukcjami mostów czy na ogrodzeniach [28].





Il. 14. Aeroturbiny [28]

W USA można kupić turbinę Helix Wind Savonious o pionowej osi obrotu (il. 15). Turbina może być montowana bezpośrednio na dachu i nie potrzebuje instalowania dodatkowych konstrukcji nośnych. Wirnik swoim wyglądem przypomina świder o pokarbowanej powierzchni, dzięki czemu ma być bezpieczny dla przelatujących ptaków i nietoperzy. Turbina prawie nie hałasuje (do 5 dB) [29].

Firma Selsam Innovations opracowała turbinę wielowirnikową Multi-Rotor Wind Turbine (il. 16), osadzoną na jednym wspólnym wale napędowym. Turbiny składają się z 4–37 wirników wykonanych z polipropylenu. Przy wiatrach powyżej 3 m/s specjalny mechanizm mocowania wału (hydrauliczny lub pneumatyczny) powoduje jego pochylenie do przodu, tak aby każdy z wirników pracował optymalnie. Wirniki na wale napędowym umieszczane są w różnych konfiguracjach. Najczęściej instalowane są na przemian wirniki pracujące jako turbiny *up-wind* oraz *down-wind*, zamontowane jeden po drugim zapewniają regulację pasywną osi i chronią instalację przed dużymi porywami wiatru [8, 30].

W Światowym Centrum Handlu w Bahrajnie zostały zainstalowane na 3 poziomach 3 turbiny wiatrowe, każda wyposażona w 3-płatowe wirniki o średnicy 29 m (il. 17). Kształt wież, który przypomina żagle, został tak dobrany pod kątem





Il. 15. Turbina Helix Wind Savonius [29]



Il. 16. Multi-Rotor Wind Turbine [30]

aerodynamicznym, aby odpowiednio ukierunkowywać wiatry, które najczęściej wieją od Zatoki Perskiej. Ponadto konstrukcja wież, stanowiąc rodzaj dyfuzora, zwiększającego prędkość wiatru, poruszającego turbiny znajdujące się między wieżowcami, przyczynia się do zwiększenia wydajności [8, 31].



Il. 17. Turbiny wiatrowe zainstalowane w Światowym Centrum Handlu w Bahrajnie [31]

2.7. Przenośne turbiny wiatrowe

Coraz więcej protestów mieszkańców przeciwko farmom wiatrowym skłoniło inżynierów do opracowania mobilnych turbin, które można przewozić i stawiać w dowolnym miejscu. Projekt o nazwie Portable Power Center, opracowany przez firmę Uprise Energy, zakłada stworzenie generatora wiatrowego, który, w odróżnieniu od większości turbin, nie byłby na stałe przytwierdzony do podłoża, lecz transportowany na specjalnej platformie o rozmiarach typowego kontenera. Turbina o mocy 50 kW mieściłaby się w kontenerze, a cały zestaw ciągnęłaby ciężarówka (il. 18). Rozstawienie generatora nie trwałoby dłużej niż 2 godziny. Generator nie ma zbyt dużej mocy, jednak jego mobilność oraz ekologiczny sposób produkowania energii sprawiają, że idealnie nadawałby się do zasilania np. imprez plenerowych [8, 32].





Il. 18. Uprise Energy 50 kW Portable Power Center [33]

Z ekologicznej energii można korzystać również w caravaniu. Przykładowo na polskim rynku jest dostępna turbinka wiatrowa Air X Land 400 W, 12 V, produkująca prąd podczas postoju. Istnieje możliwość podłączenia tej turbinki do akumulatora w kamperze lub przyczepie. Air X występuje w 3 odmianach, w zależności od wykorzystania, lądowej (*Land*), morskiej (*Marine*) i przemysłowej (*Industrial*). Siłownia wiatrowa wyposażona jest w bezszczotkowy generator o mocy 400 W, wirnik o 3 łopatach i system automatycznej kontroli i hamowania. Turbina jest składana i przenośna, jej waga to 6 kg. Można do niej dokupić rozkładany maszt teleskopowy. To, co wyróżnia AIR-X wśród innych turbin to neodymowe magnesy, tworzywo termoplastyczne zbrojone włóknem węglowym, wysokiej jakości odlewy aluminiowe oraz akcesoria ze stali nierdzewnej, a także zintegrowany mikroprocesor. Do pracy z turbiną zalecany jest akumulator żelowy 200 Ah, 12 V [34].

Eolic jest mobilną, składaną, niewielką turbiną wiatrową (il. 19). Ten podręczny generator prądu elektrycznego z powodzeniem może być stosowany podczas długich plenerowych wypraw oraz w miejscach, gdzie trudno o jakiegokolwiek źródło



energii. Projekt nowej turbiny stworzyli Marcos Madia, Sergio Ohashi i Juan Manuel Pantano. Instalacja sprzętu jest bardzo prosta i nie wymaga żadnego doświadczenia ze strony użytkownika. Poszczególne elementy konstrukcji po złożeniu przylegają do siebie bardzo ściśle, co zapewnia doskonałą mobilność. Materiały, z których została stworzona Eolic, to głównie aluminium i włókno węglowe zapewniające lekkość i wytrzymałość. Urządzenie ma moc 600 W. Jego wysokość wynosi około 3 m, a rozpiętość łopatek maksymalnie 1,5 m [35].



Il. 19. Turbina Eolic [35]

HY-Mini jest małą przenośną turbiną wiatrową o wymiarach $5 \times 7 \times 2$ cm (il. 20). Za pomocą zestawu specjalnych uchwytów można ją przymocować do nadgarstka ręki, ramienia, kierownicy roweru czy do parapetu i pozyskiwać energię, która jest gromadzona w akumulatorach. Do HY-Mini można podłączyć każde urządzenie, które może być ładowane przez komputerowe złącze USB. Oprócz tego producent oferuje szereg przejściówek do różnych marek telefonów. W optymalnych warunkach 20 min pracy generatora przekłada się odpowiednio na 4 min rozmowy przez telefon, 40 min funkcjonowania odtwarzacza mp3, 30 min pracy z PDA/iPodem albo 20 zdjęć aparatem cyfrowym. Oprócz funkcji ładowania HY-Mini może również służyć jako latarka, dzięki białej diodzie LED. Wbudowany akumulator można oczywiście ładować z gniazdka lub komputerowego portu USB. Dla sportowców przewidziano specjalną opaskę na ramię, do której mocuje się HY-Mini, oraz uchwyt na kierownicę roweru. To ostatnie wydaje się najlepszym rozwiązaniem – na rowerze bez trudu można przecież rozwinąć prędkość przekraczającą 15 km/h [36].





Il. 20. Turbina HY-Mini [36]

2.8. Wieża słoneczna

U podstaw budowy wieży słonecznej leży zjawisko unoszenia się ogrzanego powietrza (il. 21). Pod olbrzymim dachem wykonanym ze szkła lub folii z tworzywa sztucznego ogrzewane jest zgromadzone tam powietrze, które następnie przemieszcza się do ulokowanego w centrum dachu komina, i w trakcie wznoszenia się napędza umieszczone w nim turbiny wytwarzające energię elektryczną. Wysokość komina może sięgać 1000 m, powierzchnia pod kolektorem może być wykorzystana do celów rolniczych [37].

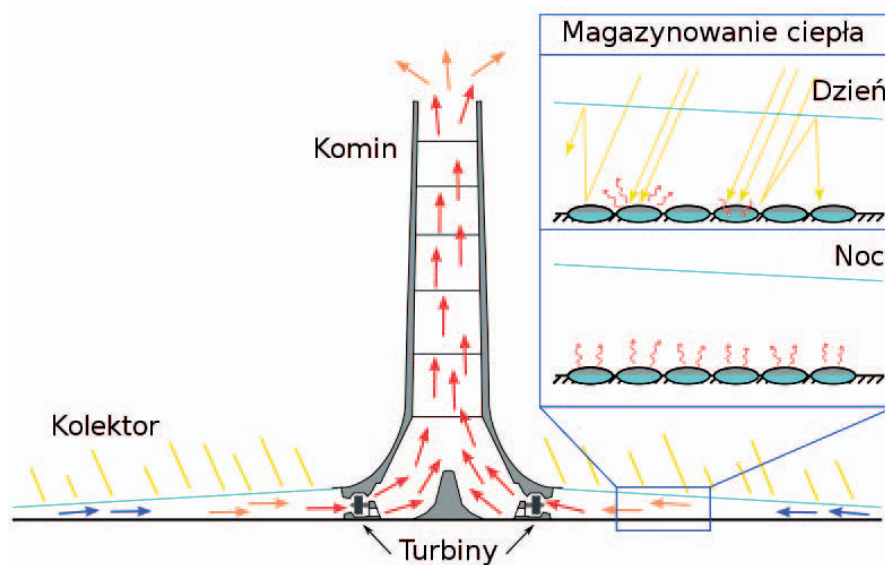
Koncepcja ta umożliwia wytworzenie:

- efektu cieplarnianego zapewniającego ogrzewanie powietrza pod dachem,
- ciągu kominowego prowadzącego do wznoszenia się ogrzanego powietrza,
- energii z przemieszczającego się powietrza i jej zamiany w generatorze w energię elektryczną.

Podstawową zaletą tych siłowni jest fakt, że nie trzeba w nich stosować wody, co odgrywa niebagatelną rolę w krajach cierpiących na jej brak. Równocześnie dzięki nagraniu powietrza ogrzewa się także podłoże pod dachem, które może stanowić naturalny magazyn energii wykorzystywany do wytwarzania energii elektrycznej po zachodzie słońca [38].

Budowa komina słonecznego wymaga wysokich nakładów początkowych, które są rekompensowane niskim kosztem obsługi [38, 39], możliwym z uwagi na brak kosztów zakupu paliwa. Komin słoneczny wymaga dużo mniejszej rezerwy energetycznej niż w przypadku elektrowni wiatrowych czy tradycyjnych elektrowni





Il. 21. Zasada działania komina słonecznego [7]

słonecznych, co jest związane z gromadzeniem ciepła, które może być oddawane w nocy. Umożliwia to pracę elektrowni przez całą dobę, czego nie mogą zagwarantować elektrownie wiatrowe czy ogniwa fotowoltaiczne, dla których w systemie energetycznym muszą istnieć rezerwy w postaci tradycyjnych elektrowni o mocy i dyspozycyjności umożliwiającej zastąpienie tych elektrowni.

Według szacunków wieża słoneczna o mocy 200 MW wymaga kolektora o średnicy 7 km i komina wysokości 1000 m. Instalacja ta może zapewnić energię dla 200 tys. typowych gospodarstw domowych. W przypadku tradycyjnych elektrowni produkcja tej energii spowodowałaby wydzielanie do atmosfery 900 Gg gazów cieplarnianych w ciągu roku. Wydajność takiej elektrowni szacuje się na około 5 W/m^2 (sprawność klasycznych fotoogniw wynosi około 20–40%, średnio około 50 W/m^2) [39].

2.9. Projekty turbin wiatrowych

Wykorzystanie wysoko zawieszonych systemów ma wiele zalet i prawdopodobnie już w najbliższym czasie zostaną szeroko rozpowszechnione. Do zalet tych systemów zalicza się:

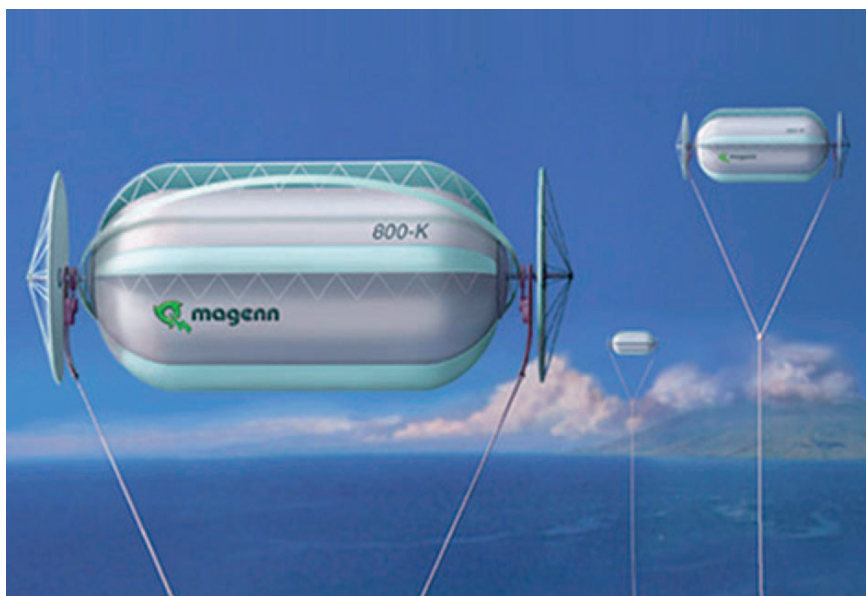
- brak hałasu, który towarzyszy turbinom naziemnym,
- minimalne oddziaływanie na florę, faunę (szczególnie ptaki) oraz na krajobraz,



- dużo niższe koszty wytwarzania energii niż w instalacjach naziemnych,
- wyższa sprawność,
- większy zakres pracy od 1 m/s do powyżej 30 m/s,
- „mobilność” – elektrownię łatwo i tanio można przenieść w inne miejsce.

Bryan Robert zaproponował wybudowanie latającej elektrowni (FEG – *Flying Electric Generator*), która będzie wykorzystywała energię wiatrów wiejących na wysokości od kilku do kilkunastu kilometrów. Na takich wysokościach wiatry mają większą prędkość oraz są bardziej stabilne. Latające turbiny będą przymocowane do powierzchni ziemi za pomocą specjalnych lin, wyposażonych w systemy kotwiczące. We wnętrzu liny umieszczone zostanie kabel elektroenergetyczny umożliwiający przesyłanie produkowanej energii elektrycznej do użytkowników. Wyniki badań prowadzonych w tunelach aerodynamicznych sugerują, że 600 latających platform jest w stanie wytworzyć ilość energii porównywalną z tą, jaka produkowana jest przez elektrownię konwencjonalną o mocy 1200 MW [8].

Projekt MARS (ang. *Magenn Power Air Rotor System*) zakłada, że energia elektryczna będzie pozyskiwana za pomocą balonu wypełnionego helem, który byłby utrzymywany linami na wysokości 120–300 m. Konstrukcja balonu pozwala na jego ruch wokół własnej osi w płaszczyźnie poziomej, wywołany przez parcie mas powietrza (il. 22). Obracający się balon napędza wirniki generatorów umieszczonych na jego przeciwległych końcach. Wysokość balonów byłaby automatycznie regulowana i dostosowywana do optymalnych warunków wiatrowych.



Il. 22. Wizualizacja turbin MARS [40]



Inne rozwiązanie unoszących się w powietrzu turbin wiatrowych, które zaproponowała firma Magenn Power Inc., bazuje na opatentowanym w latach 80. XX w. sterowcu (*Magnus Airship*). Miał on kształt sfery, która wypełniona była helem, i obracał się w kierunku przeciwnym do przemieszczających się mas powietrza (il. 23) [8, 41].



Il. 23. System Magnus Airship [41]

2.10. Prognozy dla turbin wiatrowych

Na całym świecie trwają intensywne badania nad udoskonaleniem budowy i sprawności turbin wiatrowych. Stosowane są nowe materiały, z których buduje się turbiny – lżejsze i bardziej wytrzymałe. Dąży się do tego, aby turbiny były jak najcichsze i nie powodowały jakichkolwiek drgań.

Ciekawym, już zresztą stosowanym, pomysłem jest budowa instalacji hybrydowych, czyli produkcja energii z dwóch lub więcej źródeł. W Polsce pionierem w instalowaniu autonomicznych hybrydowych lamp solarnych (il. 24) jest gmina Kowalewo Pomorskie. Na przełomie lat 2010/2011 postawiono 83 lampy, a w 2013 r. kolejnych 97. Lampy pozwalają na znaczne oszczędności, gdyż nie płaci się za prąd elektryczny. Projekt pod nazwą „Montaż systemu oświetlenia zewnętrznego typu solarnego wzdłuż ciągów pieszo-jezdných na terenie gminy Kowalewo Pomorskie” został dofinansowany ze środków Unii Europejskiej. Jak



wspominają władze gminy, na początku było wielu sceptyków, zdarzały się drobne awarie. Obecnie cały system pracuje bardzo dobrze. Wiele gmin w Polsce jest zainteresowanych wdrożeniem lamp hybrydowych [42].



Il. 24. Latarnia hybrydowa w Kowalewie Pomorskim (fot. S. Szymański)

Aeroenergetyka, obok helioenergetyki, jest brana pod uwagę, jeśli chodzi o pozyskiwanie energii elektrycznej przy kolonizacji planet. Eksperci NASA uważają, że nie jest możliwy transport na Marsa paliw kopalnych, dlatego należy wykorzystać „lokalne” źródła energii. Energia wiatru mogłaby być uzupełnieniem energii pozyskanej z promieniowania słonecznego. Co prawda, na powierzchni Marsa wiewą wiatry z prędkością do 5 m/s, jednak wraz ze wzrostem wysokości prędkość wiatru wzrasta [8]. Czy mogłyby więc być zastosowane latające siłownie wiatrowe?

Literatura

- [1] W. M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2007.
- [2] <http://www.solvir.pl/2> (wejście 07.01.2014).
- [3] M. Pawlik, *Wiatraki północno-wschodniej Polski*, Dział Wydawnictw Filii Uniwersytetu Warszawskiego, Białystok 1984.
- [4] J. Święch, *Wiatraki: młynarstwo wietrzne na Kujawach*, Lega – Oficyna Wydawnicza Włocławskiego Towarzystwa Naukowego, Włocławek 2001.

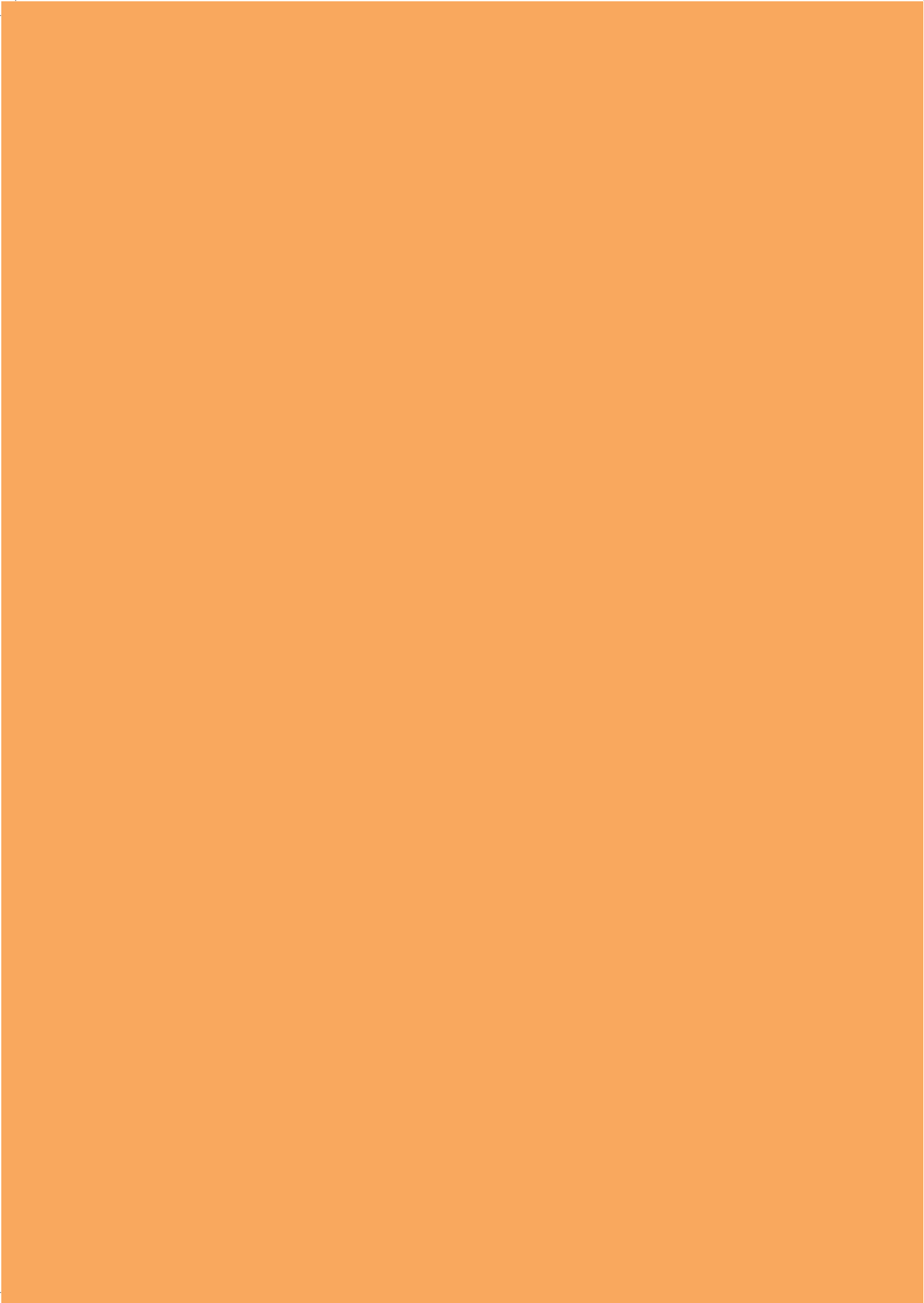


- [5] J. Święch, *Tajemniczy świat wiatraków*, „Łódzkie Studia Etnograficzne”, t. XLIV, Łódź 2005.
- [6] R. W. Righter, *Wind energy in America. A history*, The University of Oklahoma Press, Norman 1996.
- [7] Zasoby Wikimedia Commons.
- [8] T. Boczar, *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*, Wyd. Pomiar Automatyka Kontrola, Gliwice 2008.
- [9] <http://isaacbrana.wordpress.com/2010/06/28/historical-background-of-the-wind-power> (wejście 07.01.14).
- [10] C. Sulzberger, *A bold effort in Vermont. The 1941 Smith-Putnam wind turbin*, *IEEE Power&Energy Magazine*. November/December 2009.
- [11] <http://www.chronmyklimat.pl> (wejście 10.01.14).
- [12] <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/pictures/juul.htm> (wejście 10.01.2014).
- [13] http://www.oze.otwartaszkoła.edu.pl/Biblioteka/Artyku%C5%82y/Historia_wyK_en_wiatru_XX_XXI_w.aspx (wejście 27.01.2014).
- [14] http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodla_en/files/rozwoj.htm (wejście 27.01.2014).
- [15] Z. Lubośny, *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, WNT, Warszawa 2009.
- [16] <http://energiaodnawialna.net> (wejście 27.02.2014).
- [17] http://www.wmae.pl/userfiles/file/Aktualnosci/poradnik_a5.pdf (wejście 27.02.2014).
- [18] <http://eas.itc.pw.edu.pl/?p=324> (wejście 28.02.2014).
- [19] M. Augustyn, J. Ryś, *Kinematyka i moment obrotowy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu*, „Czasopismo Techniczne” 1, 2007, s. 3–17.
- [20] <http://www.empiremagnetics.com/articles/windmill.htm> (wejście 28.02.2014).
- [21] <http://energiaiwiatr.w.interia.pl/rodzaje.htm> (wejście 28.02.2014).
- [22] <http://www.smartwindturbine.com/index.php?a=2&b=23&c=pl> (wejście 28.02.2014).
- [23] <http://energia.infotom.com.pl/index.php/turbiny-swt/turbina-swt-7> (wejście 03.02.2014).
- [24] <http://thefutureofthings.com/6387-swift-wind-turbine> (wejście 03.02.2014).
- [25] <http://www.ideegreen.it/turbine-ecliche-per-tetti-21853.html> (wejście 03.02.2014).
- [26] <http://www.strangecosmos.com/content/item/174644.html> (wejście 03.02.2014).
- [27] <http://www.windspireenergy.com/wind-power/windspire-1.2/windspire-vertical-wind-turbine-1.2.htm> (wejście 04.02.2014).
- [28] <http://bacon.umcs.lublin.pl/~asmigiel/nawinki/aeroturbiny> (wejście 04.02.2014).
- [29] <http://savonius-balaton.hupont.hu/67/helixwind-corp-usa> (wejście 05.02.2014).
- [30] http://www.mykesweblog.com/2005/04/multirotor_wind.html (wejście 05.02.2014).
- [31] <http://naj00000.blog.pl> (wejście 03.02.2014).
- [32] <http://technowinki.onet.pl/aktualnosci/przenosna-turbina-wiatrowa-stawiaszgdzie-chcesz/83hfl> (wejście 03.02.2014).
- [33] http://www.likecool.com/Uprise_Energy_50kW_Portable_Power_Center_from_Uprise—Tech—Gear.html (wejście 03.02.2014).



- [34] <http://www.autocentrum.pl/caravanning/zielona-energia-turbinki-wiatrowe> (wejście 03.02.2014).
- [35] <http://ecopress.pl/art/mobilna-turbina-wiatrowa-253> (wejście 03.02.2014).
- [36] <http://zielonemigdaly.pl/2008/07/mini-elektrownia-wiatrowa> (wejście 03.02.2014).
- [37] X. Zhou et al., *Influence of atmospheric cross flow on solar updraft tower inflow*, "Energy" 42, 2012, s. 393–400.
- [38] J. Chodura, *Kolektory słoneczne w zastosowaniach specjalnych*, „Rynek Instalacyjny” 4, 2012.
- [39] J. Schlaich et al., *Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation*, "Journal of Solar Energy Engineering" 127, 2005, s. 117–124.
- [40] <http://fennixsun.blogspot.com/2013/03/magenn-power-air-rotos-system.html> (wejście 05.02.2014).
- [41] <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/mars-turbine3.htm> (wejście 05.02.2014).
- [42] B. Igliński i in., *Technologie helioenergetyczne*, WN UMK, Toruń 2013.







3. Podstawy aerodynamiki wiatraków

Pozyskiwanie energii z wiatru to jedna z najbardziej efektywnych i opłacalnych metod, bazujących na rozwiązaniach niekonwencjonalnych. Może być wykorzystywana zarówno na potrzeby systemów energetycznych, jak i odbiorców indywidualnych [1]. W dzisiejszych realiach turbiny wiatrowe konkurują z wieloma innymi źródłami energii. Muszą spełniać rygorystyczne wymagania energetyczne i ekonomiczne przy minimalnych kosztach inwestycyjnych. Charakterystyka wydajności tego typu urządzeń, taka jak moc vs. prędkość wiatru czy prędkość kątowna wirnika, musi być optymalizowana, aby być konkurencyjną dla innych źródeł energii [2]. Rozwój energetyki wiatrowej postępuje bardzo szybko, a popyt na odnawialne źródła energii zwiększa się coraz bardziej. Kluczowym elementem turbiny wiatrowej są łopaty, które generują dużą siłę nacisku na wieży turbiny wiatrowej [3], popularne staje się zatem poszukiwanie bardziej efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych samych turbin wiatrowych.

3.1. Zasoby energetyczne wiatru

Zagadnienia dynamiki strukturalnej stanowią obecnie podstawę optymalnego projektowania złożonych układów inżynierskich, gdyż niekorzystne zjawiska dynamiczne mają w wielu przypadkach decydujący wpływ na obniżenie trwałości i niezawodności układu. Właściwe określenie charakterystyk dynamicznych wymaga jednak opracowania i rozwiązania złożonego modelu dynamicznego. Dodatkowym utrudnieniem w opisie zjawisk dynamicznych jest konieczność przeprowadzenia wnikliwej analizy i wykorzystania odpowiedniego opisu matematycznego zarówno stanu obciążenia zewnętrznego, jak i sprzężeń występujących pomiędzy modelo-



waną strukturą a otoczeniem. Najczęściej stosowanym obecnie sposobem rozwiązywania zagadnień dynamiki strukturalnej jest metoda elementów skończonych.

Turbina wiatrowa przetwarza energię kinetyczną wiatru na energię mechaniczną na wale turbiny, a w efekcie końcowym w energię elektryczną w generatorze. Dostępną energię P wyprodukowaną przez turbinę można obliczyć teoretycznie. Załóżmy, że średnia prędkość wiatru przechodzącego przez obszar wirnika jest średnią prędkości niezakłóconego wiatru przed wirnikiem v_1 i prędkości wiatru po przejściu przez wirnik v_2 czyli $(v_1 + v_2)/2$. Masa powietrza płynącego przez wirnik w czasie jednej sekundy wynosi:

$$\dot{m} = \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (1)$$

gdzie: \dot{m} – przepływ masowy, ρ – gęstość powietrza, A – powierzchnia określana przez wirnik, $\frac{(v_1 + v_2)}{2}$ – średnia prędkość wiatru przechodzącego przez wirnik.

Moc przekazana od wiatru do wirnika, zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona wynosi:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2)$$

Podstawiając do równania (2) wyrażenie na przepływ masowy, otrzymujemy:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (3)$$

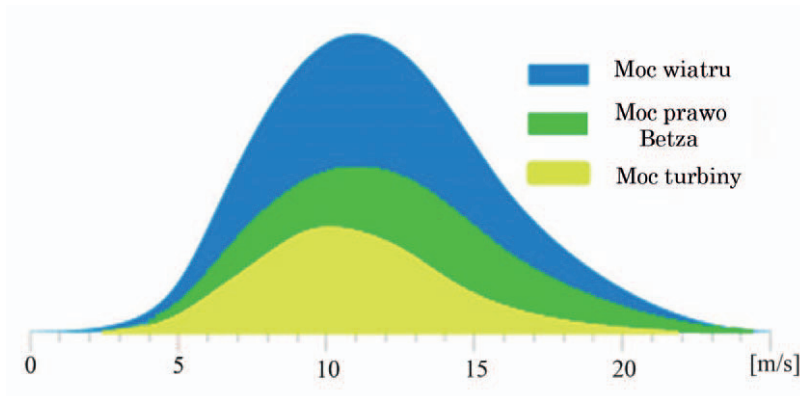
Porównując równanie (3) z maksymalną mocą przepływu niezakłóconego powietrza P_{\max} wynoszącą $P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$, otrzymamy:

$$\frac{P}{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right) \quad (4)$$

Wykres funkcji $\frac{P}{P_{\max}} = f\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ osiąga maksimum wynoszące 0,59 dla stosunku $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$, co oznacza, iż idealna turbina spowolni wiatr o około $\frac{1}{3}$ jego pierwotnej prędkości i odzyska 59% energii w nim zawartej. Zatem sprawność przetwarzania energii wiatru na energię elektryczną jest iloczynem sprawności turbiny wiatrowej, układu przeniesienia napędu (sprzęgło i przekładnia – o ile występuje) oraz prądni-



cy i wynosi około 60% (dla układów z przekładnią główną). Moc silnika wiatrowego można również opisać wzorem (5), uwzględniającym (w przeciwieństwie do wzoru (3)) współczynnik wykorzystania energii wiatru, wyróżnik szybkobieżności oraz kształt profilu skrzydła.



Il. 1. Rozkład gęstości mocy w funkcji prędkości wiatru

$$P = \frac{1-e}{1+e} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_s^2}{D_s^2} \right) - \frac{C_{op} z}{C_N 3} + \frac{1 - \frac{d_s}{D_s}}{2z} - \frac{1 - \frac{d_s^2}{D_s^2}}{4} \right] \pi D_s^2 \rho v_0^3 \quad (5)$$

gdzie: C_{op} i C_N – współczynniki oporu i siły nośnej, będące funkcją kształtu profilu śmigła, D_s – średnica okręgu zataczanego przez łopaty, d_s – średnica wirnika, e – współczynnik wykorzystania energii wiatru ($e=0,3-0,4$), z – wyróżnik szybkobieżności, ρ – gęstość powietrza, v_0 – niezaburzona prędkość wiatru.

Ciekawy jest fakt, iż spadek temperatury od 15 do 0°C przy stałym ciśnieniu powoduje wzrost gęstości powietrza i tym samym wzrost energii kinetycznej wiatru o około 6%. Wzrost temperatury powietrza od 15 do 30°C powoduje spadek mocy o około 5% [4].

Rzeczywisty współczynnik wykorzystania energii wiatru w wiatraku wyznacza się ze wzoru 5a:

$$\xi = \xi_i \left[1 - \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_j + \bar{T}_p + \bar{T}_m \right], \quad \xi = \xi_i \eta \quad (5a)$$

gdzie: η – sprawność wiatraka rzeczywistego (stosunek wykorzystania energii wiatru w silniku rzeczywistym do wykorzystania w silniku idealnym (i)), $\left(\frac{r_0}{R} \right)^2$ – zmniejszenie



szanie energii wykorzystanej na skutek zmiany powierzchni przepływu (piasta wirnika), $\bar{T}_j, \bar{T}_p, \bar{T}_m$ – przedstawiają względne straty energii jako stosunki strat energii w wiatraku rzeczywistym do strat w wiatraku idealnym.

Straty określa się następująco:

a) straty wywołane oporem indukowanym profilem – wzór (5b)

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1-e} \left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-e}{z}\right)^2}}{(1+e)iz} - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{iz}{\pi\left(1-\frac{e}{2}\right)}\right)^2}} \right] \quad (5b)$$

gdzie: z – wyróżnik szybkobieżności, i – liczba łopat;

b) straty wywołane oporem profilowym – wzór (5c)

$$\bar{T}_p = 2\mu' \left[\frac{1-e}{z} + \frac{z}{3(1-e)} \right] \quad (5c)$$

gdzie: μ' – wartość odwrotności doskonałości profilu (średnia dla łopaty);

c) straty wywołane zawirowaniami strugi poza wiatrakiem

$$\bar{T}_m = \frac{\xi_i \eta_e^2}{2z^2} \ln \frac{R}{r_0} \quad (5d)$$

gdzie: η_e – sprawność elementarnego wiatraka rzeczywistego (średnia dla łopaty).

W obliczaniu silników wiatrowych oprócz mocy silnika oblicza się również moment bezwymiarowy, równy stosunkowi momentu silnika wiatrowego do energii strugi wiatru – wzór (5e)

$$\bar{M} = \frac{4e(1-e)}{z_u(1+e)} (1+\mu) \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left(\frac{z_u}{3} + 1 - \frac{r_0}{R} \right) \quad (5e)$$

gdzie: $z_u = \frac{z}{1-e}$, μ – odwrotność doskonałości profilu w określonym przekroju łopaty [5–8].

Podsumowując, do obliczeń konieczna jest znajomość zależności pomiędzy podstawowymi parametrami silnika wiatrowego, a mianowicie współczynnikiem zahamowania e , liczbą łopat i , współczynnikiem siły nośnej C_z oraz szerokością łopaty w danym przekroju – b . Wobec powyższego dla danego przekroju łopaty, usytuowanego na przekroju r związek ten określono równaniem (5f):

$$ibC_z = 8\pi r \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \frac{1}{(z_u+\mu)\sqrt{1+z_u^2}} \quad (5f)$$

3.2. Konstrukcja turbin wiatrowych a wyróżnik szybkobieżności

Cechą charakterystyczną napędu aerogeneratora jest wyróżnik szybkobieżności, który wyraża się jako stosunek prędkości obwodowej końca wirnika U do prędkości wiatru v_0 – równanie (6).

$$z = \frac{U}{v_0} = \frac{\omega D_s}{2v_0} \quad (6)$$

gdzie: ω – prędkość kątowna.

W zależności od wartości współczynnika z stosuje się różne konstrukcje napędów aerogeneratora, i tak dla:

- $z < 1,5$ turbiny karuzelowe, bębnowe i rotorowe,
- $1,5 < z < 3,5$ turbiny wielopłatowe oraz
- $z > 3,5$ silniki śmigłowe i Darrieusa [4].

W zależności od współczynnika szybkobieżności silnika z , prędkości wiatru za wirnikiem (v_k) oraz jego sprawności mechanicznej (η_s) różna jest sprawność przepływowa silnika opisana równaniem (7) [9]:

$$\eta_p = \eta_s \frac{1}{z} \left(1 + \frac{v_k}{v_0}\right)^2 \left(1 - \frac{v_k}{v_0}\right) \quad (7)$$

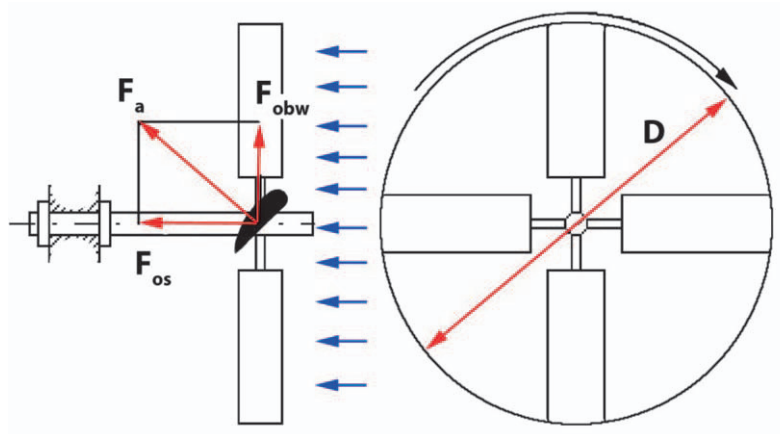
wobec powyższego, znając współczynnik momentu obrotowego Φ , można wyznaczyć moment obrotowy na wale silnika wiatrowego M_0 opisany równaniem (8) [4]:

$$M_0 = \Phi \frac{\rho v_0^2}{2} A_s \frac{d}{2} \quad (8)$$

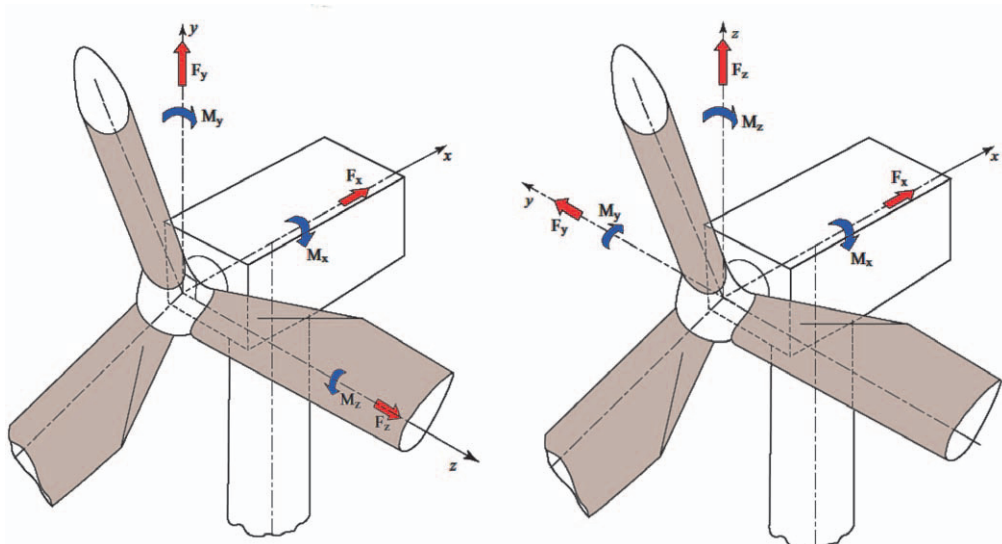
Moment obrotowy silnika powstaje w wyniku działania wiatru na łopaty wirnika, co przedstawiono na ilustracji 2. Siła aerodynamiczna F_a jest wypadkową siły oporu F_x powstałej wskutek naporu powietrza na łopatę i siły nośnej F_y (osie z , y , x zdefiniowano na il. 3), której mechanizm przedstawiono poniżej. Przyjmuje się, że ilość powietrza napływającego na krawędź natarcia łopaty o profilu np. płasko-wypukłym jest równa ilości powietrza spływającego z krawędzi spływu (zgodnie z równaniem ciągłości strugi). Ponieważ górna powierzchnia łopaty ma większą krzywiznę niż dolna, górna struga ma do przebycia w tej samej jednostce czasu dłuższą drogę, czyli jej prędkość jest większa niż dolnej. Zgodnie z prawem Bernoulliego ciśnienie górnej strugi będzie mniejsze niż dolnej. Ta różnica ciśnień jest główną przyczyną powstawania siły nośnej. Także na łopacie o przekroju sy-



metrycznym może powstawać siła nośna, jeśli łopata jest ustawiona pod dodatnim kątem natarcia (kątem α na il. 4). W takim przypadku opływ strugi powietrza na górnej i dolnej powierzchni będzie niesymetryczny, prędkość powietrza na górnej powierzchni będzie większa niż na dolnej, powstanie więc różnica ciśnień, a w wyniku tego siła nośna [9, 10].



Il. 2. Powstawanie momentu obrotowego na łopatach wiatraka (opracowanie własne za [9])



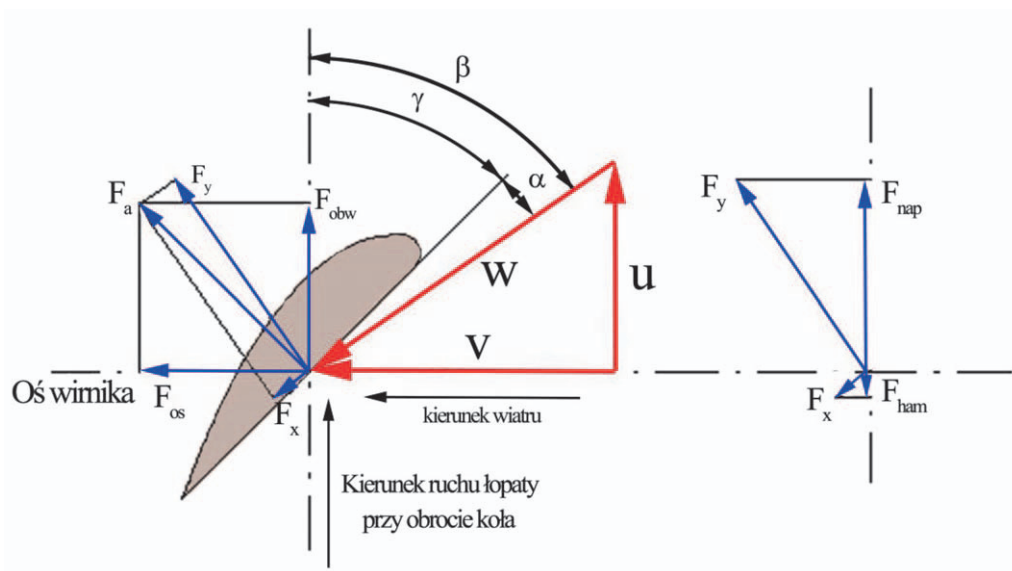
Il. 3. Definicja osi z, y, x (opracowanie własne za [10])

Rozkład siły aerodynamicznej można przedstawić jako funkcję składowej stycznej do płaszczyzny obrotów wirnika F_{obw} i siłę normalną F_{os} przedstawione wzorami (9) i (10):

$$F_{obw} = F_{nap} - F_{ham} = \frac{1}{w}(vF_y - uF_x) [N] \quad (9)$$

$$F_{os} = F_a \cos(\beta - \alpha) \quad (10)$$

Składowa styczna powoduje obrót, a składowa normalna wywołuje nacisk osiowy, który jest przejmowany przez łożyska. Rozkład siły aerodynamicznej przedstawiono na ilustracji 4 [5, 11].



Il. 4. Rozkład siły aerodynamicznej, siły: nośnej F_y i oporu F_x wyznacza się na podstawie charakterystyki profilu (opracowanie własne za [1, 9])

3.3. Profile stosowane w konstrukcjach łopatek elektrowni wiatrowych

W pierwszych konstrukcjach elektrowni wiatrowych, jak np. w wiatrakach typu holender czy kozłak, łopaty wykonane były z drewna. Materiał ten okazał się jednak niewystarczający do zapewnienia wysokiej niezawodności i odpowiedniej



mocy elektrowni wiatrowych. Silne podmuchy wiatru powodowały łamanie się łopat. Zaczęto wówczas stosować łopaty metalowe. Problemem okazał się sposób ich łączenia. Połączenia nitowane, śrubowe bądź spawane często ulegały pęknięciom zmęczeniowym, co znacznie zmniejszyło wytrzymałość łopat. Zmusiło to konstruktorów do poszukiwania innych materiałów, które zarówno spełniałyby kryteria wytrzymałościowe, jak i zapewniałyby wysoką sprawność aerodynamiczną elektrowni wiatrowych. Jednocześnie zaczęto brać pod uwagę masę łopaty, a więc zaczęto kłaść nacisk na wysokie właściwości mechaniczne stosowanych materiałów. Wprowadzono więc tworzywa sztuczne, które charakteryzują się małym ciężarem oraz dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Pierwsze typy profili łopat elektrowni wiatrowych zapożyczono z łatwo dostępnych baz profili, stworzonych na potrzeby lotnictwa. Niskie wartości współczynników aerodynamicznych tych profili oraz ich podatność na gromadzenie się zanieczyszczeń na krawędzi natarcia, spowodowane całkowicie wypukłym kształtem bez jakichkolwiek wklęsłości, stały się bodźcem do rozwoju metod projektowania kształtu łopat elektrowni wiatrowych. Początkowo modyfikowano jedynie kształty profili łopat, wprowadzając fragmenty wklęsłe lub ugięcia na krawędzi spływu.

Nowoczesne łopaty elektrowni wiatrowych wykonywane są z włókien szklanych wzmocnionych poliestrem, żywicą epoksydową bądź włóknami węglowymi czy kevlarem, przy czym stosowanie tych ostatnich jest bardzo kosztowne. Badania wykazały, że materiały te charakteryzują się wysoką wytrzymałością zmęczeniową oraz małą masą. Mają jednak jedną ważną wadę, tj. wysokie koszty produkcji, co automatycznie podnosi koszt elektrowni. Czynniki te spowodowały, że w elektrowniach o poziomej osi obrotu stosuje się obecnie od 2 do 3 łopat. Rzadziej jako materiał do konstrukcji łopat stosuje się drewno wzmocnione żywicą epoksydową lub innymi tworzywami sztucznymi, ale, jak dotąd, nie zdobyły one większej popularności. W elektrowniach o bardzo małej średnicy koła wiatrowego stosowane są łopaty stalowe i aluminiowe, przy czym są one bardzo ciężkie i podatne na zmęczenie materiału [12].

Rodzaj materiału używanego do produkcji łopat bezpośrednio wpływa na kształt profilu łopaty. Początkowo łopaty wykonywane z włókien szklanych – charakteryzowały się obrysem o kształcie okręgu, stopniowym przejściem ze środkowej części do owalnej podstawy oraz przegubem obrotowym umieszczonym wewnątrz łopaty. Profile te mogły mieć dużą odległość pomiędzy krawędzią natarcia a krawędzią spływu, w znacznym oddaleniu od miejsca zamocowania w wirniku. Duże wymiary wewnętrzne tych łopat pozwalały na wytwarzanie przez elektrownię wiatrową dużych mocy, jednak duże zużycie materiału zwiększało koszt produkcji, co czyniło budowę elektrowni wiatrowej nieopłacalną. Aby wyeliminować tę wadę, nastąpiło stopniowe przejście ze środkowej części do owalnej podstawy

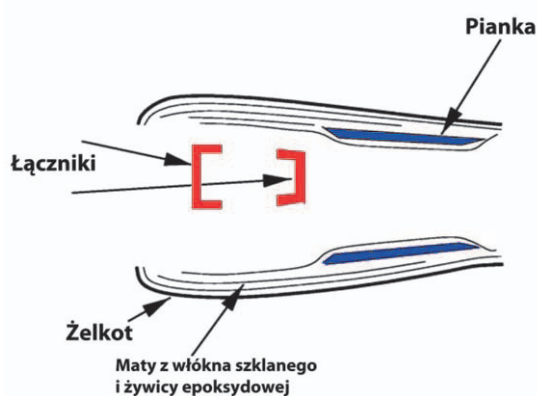


trzecim fragmentem. Łopata o takim kształcie miała mniejszą część o kształcie okręgu, a więc wytwarzała mniejszą moc, koszt jej był znacznie mniejszy. Aby zapobiec stratom generowanej mocy, zwiększano długość łopaty. Zwiększanie długości łopaty, a tym samym średnicy koła wiatrowego, okazało się efektywne w porównaniu ze znaczną redukcją części z obrysem o kształcie okręgu, co wiązało się ze zmniejszeniem kosztów materiałowych. Ponieważ moc użyteczna elektrowni wiatrowej zależy od prędkości wiatru, więc zwiększenie długości łopaty, a tym samym średnicy koła wiatrowego, pozwala na „pozyskanie” większej części energii wiatru [12]. Na ilustracjach 5 i 6 przedstawiono współczesną strukturę łopat.



Il. 5. Struktura wybranej sekcji łopaty [13]

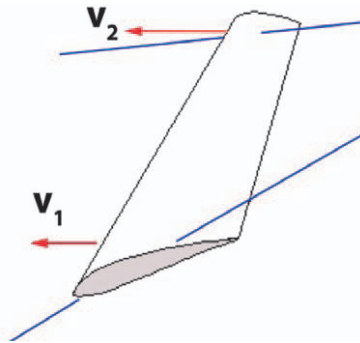
Wypadkowy kierunek powietrza uderzającego w łopaty jest inny niż kierunek wiatru w terenie, z wyjątkiem sytuacji, gdy wirnik jest nieruchomy. Większość turbin pracuje ze stałą prędkością obrotową. Typowa szybkość, z jaką końcówki łopaty przecinają powietrze, wynosi 64 m/s, podczas gdy prędkość w środku piasty wynosi zero. W jednej czwartej długości łopaty prędkość ta będzie wynosić około 16 m/s. Jeżeli łopatę wirnika przyjmiemy za nasz punkt odniesienia, to idąc wzdłuż niej od środka aż do końcówki, zaobserwujemy, że wiatr będzie opływał płat pod coraz większym kątem. Dlatego łopata wirnika musi być skrzywiona, aby utrzymać optymalne kąty natarcia na całej jej długości.



Il. 6. Schematyczny rysunek przekroju łopaty (opracowanie własne za [13])



Skręcenie łopaty wirnika przedstawiono na ilustracji 7. Dzięki takiemu rozwiązaniu wirnik pracuje bardziej wydajnie.



Il. 7. Skręcenie łopaty wirnika, powodujące stały kąt natarcia na całej długości łopaty (opracowanie własne)

Projektując elektrownię wiatrową, należy dążyć do uzyskania możliwie największej wartości mocy przy jak najmniejszych kosztach produkcji. Wartość mocy wyjściowej elektrowni wiatrowej wzrasta trzykrotnie w stosunku do długości łopaty, więc produkowanie lekkich i coraz dłuższych łopat jest opłacalne. Koszt produkcji łopat stanowi jedynie około 10% całkowitego kosztu elektrowni wiatrowej, toteż wydatki na innowacje w konstrukcjach łopat, metodach ich wytwarzania oraz stosowanych materiałach są małym udziałem w całkowitych kosztach produkcji. Lżejsza i lepsza konstrukcyjnie łopata pozwala zmniejszyć wymagania stawiane wieżom i wieżom, zmniejszając tym samym koszty produkcji i eksploatacji całej elektrowni. Powoduje to, że firmy wytwarzające łopaty elektrowni wiatrowych stanowią dla siebie dużą konkurencję w produkcji coraz to dłuższych, lżejszych i tańszych łopat [9, 12].

W procesie projektowania łopat elektrowni wiatrowych główny nacisk kładzie się na zmniejszenie ich masy, co z kolei przyczynia się do zmniejszenia obciążeń masowych i bezwładnościowych. Podczas gdy średnica koła wiatrowego wzrasta proporcjonalnie do kwadratu długości łopaty, to jej masa, według reguły opartej na doświadczeniu, powinna wzrastać trzykrotnie. W praktyce jednak zależność ta została złagodzona przez wprowadzenie innowacji w postaci konstrukcyjnej łopat oraz rozwoju metod ich wytwarzania, optymalizujących właściwości strukturalne laminatów, z których łopaty są wytwarzane [12].

Jednym ze sposobów zredukowania masy łopaty elektrowni wiatrowej jest zmiana jej postaci konstrukcyjnej.



Tradycyjne podejście – sztywne połączenie poszycia z dwoma dźwigarami – charakteryzuje się tym, że:

- poszycie i dźwigary występują w postaci powłok sztywno ze sobą połączonych,
- dźwigary umiejscowione są kolejno w 25 i 50% szerokości cięciwy,
- orientacja włókien laminatu (ca/gl/ca/gl) [14, 15], gdzie gl oznacza włókna szklane, natomiast ca włókna węglowe, z których wykonane jest poszycie, wynoszą odpowiednio $(25^\circ/-65^\circ/25^\circ/0^\circ)$,
- zewnętrzna strona połączenia powłok z dźwigarami wykonana jest w 60% z laminatu szkło-włókno węglowe oraz
- wewnątrz łopaty wykonane jest z quasi-izotropowego laminatu.

Rozwiązanie konstrukcyjne polegające na sztywnym połączeniu dwóch belek za pomocą pokrywy, tworzącej skrzynię, charakteryzuje się tym, że:

- poszycie jest elementem nieprzenoszącym obciążenia, a jedynie utrzymującym kształt profilu aerodynamicznego łopaty,
- skrzynia jest strukturalnym członem, przenoszącym podstawowe obciążenia,
- wprowadzenie uźebrowania zapewnia kształt aerodynamiczny,
- dźwigary tworzące skrzynię umiejscowione są kolejno w 25 i 50% długości cięciwy,
- orientacja włókien laminatu (ca/gl/ca/gl), z którego wykonana jest skrzynia, odpowiada kątom $(23^\circ/-65^\circ/25^\circ/0^\circ)$,
- orientacja włókien laminatu (ca/gl/ca), z którego wykonane jest poszycie, odpowiada kątom $(45^\circ/-45^\circ/0^\circ)$,
- skrzynia jest belką wykonaną z laminatu na osnowie żywicy epoksydowej, zbrojonej włóknami szklanymi i węglowymi z pozaosiowo zorientowanymi warstwami, połączonymi z warstwami zorientowanymi na kierunku obciążenia, wykonane metodą układania taśmowego.

Kolejna koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego łopaty – sztywne połączenie dwóch skrzyń będących połączeniem dwóch belek – charakteryzuje się tym, że:

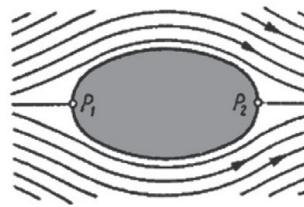
- dwie skrzynie stanowią dwa elementy belkowe spojone ze sobą,
- skrzynie wykonane są metodą nawijania-zwijania włókien,
- orientacja włókien laminatu (ca/gl/ca/gl), z którego wykonana jest skrzynia, wynosi odpowiednio $(25^\circ/-65^\circ/25^\circ/0^\circ)$,
- orientacja włókien laminatu (ca/gl/ca), z którego wykonane jest poszycie, wynosi odpowiednio $(45^\circ/-40^\circ/0^\circ)$,
- włókna przy połączeniach skrzyń charakteryzują się przeciwnym ukierunkowaniem (przeciwnie znaki kątów zorientowania) oraz równoległością głównych kierunków ułożenia włókien [12, 16].



Innym sposobem zmniejszenia masy łopaty elektrowni wiatrowych oraz zwiększenia sztywności i trwałości łopaty jest odpowiedni dobór materiałów stosowanych na dźwigary i poszycia. Modyfikacje kompozytu, z którego wytwarzane jest poszycie, mogą polegać na zwiększeniu grubości i gęstości warstwy balsy, zwiększeniu udziału warstw zbrojeniowych, zmiany orientacji bądź rodzaju włókien [12].

3.4. Podstawowe pojęcia z aerodynamiki

Strumień powietrza, napotykając na swojej drodze ciało stałe, na skutek konieczności jego ominięcia oraz w jego bliskim sąsiedztwie będzie miał inną szybkość niż powietrze bardziej odległe od tego ciała (il. 8). Strumień powietrza dość odległy od ciała stałego wykaże niezmienną prędkość pierwotną.



Il. 8. Przepływ powietrza w sąsiedztwie ciała stałego
(opracowanie własne za [5])

Ruch poszczególnych elementów w strumieniu powietrza przedstawia się zwykle jako linie prądu z zaznaczonym kierunkiem przepływu. Są to linie, których styczne w każdym punkcie są zgodne z kierunkiem przepływu powietrza. Zbiór pewnej liczby linii prądu tworzy pole szybkości [5, 17].

W zjawisku opływu ciała stałego przez powietrze na przekroju podłużnym tego ciała występują dwa charakterystyczne punkty P_1 i P_2 (il. 8). P_1 – przedni punkt spiętrzenia, P_2 – tylny punkt spiętrzenia. Szybkość cząsteczek w tych punktach wynosi zero.

Ruch cząstek, podczas którego szybkość w każdym punkcie nie zmienia się z biegiem czasu, nazywa się ruchem ustalonym. Ruchem nieustalonym nazywa się ruch, w którym szybkość cząstek w pewnych punktach z biegiem czasu się zmienia.

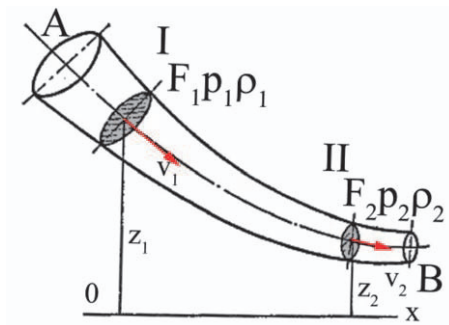
Włóknem prądu nazywa się część powietrza ograniczoną liniami prądu. Przepływ powietrza w danej chwili, w dowolnych przekrojach włókna prądu odbywa się tak, jak w rurce o sztywnych ścianach i nazywa się rurką prądu [5, 18].



3.4.1. Równanie ciągłości

Zgodnie z zasadą zachowania masy podczas przepływu powietrza jego masa musi być stała. Rozpatrując dwa przekroje poprzeczne F_1 i F_2 jednej rurki prądu, w których występują średnie szybkości powietrza v_1 i v_2 (il. 9), objętości powietrza przepływające przez te przekroje w jednostce czasu wynoszą $v_1 F_1$ i $v_2 F_2$. Jeżeli gęstość powietrza w tych przekrojach oznaczy się odpowiednio ρ_1 i ρ_2 , to masy powietrza przepływające przez te dwa przekroje w jednostce czasu będą wynosiły odpowiednio $F_1 v_1 \rho_1$ i $F_2 v_2 \rho_2$. Zgodnie z zasadą zachowania masy wielkości te muszą być sobie równe, czyli można zapisać to w postaci równania (11) zwanego równaniem ciągłości strumienia:

$$F_1 v_1 \rho_1 = F_2 v_2 \rho_2 = \text{const.} \quad (11)$$



Il. 9. Przykładowa rurka prądu
(opracowanie własne za [5, 6])

3.4.2. Prawo Bernoulliego

Prawo Bernoulliego traktuje o zasadzie zachowania energii przystosowanej przede wszystkim do rurki przepływu. Dla obu przekrojów poprzecznych rurki prądu (il. 9) można zapisać równanie (12):

$$F_1 v_1 \rho_1 = F_2 v_2 \rho_2 = m \quad (12)$$

gdzie: m – masa powietrza przepływająca w jednostce czasu.

Jeżeli rozpatrujemy ruch ustalony przez poprzeczny przekrój F_1 , to w ciągu czasu t przepływie objętość $F_1 v_1 t$, a masa tego przepływu wyniesie:

$$mt = \rho_1 F_1 v_1 t \quad (13)$$

W ciągu tego samego czasu przez przekrój F_2 przepływie taka sama masa, czyli:

$$mt = \rho_2 F_2 v_2 t \quad (14)$$

Masa powietrza przepływająca przez przekrój F_1 ma zasób energii, w skład której wchodzi:

a) energia kinetyczna (ruchu):

$$\frac{mv_1^2}{2} \quad (15)$$

b) energia ciśnienia p_1 (równoważna pracy wykonanej przez nacisk $p_1 F_1$ na drodze $v_1 t$):

$$p_1 F_1 v_1 t, \quad \frac{p_1 \rho_1 F_1 v_1 t}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} mt \quad (16)$$

c) energia potencjalna (wzniesienia masy m na wysokość Z_1 względem poziomu 0):

$$Z_1 mgt \quad (17)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie.

Podobnie można wyrazić wielkości energii dla przekroju F_2 .

Podczas przepływu bez strat na tarcie wewnętrzne obie sumy energii muszą być sobie równe, w związku z czym otrzymamy (18):

$$\frac{mv_1^2}{2} t + \frac{p_1}{\rho_1} mt + Z_1 mgt = \frac{mv_2^2}{2} t + \frac{p_2}{\rho_2} mt + Z_2 mgt \quad (18)$$

Oznaczając ciężary właściwe $\rho_1 g$ przez γ_1 i $\rho_2 g$ przez γ_2 , otrzymuje się równanie (19):

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + Z_2 = const. \quad (19)$$



Równanie to jest powszechnie stosowaną wersją równania Bernoulliego, a jego poszczególne człony wyrażają: $\frac{v^2}{2g}$ – wysokość prędkości (z tej wysokości musi spaść ciało, aby w spadku swobodnym uzyskało prędkość v), $\frac{p}{\gamma}$ – wysokość ciśnienia (wysokość słupa powietrza, który wywiera swoim ciężarem ciśnienie p), Z – wysokość geometryczną (niwelacyjną). Zgodnie z wyżej przedstawionym równaniem Bernoulliego suma wysokości prędkości, wysokości ciśnienia i wysokości geometrycznej jest stałą wzdłuż danej linii prądu [5, 15, 19].

3.4.3. Ciśnienie spiętrzenia przed przeszkodą

Mając na celu zastosowanie prawa Bernoulliego do punktu spiętrzenia na przeszkodzie P_1 (il. 8) znajdującej się w przepływie z szybkością v_0 , weźmy pod uwagę linię prądu, trafiającą do przedniego punktu spiętrzenia. W znacznej odległości przed przeszkodą szybkość przepływu wynosi v_0 , ciśnienie p_0 . Ciśnienie panujące w punkcie spiętrzenia wynosi p_1 , a szybkość przepływu w tym miejscu wynosi 0 [5]. Zakładając, iż linia prądu znajduje się ciągle na jednakowym poziomie ($Z_1 = Z_0$), równanie Bernoulliego można zapisać w sposób następujący (20):

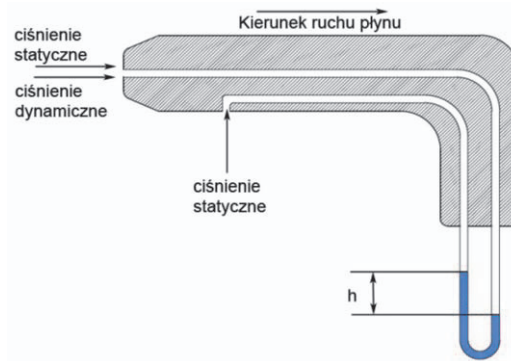
$$\frac{p_1}{\gamma} + 0 = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} \quad (20)$$

Przekształcając równanie (20), można otrzymać wzory na ciśnienie spiętrzenia p_1 i przyrost ciśnienia w tym punkcie (21):

$$p_1 = p_0 + \gamma \frac{v_0^2}{2g}, \quad p_1 - p_0 = \gamma \frac{v_0^2}{2g} \quad (21)$$

Przyrost ciśnienia nazywamy ciśnieniem prędkości lub ciśnieniem dynamicznym przepływu. Ciśnienie p_0 , wskazywane przez przyrząd mierniczy poruszający się wraz ze strugą powietrza, nazywa się ciśnieniem statycznym przepływu, ciśnienie p_1 zaś – ciśnieniem całkowitym. Gdyby w punkcie spiętrzenia wykonać otwór, to w jego wnętrzu będzie panować ciśnienie całkowite p_1 , można je zmierzyć odpowiednim przyrządem. Zgodnie z tą zasadą zbudowana jest rurka Prandtla (il. 10), służąca do pomiaru ciśnienia dynamicznego w dowolnym przepływie. Jest to rurka zagięta pod kątem prostym, której jedno ramię kieruje się podczas pomiaru równolegle, a drugie prostopadle do przepływu i obydwie łączy się z manometrem bądź mikromanometrem. W celu zmierzenia szybkości powietrza w przepływie odczytuje się różnicę wysokości obu słupów cieczy w manometrze (h), odpowiadającą ciśnieniu dynamicznemu przepływu.





Il. 10. Rurka Prandtla (opracowanie własne za [5, 19])

Korzystając z zależności, iż $\rho = \frac{\gamma}{g}$, podstawiając do równania (21), otrzymujemy:

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho v^2}{2} = hd \quad (22)$$

gdzie: h – różnica wysokości słupa manometrycznego, d – ciężar właściwy płynu manometrycznego.

Wobec powyższego, można zapisać, iż:

$$v = \sqrt{\frac{2hd}{\rho}} \quad (23)$$

oraz wiedząc, że gęstość powietrza zależna jest zarówno od temperatury, jak i ciśnienia barometrycznego, znając wzór na wyrażenie tej zależności, można zapisać, iż:

$$v = \sqrt{\frac{2hd}{0,0474 \frac{B}{273+t}}} = 6,49 \sqrt{\frac{hd(273+t)}{B}} \quad (24)$$

gdzie: t – temperatura, B – ciśnienie barometryczne.

Podstawiając do wzoru wartości gęstości odpowiednio wody ($1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) i alkoholu etylowego ($0,79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) oraz $t=15^\circ\text{C}$ i $B=760 \text{ mmHg}$, otrzymujemy odpowiednio się dla manometru:

a) wodnego $v = 4\sqrt{h} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$,

b) alkoholowego $v = 3,56\sqrt{h} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.



Należy pamiętać, że wysokość słupa manometrycznego należy wyrażać w milimetrach [5, 15, 19].

3.4.4. Przepływy potencjalne

Szczególne właściwość płynów idealnych (niemających lepkości) rozpoczynających ruch ze stanu spoczynku, tylko pod wpływem różnicy ciśnienia stanowi potencjał szybkości. Właściwość ta wyraża się funkcją Φ i polega na tym, że stosunek dowolnie małego przyrostu tej funkcji i takiego samego przyrostu odległości wyznacza szybkość przepływu w danym punkcie:

$$\frac{d\Phi}{dt} = v \quad (25)$$

Przepływy wykazujące taką właściwość, czyli mające potencjał szybkości, nazywa się przepływami potencjalnymi. Przepływy potencjalne wyróżniają się tym, że poszczególne części płynu biorące udział w takim ruchu nie podlegają żadnym obrotom [5].

3.4.5. Cyrkulacja i ruch wirowy

W przepływach występują ruchy obrotowe pewnych części powietrza, powodujące wiry. Występują one nader często za przeszkodami znajdującymi się w przepływach. Wielkością charakteryzującą opisany powyżej ruch powietrza jest szybkość kątowna jego cząstek – ω . Szybkość ta w przypadku wirów może być różna dla różnych cząstek, zarówno co do wielkości, jak i kierunku. Często obserwuje się w wirach powroty cząstek płynu do punktów zajmowanych przez nie poprzednio.

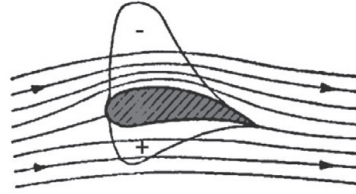
Cyrkulacją nazywa się wielkość wyrażoną za pomocą iloczynu szybkości cząstek przez drogę przebytą wzdłuż linii zamkniętej. Cyrkulacja części powietrza, obracającej się z szybkością kątowną ω po okręgu o promieniu r , wynosi [5]:

$$\Gamma = \omega r 2\pi r = 2\pi r^2 \omega \quad (26)$$

Rozpatrując ruch potencjalny, cyrkulacja wzdłuż każdej linii zamkniętej leżącej na obszarze przepływu wynosi zero, wobec tego ruch ten jest niewirowy. Jako przykład ruchu cyrkulacyjnego można rozpatrywać opływ powietrza dookoła płata nośnego, jak przedstawiono na ilustracji 11.

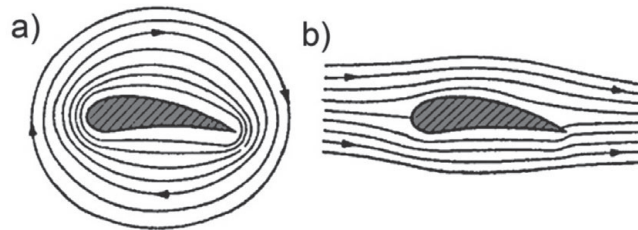
Przepływ w sąsiedztwie płata nośnego można rozpatrywać jako wypadkową dwóch przepływów: a) cyrkulacyjnego dookoła płata (il. 12a) i b) zwykłego, potencjalnego (il. 12b) [5, 11].





Il. 11. Opływ powietrza dookoła płata nośnego
(opracowanie własne za [5, 10])

Ze zjawiskiem cyrkulacji nieodłącznie związane jest występowanie siły nośnej. Przez nałożenie opływu cyrkulacyjnego na opływ zwykły zostaje zwiększona szybkość przepływu nad płatem, zmniejszona zaś pod płatem. W myśl prawa Bernoulliego taka sytuacja powoduje zmniejszenie ciśnienia nad płatem i zwiększenie ciśnienia pod płatem.



Il. 12. Opływy wokół płata:
a) cyrkulacyjny, b) zwykły, potencjalny
(opracowanie własne za [5, 14, 17])

Rozkład wyżej wspomnianego ciśnienia wytyczono schematycznie na ilustracji 11.

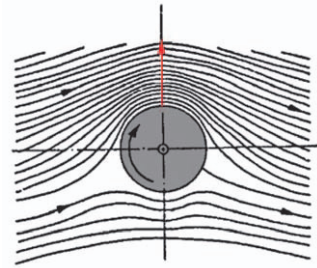
3.4.6. Zjawisko Magnusa

W przypadku zjawiska Magnusa mamy do czynienia z opływem dookoła wirującego walca (il. 13). Jest to opływ cyrkulacyjny powstający dookoła walca o osi prostopadłej do kierunku wiatru, w wyniku czego powstaje siła działająca poprzecznie do wiatru, skierowana od strony, po której wiatr i obrót mają kierunki przeciwne.

Ze zjawiskiem Magnusa można się najłatwiej zapoznać, wykonując doświadczenie. Polega ono na upuszczeniu szybko kręcącego się walca blaszanego. Walec



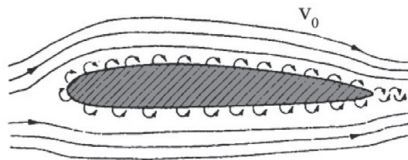
ten nie opada pionowo, ale w przypadku, gdy jego oś obrotu będzie pozioma, szybuje lotem ślizgowym, podobnie jak płat nośny. Spadek tego samego walca, niekręcącego się odbywa się wzdłuż pionu [5, 20].



Il. 13. Zjawisko Magnusa
(opracowanie własne za [5])

3.4.7. Przepływy burzliwe i warstwa przyścienna

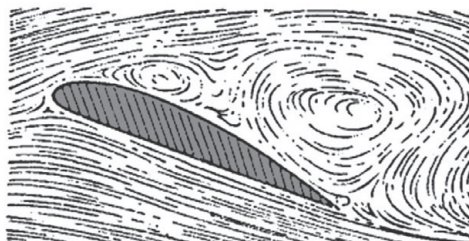
Umieszczając w przepływie powietrza ciało stałe (przeszkodę), na skutek lepkości powietrza jego warstwy znajdujące się tuż przy powierzchni ciała stałego będą przylegały do jego powierzchni i będą zatrzymywane, tworząc tzw. warstwę przyścienną (il. 14) [5]. Szybkość powietrza w dalszych warstwach, wobec przyhamowania go tylko przez warstwy pośrednie, jest odpowiednio większa, a w dostatecznie dużej odległości od ciała stałego wynosi tyle samo co w przepływie pierwotnym [5, 20].



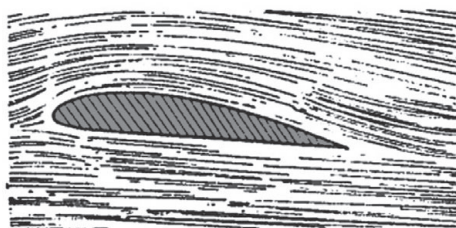
Il. 14. Model warstwy przyściennej
(opracowanie własne za [5])

Warstwa przyścienna, skręcając się przy odpowiedniej szybkości przepływu w niewielkie wiry, jest unoszona przez strumień zewnętrzny powietrza, który ulega przy tym przemieszaniu, obejmując zasięgiem coraz większy obszar. W obszarze tym występuje często oderwanie się strug przepływu od ścianki, tworząc większe zaburzenia w postaci wirów (il. 15a).





Il. 15a. Oderwanie strugi powietrza od górnej części płata
(opracowanie własne za [5])



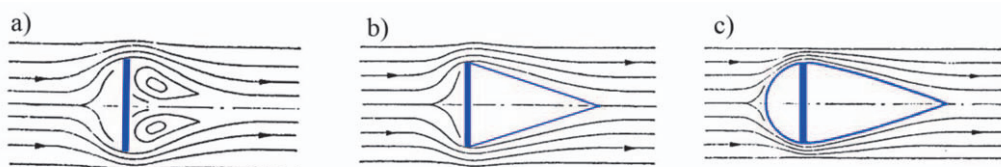
Il. 15b. Przepływ uwarstwiony
(opracowanie własne za [5])

Odrywanie się strugi powietrza od powierzchni płata jest szczególnie niekorzystne dla produkcji, gdyż powoduje poważne straty energii. Powietrze w warstwie przyściennej oraz w warstwach z nią sąsiadujących przy sprzyjających warunkach przepływa w postaci warstw równoległych, niemieszających się wzajemnie (il. 15b). Taki ruch powietrza nazywa się przepływem uwarstwowym (laminarnym) [5, 21]. Przepływem burzliwym (turbulentnym) nazywamy przepływ zawirowany o liniach prądu nieuporządkowanych z częstym odrywaniem się strugi od powierzchni.

3.5. Kształt opływowy

Opór napotykaný podczas równoległego przesuwania płytki, ustawionej prostopadle do kierunku ruchu, jest spowodowany spiętrzeniem ciśnienia przed płytką oraz podciśnieniem za płytką. Obraz linii prądu w sąsiedztwie płytki przedstawiono na ilustracji 16a.





Il. 16. Opis:

- a) opływ powietrza dookoła płaskiej płytki, ustawionej poprzecznie do przepływu;
- b) opływ o zmniejszonym oporze za płytką;
- c) opływ o zmniejszonym oporze przed i za płytką
(opracowanie własne za [5, 22, 23])

O ile linie prądu przed płytką można uważać za spływające łagodnie i warstwowo, o tyle za płytką następuje odrywanie się linii prądu od jej ścianki i gwałtowne wciskanie się strug powietrza w miejsca o niższym ciśnieniu, co jest przyczyną ruchu turbulentnego, a co za tym idzie znacznych strat energii. Duże zmniejszenie oporu w tym zjawisku można uzyskać, gdy za kolistą płytką umieści się ciało o kształcie obrotowym (il. 16b). Umożliwi ono spływ powietrza z krawędzi płytki bez odrywania się warstw przyściennych, a zatem warstwowy i bezwirowy. Jeszcze bardziej idealny przepływ można uzyskać wtedy, gdy zarówno za, jak i przed płytką umieści się ciało o kształcie zmniejszającym spiętrzenie powietrza [5, 24, 25].

Omawiając kształt płytki, płynnie przeszliśmy od zagadnień związanych z typowym oporem ciśnieniowym do zagadnień oporu tarcia. Należy zwrócić szczególną uwagę, że ilustracja 16c przypomina spadającą kroplę wody, która przyjmuje taką postać, aby opór spadania był jak najmniejszy. Przedstawia zatem kształt najkorzystniejszy pod względem aerodynamicznego oporu czołowego [5, 20, 26])

Formy przypominające spadające krople znalazły niewielkie zastosowanie praktyczne, wobec tego zaczęto stosować kształty o parametrach mniej korzystnych – przypominające kroplę wody w przekrojach skierowanych wzdłuż przepływu [5], ich profile nazywamy opływowymi.

3.5.1. Czołowe parcie wiatru

Wiatr jest powstrzymywany przez ciała stałe, napotykając opór, ale i wywierając siłę parcia na powierzchnię przeszkody. Aby ciało pozostało w spoczynku w strumieniu powietrza, należy przyłożyć do niego siłę równą parciu wiatru, skierowaną przeciwnie. Parcie wywierane na ciało zależy od jego wielkości, szybkości wiatru,



jego kierunku, gęstości powietrza, właściwości powierzchni ciała itp. Doświadczenia przeprowadzone z przedmiotami o różnych wielkościach i kształtach wykazały, że te złożone zjawiska można ująć w następujący sposób: gdy oddziaływanie wiatru odniesie się do pola największego przekroju ciała prostopadłego do kierunku wiatru oraz do ciśnienia dynamicznego wiatru, wprowadzając odpowiedni współczynnik oporu czołowego, to siłę wiatru oddziałującego można wyrazić wzorem (27):

$$F_x = c_x A \frac{\rho v^2}{2} \quad (27)$$

gdzie: F_x – siła wywierana przez wiatr, c_x – współczynnik oporu czołowego, A – pole płaszczyzny, na którą działa wiatr, ρ – gęstość powietrza, v – szybkość wiatru.

Znaczyniki x przy F i c oznaczają, że siła i współczynnik oporu dotyczą kierunku, odpowiadającego kierunkowi wiatru. Współczynnik c_x ilościowo wyraża wielkość parcia wiatru o ciśnieniu dynamicznym wynoszącym $1 \text{ kG}\cdot\text{m}^{-2}$ na ciało o przekroju poprzecznym wynoszącym 1 m^2 i zależy od kształtu przedmiotu. Istota oporu czołowego polega na tarciu powstającym na granicy faz powietrze–ciało stałe oraz na tarciu pomiędzy strugami powietrza na skutek odchylenia się ich od pierwotnego kierunku i wytwarzaniu wirów. Jest to tzw. opór profilowy [5, 27].

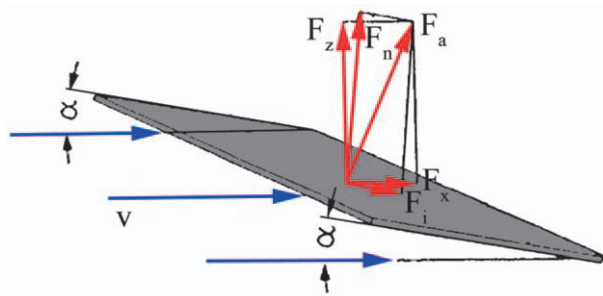
Ze wzoru (27) można obliczyć współczynnik oporu czołowego. Współczynniki te są tabelaryzowane i można je odnaleźć w popularnych pozycjach literaturowych dotyczących podstaw aerodynamiki.

3.6. Nacisk wiatru na płaszczyzny ustawione ukośnie

Gdy płaszczyzna zajmuje w stosunku do wiatru położenie skośne, to siła oddziaływania wiatru na tę płaszczyznę nosi nazwę siły aerodynamicznej F_a i jest skierowana również skośnie. Kąt α , jaki tworzy płaszczyzna z kierunkiem wiatru, nazywa się kątem natarcia. Siłę aerodynamiczną F_a można rozłożyć na dwie siły składowe: jedną w kierunku wiatru F_x – będzie to siła oporu czołowego, oraz na drugą, prostopadłą do wiatru F_z nazywaną siłą nośną. Rozkład sił oraz kąt natarcia schematycznie przedstawiono na ilustracji 17.

Wartość opisanych sił określa się podobnie jak we wzorze (27), jednak w tym przypadku wyraża się je w zależności od pola całkowitej powierzchni płyty A i dynamicznego ciśnienia wiatru – wzory (28) i (29).





Il. 17. Nacisk wiatru na płaszczyznę ustawioną skośnie do przepływu (opracowanie własne za [5, 20])

$$F_x = c_x A \frac{\rho v^2}{2} \quad (28)$$

$$F_z = c_z A \frac{\rho v^2}{2} \quad (29)$$

gdzie: c_x – współczynnik oporu czołowego, c_z – współczynnik siły nośnej, A – pole płaszczyzny (a nie pole największego przekroju poprzecznego).

Siłę wypadkową F_a można zatem wyznaczyć (wzór (30)):

$$F_a = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} = F \frac{\rho v^2}{2} \sqrt{c_x^2 + c_z^2} = cF \frac{\rho v^2}{2} \quad (30)$$

gdzie: $c = \sqrt{c_x^2 + c_z^2}$

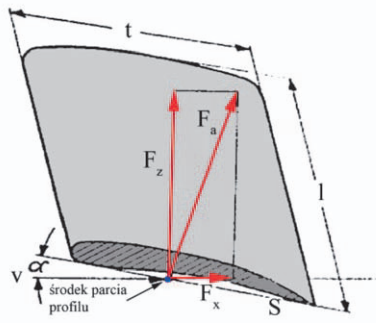
Całkowitą siłę aerodynamiczną F_a można rozłożyć również na dwie inne siły, jedną prostopadłą do płaszczyzny płyty – siłę normalną F_n oraz drugą, prostopadłą do poprzedniej siły styczną do płyty – F_i [5, 28, 29].

3.7. Nacisk wiatru na ciała o profilach opływowych

Jeżeli na skośnie działanie wiatru wystawi się płat o profilu opływowym, to rozkład sił oraz zależności pomiędzy nimi są takie same jak na ilustracji 17. Za kąt natarcia przyjmuje się kąt, jaki z kierunkiem wiatru tworzy cięciwa profilu, a za



pole A – rzut płata na płaszczyznę przeprowadzoną przez cięciwę. Jako punkt zaczepienia wypadkowej siły aerodynamicznej F_a przyjmuje się punkt przecięcia tej siły z cięciwą profilu, punkt ten nazywa się środkiem parcia profilu (il. 18).



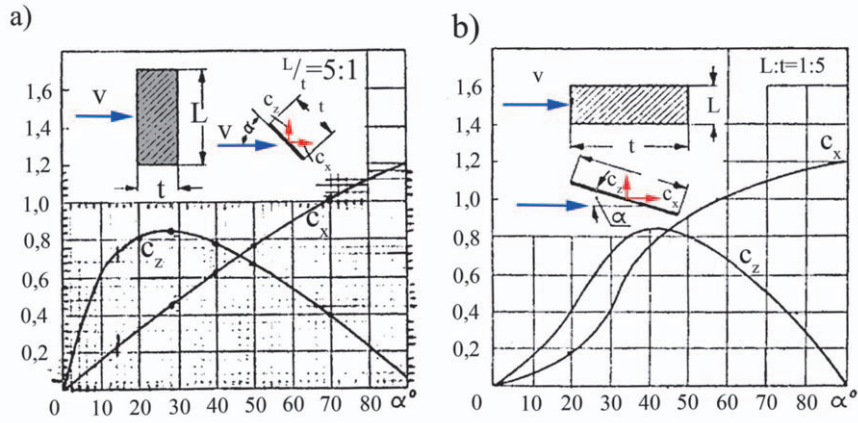
Il. 18. Nacisk wiatru na profil opływowy
(opracowanie własne za [5])

Wartości aerodynamicznych współczynników profili opływowych (c_x i c_z), a właściwie ich bezwzględne wartości są znacznie korzystniejsze niż dla współczynników płyt płaskich. Wynika to z faktu, iż w sąsiedztwie profilu mamy do czynienia z przepływem warstwowym. Strugi powietrza spływają z profilu bez tworzenia wirów i zaburzeń. W przypadku płaszczyzny następuje niekorzystne odrywanie się części strugi powietrza, powodując tym samym powstawanie zaburzeń i wirów, w wyniku czego tworzą się większe opory i mniejsza siła nośna. Ciekawe jest, że przy pewnych kątach natarcia kształty profilowe wykazują również przepływ powietrza z oderwaniem się strugi od dolnej albo górnej powierzchni [5, 30].

3.8. Współczynniki aerodynamiczne

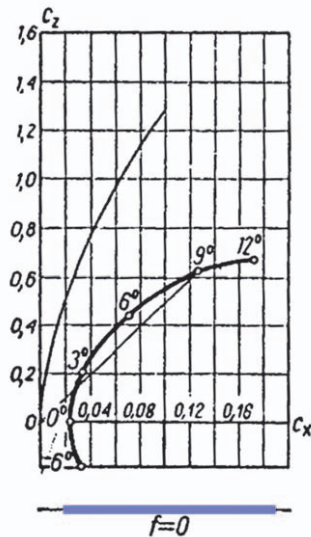
Wielkość współczynników siły oporu c_x i siły nośnej c_z jest zależna od kształtu profilu, kąta natarcia oraz od stosunku długości do szerokości płata i od szybkości wiatru. Stosunek długości do szerokości płata nazywa się rozpiętością względną lub wydłużeniem i oznaczany jest jako $\lambda = \frac{l}{t}$. Wartości współczynników wyznacza się doświadczalnie podczas badania profili w tunelach aerodynamicznych, analizując różne kąty natarcia. Uzyskane wyniki podaje się w postaci wykresów funkcji $c_x = f(\alpha)$ i $c_z = f(\alpha)$ (il. 19) [5].



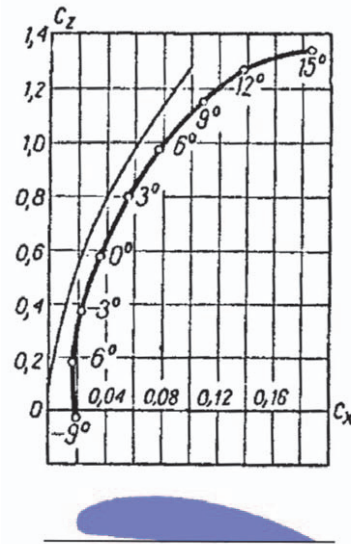


Il. 19. Współczynniki c_x i c_z w funkcji kąta natarcia α :
 a) dla płyty płaskiego o λ ; b) dla płyty płaskiego o wydłużeniu $\lambda = \frac{1}{5}$
 (opracowanie własne za [5])

Wykresy przedstawione na ilustracji 19 dotyczą płaszczyzn o dwóch różnych wydłużeniach. Znacznie wygodniej jest przedstawiać zależność współczynników w postaci $c_z = f(c_x)$, otrzymuje się w ten sposób tzw. krzywą biegunową. Na rysunku 20 przedstawiono krzywą biegunową płyty z ilustracji 19a, na rysunku 21 zaś – profilu opływowego.



Il. 20. Krzywa biegunowa płyty płaskiej
 (opracowanie własne za [5])

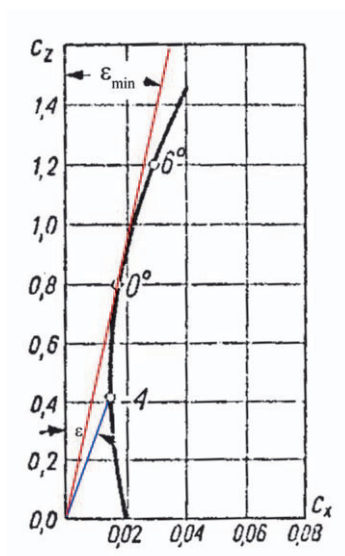


Il. 21. Krzywa biegunowa profilu opływowego o wydłużeniu $\lambda = 5$
(opracowanie własne za [5, 10])

Siła nośna F_z i siła oporu F_x są składowymi prostokątnymi całkowitej siły aerodynamicznej, w związku z tym odcinek prostej łączący początek układu współrzędnych z dowolnym punktem krzywej biegunowej jest współczynnikiem aerodynamicznym c całkowitej siły F_a i podaje kierunek działania tej siły wypadkowej. Stosunek długości płata do jego szerokości, przyjmowany zwykle dla tego typu wykresów, wynosi $\lambda = 5$. Stosując matematyczne metody przeliczeniowe, można obliczyć współczynniki dla dowolnych wymiarów. Bardzo często używa się wydłużenia nieskończenie wielkiego, oznaczanego $\lambda = \infty$. Wartość ta wyraża praktycznie płat niemający końców. Jest to założenie bardzo praktyczne, ponieważ jeżeli umieścimy płat w przepływie powietrza, to na jego końcach zachodzą zjawiska zasadniczo różniące się od tych, z którymi mamy do czynienia na środku płata. Zakładając, iż płat nie ma końców, pozbywamy się przedmiotowej problematyki. Na ilustracji 22 przedstawiono krzywą biegunową profilu z rysunku 21 dla wydłużenia nieskończenie wielkiego, czyli po uwzględnieniu oporów powodowanych końcami [5, 31].

Na ilustracji 23 przedstawiono krzywe biegunowe dla kilku typowych profili o zmiennej charakterystyce.





Il. 22. Krzywa biegunowa profilu z il. 21 o wydłużeniu $\lambda = \infty$
(opracowanie własne za [5])

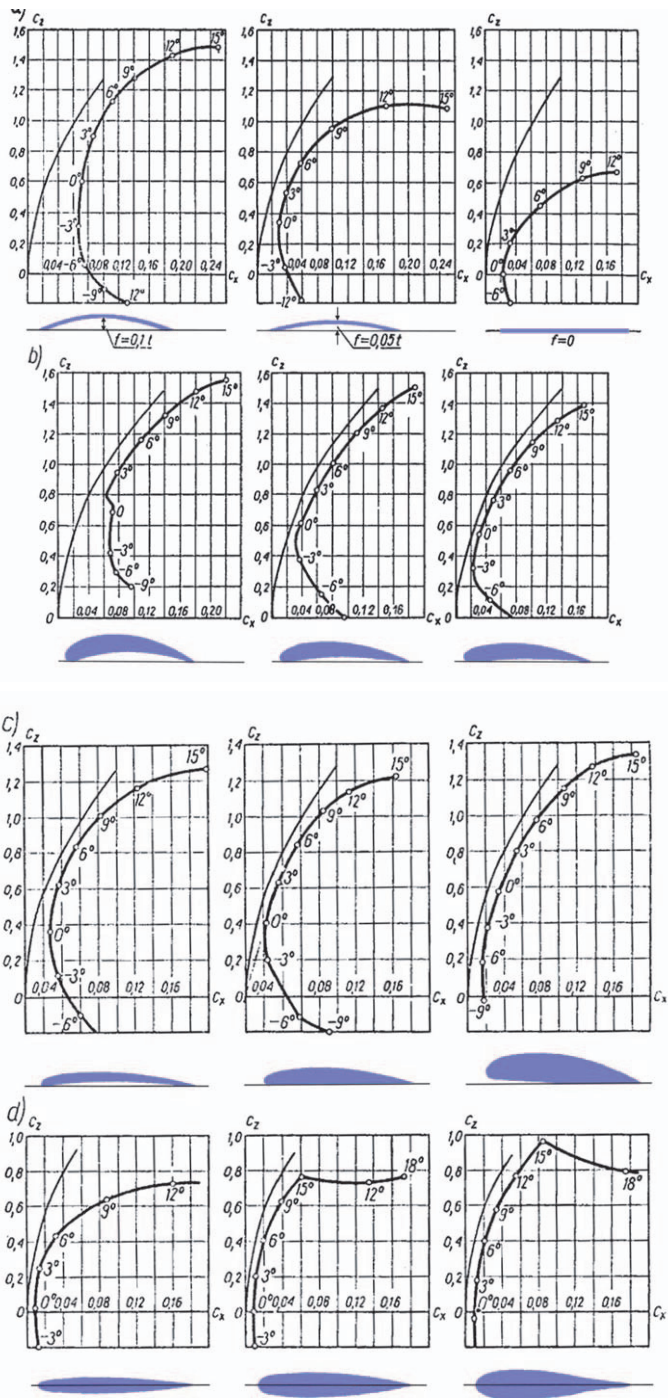
3.8.1. Doskonałość profilu

Mając do dyspozycji krzywe biegunowe, można określić bezwzględne wartości współczynników aerodynamicznych oraz jakość, czyli doskonałość profilu. Współczynnik doskonałości profilu wyrażamy wzorem:

$$v = \frac{c_z}{c_x} \quad (31)$$

Jednocześnie można wyznaczyć kąt natarcia, przy którym występuje obliczona doskonałość. Doskonałość profilu jest tym większa, im profil wykazuje większy współczynnik siły nośnej, a mniejszy współczynnik siły oporu, czyli zależy od wydłużenia płata. Doskonałość profilu zależy od kąta natarcia. Kąt natarcia dla największego współczynnika doskonałości profilu znajdujemy następująco: z początku układu współrzędnych przeprowadzamy styczną do krzywej biegunowej, w punkcie styczności z krzywą odczytuje się poszukiwany kąt natarcia (il. 22). Jak wynika z przedstawionych wykresów (il. 23), największa doskonałość profili występuje przy małej sile nośnej, natomiast największą siłę nośną uzyskuje się przy takim kącie natarcia, po jakim następuje oderwanie się strugi powietrza na górnej powierzchni płata [5, 7, 32].





Il. 23. Krzywe biegunowe wybranych profili (opracowanie własne za [5, 6, 33])

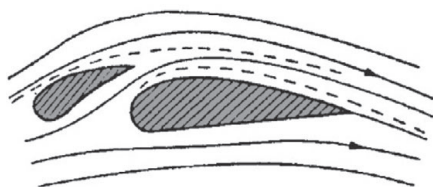
Kąt zawarty pomiędzy prostą poprowadzoną z początku układu współrzędnych do dowolnego punktu na krzywej biegunowej a osią rzędną oznacza się jako ε . Tangens tego kąta jest odwrotnością współczynnika doskonałości profilu wg wzoru:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{c_x}{c_z} = \frac{1}{\nu} \quad (32)$$

Najmniejszy kąt ε_{\min} otrzymuje się dla punktu krzywej biegunowej o największej doskonałości aerodynamicznej, wielkość tego kąta jest pośrednią miarą największej doskonałości profilu. Wobec powyższego porównywanie profili aerodynamicznych może być w wielu przypadkach ograniczone do porównania najmniejszych kątów ε_{\min} [5, 7, 34].

3.9. Siła nośna wybranych profili

Aby poglądowo wyjaśnić aspekt zmiany aerodynamiki profili, można posłużyć się poniższym przykładem. Na przedstawionych krzywych biegunowych (il. 23) największy współczynnik siły nośnej wynosi 1,55 dla przykładu b, wykazując doskonałość profilu wynoszącą $\nu = \frac{1,55}{0,22} = 7,05$. Przez zaopatrzenie profilu płata w odpowiednio umiejscowioną i wykonaną szczelinę (il. 24) można podwyższyć wartość współczynnika siły nośnej do 2.

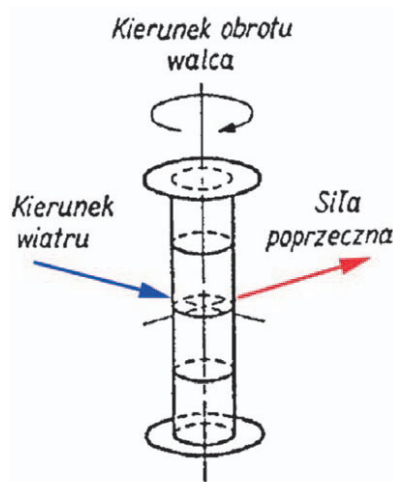


Il. 24. Profil opływowy ze szczeliną
(opracowanie własne za [5])

Korzystny skutek stosowania szczelin polega na ich przeciwdziałaniu odrywania się strug przepływu od górnej powierzchni profilu, wskutek czego szczeliny te umożliwiają wykorzystanie znacznie większego kąta natarcia, dzięki któremu uzyskuje się większą siłę nośną. Szczeliny te powodują jednak zwiększenie oporu czołowego profili, czyli zmniejszają doskonałość profili.



Kolejnym dobrym przykładem może być rotor Magnusa: obracający się w strumieniu powietrza walec (il. 25) powodujący zjawisko Magnusa, który może osiągnąć współczynnik siły nośnej wynoszący nawet 10. Aby otrzymać taką wartość, należy zaopatrzyć końce walca w wystające pierścienie, uniemożliwiające wyrównywanie ciśnienia po obu stronach cylindra, oraz nadanie walcowi szybkości obwodowej około 4 razy większej niż szybkość wiatru.

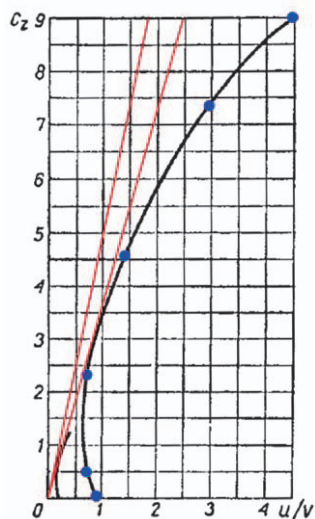


Il. 25. Rotor Magnusa
(opracowanie własne za [5])

Dla porównania krzywej biegunowej profilu opływowego z krzywą biegunową rotora Magnusa umieszczono te dwie krzywe na jednym wykresie, z tym że zamiast wielkości kątów natarcia przyjęto za parametr odniesienia stosunek prędkości obwodowej do szybkości wiatru.

Z porównania obu wykreślonych krzywych wynika, że współczynnik siły nośnej rotora jest wielokrotnie większy niż ten współczynnik dla profilu opływowego. Należy jednak zauważyć, iż współczynnik oporu dla rotora jest większy od współczynnika oporu profilu opływowego. Kąt największej doskonałości jest większy w przypadku rotora niż dla profilu opływowego, a co za tym idzie, aerodynamiczna doskonałość rotora ustępuje znacznie doskonałości profilu opływowego [5]. Tak właśnie wygląda przykładowe porównanie dwóch krzywych biegunowych, zawierających nawet różne jednostki odniesienia.

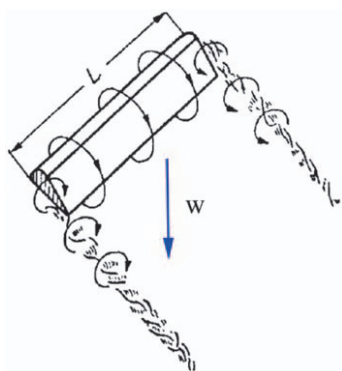




Il. 26. Krzywa biegunowa rotora Magnusa i profilu opływowego – porównanie (opracowanie własne za [5, 15])

3.9.1. Zagadnienie oporu indukcyjnego

Zjawisko oporu indukcyjnego powstaje na skutek przepływu powietrza spod płata na jego wierzch, wywołanego różnicą powstałego ciśnienia. Ten ruch powietrza nakłada się na ruch w przepływie pierwotnym, a będąc w stosunku do niego prostopadłym, wywołuje dwa wiry rozciągające się za obu końcami płata (il. 27) [5, 19].



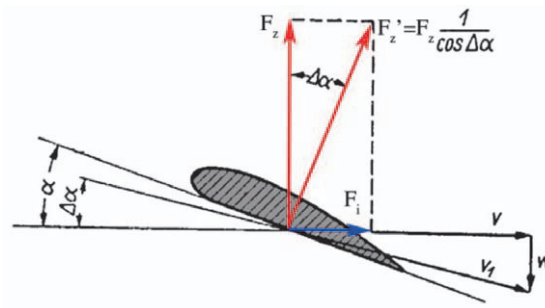
Il. 27. Siła oporu indukcyjnego (opracowanie własne za [5])

Energia niezbędna do wytworzenia tych zawirowań może być dostarczona tylko przez płat, co skutkuje pokonywaniem pewnego oporu. Opór ten powstaje w wyniku różnicy ciśnienia po obu stronach płata, co jest istotą występowania siły nośnej, wobec tego opór ten nazywa się oporem indukcyjnym. Opór indukcyjny jest tym mniejszy, im wydłużenie płata jest większe. W związku z tym płat o nieskończonej długości nie wykazuje oporu indukcyjnego. W celu ilościowej interpretacji zjawiska należy posłużyć się wzorem (33). Poprzeczny ruch powietrza na końcach płata powoduje wystąpienie składowej szybkości pionowej w , skierowanej w dół, w wyniku czego pierwotna szybkość v ulega odchyleniu, a kąt natarcia płata zmniejsza się. Zmianie ulegnie również siła F_z , która przyjmie wartość:

$$F'_z = \frac{F_z}{\cos \Delta\alpha} \quad (33)$$

gdzie: $\Delta\alpha$ – zmiana kąta natarcia.

Zmiana kierunku siły nośnej powoduje wystąpienie w kierunku szybkości v , składowej siły skierowanej przeciwko ruchowi płata F_i , która stanowi właśnie opór indukcyjny [5, 12]. Rozkład sił przedstawiono na ilustracji 28.



Il. 28. Siła oporu indukcyjnego
(opracowanie własne za [5, 30])

Współczynnik oporu indukcyjnego wynosi:

$$c_i = \frac{c_z^2}{\pi\lambda} \quad (34)$$



Na wykresie krzywej biegunowej płata aerodynamiczny współczynnik oporu dynamicznego przedstawia się w postaci paraboli z wierzchołkiem przypadającym w początku układu współrzędnych. Współczynnik ten wynosi zero, gdy współczynnik siły nośnej, a zatem i siła nośna płata jest równa zero. Parabole współczynników oporów indukcyjnych przedstawiono na wykresach krzywych biegunowych wybranych profili na ilustracji 23 [5, 20, 30].

Całkowity współczynnik aerodynamiczny oporu czołowego profilu składa się z dwóch współczynników: po pierwsze z aerodynamicznego współczynnika oporu profilu c'_x , który zawiera tylko siły tarcia i odpowiada za powodowanie wirów przy $\lambda = \infty$, po drugie, ze współczynnika oporu indukcyjnego. Współczynniki oporów indukcyjnych uzyskuje się w sposób doświadczalny łącznie ze współczynnikami oporu profilu. W wyniku odjęcia od współczynników oporu całkowitego oporów indukcyjnych, które można łatwo obliczyć, wyznacza się współczynniki aerodynamiczne oporu profilu płata, który w tym przypadku może być traktowany jako płat niemający końców. W wyniku tego działania krzywa biegunowa przyjmuje kształt bardziej prostopadły do osi odciętych, a kąt największej doskonałości profilu maleje [5].

Chcąc bardziej przybliżyć Państwu tematykę eksploatacji turbin, należałoby w tym miejscu jeszcze wspomnieć o teorii silników wiatrowych, lecz biorąc pod uwagę charakter popularnonaukowy niniejszej pozycji oraz cierpliwość Czytelnika, odsyłamy do bogatej literatury na końcu rozdziału.

Literatura

- [1] M. B. A. Polak, *Porównanie turbin wiatrowych*, „Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2006, s. 147–151.
- [2] G. L. Johnson, *Wind Energy Systems*, Kansas State University 2006, s. 449.
- [3] J. L. Chen et al., *Aerodynamic response analysis of wind turbines*, “Journal of Mechanical Science and Technology” 1 (25), 2010, s. 89–95.
- [4] M. W. Lewandowski, *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa.
- [5] W. Jagodziński, *Silniki wiatrowe*, PWT, Warszawa 1959.
- [6] A. Abłamowicz et al., *Podstawy aerodynamiki i mechaniki lotu*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [7] L. Dragos, *Mathematical Methods in Aerodynamics*, Springer 2010.
- [8] K. Horikiri, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Queen Mary, University of London 2011.

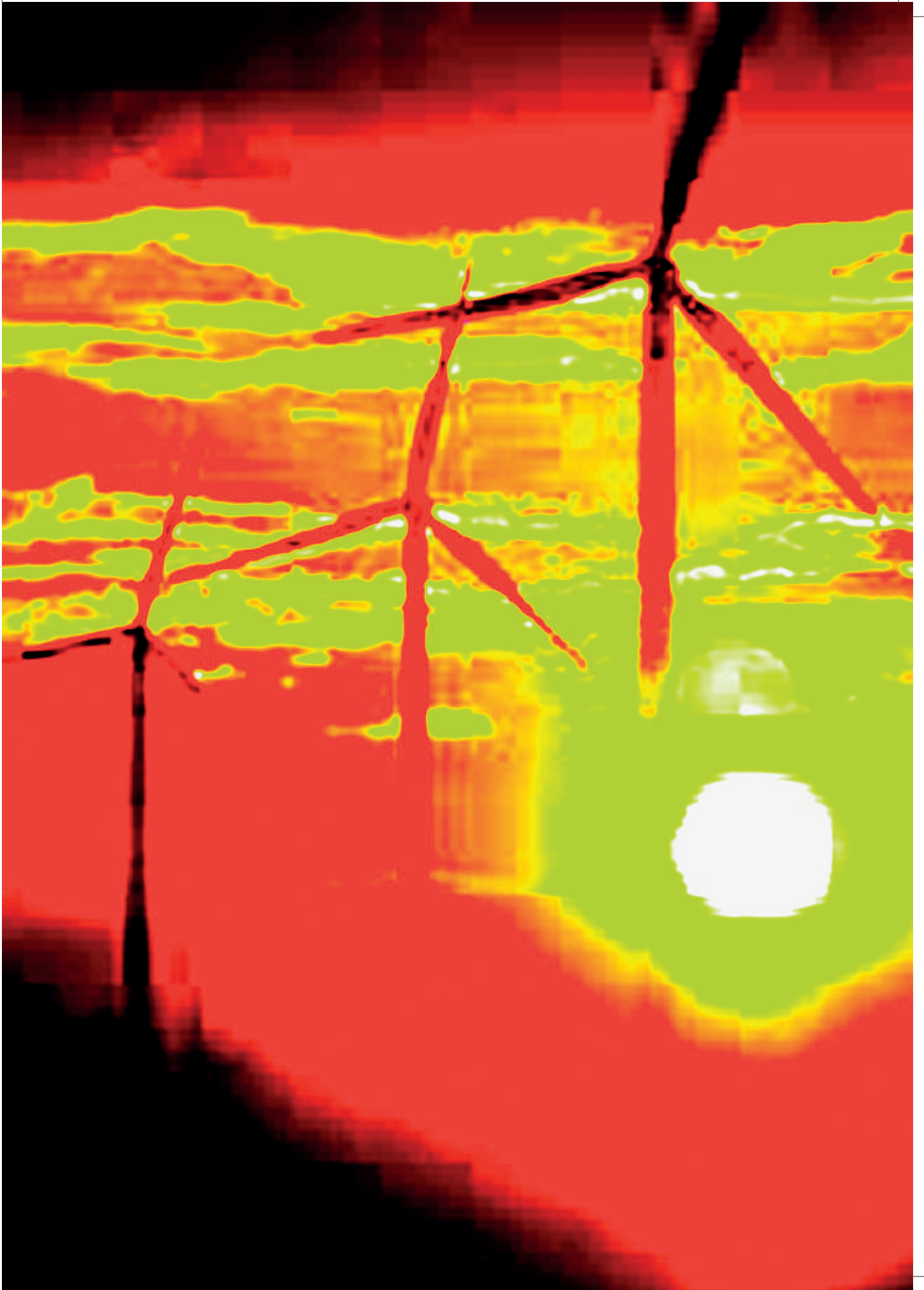


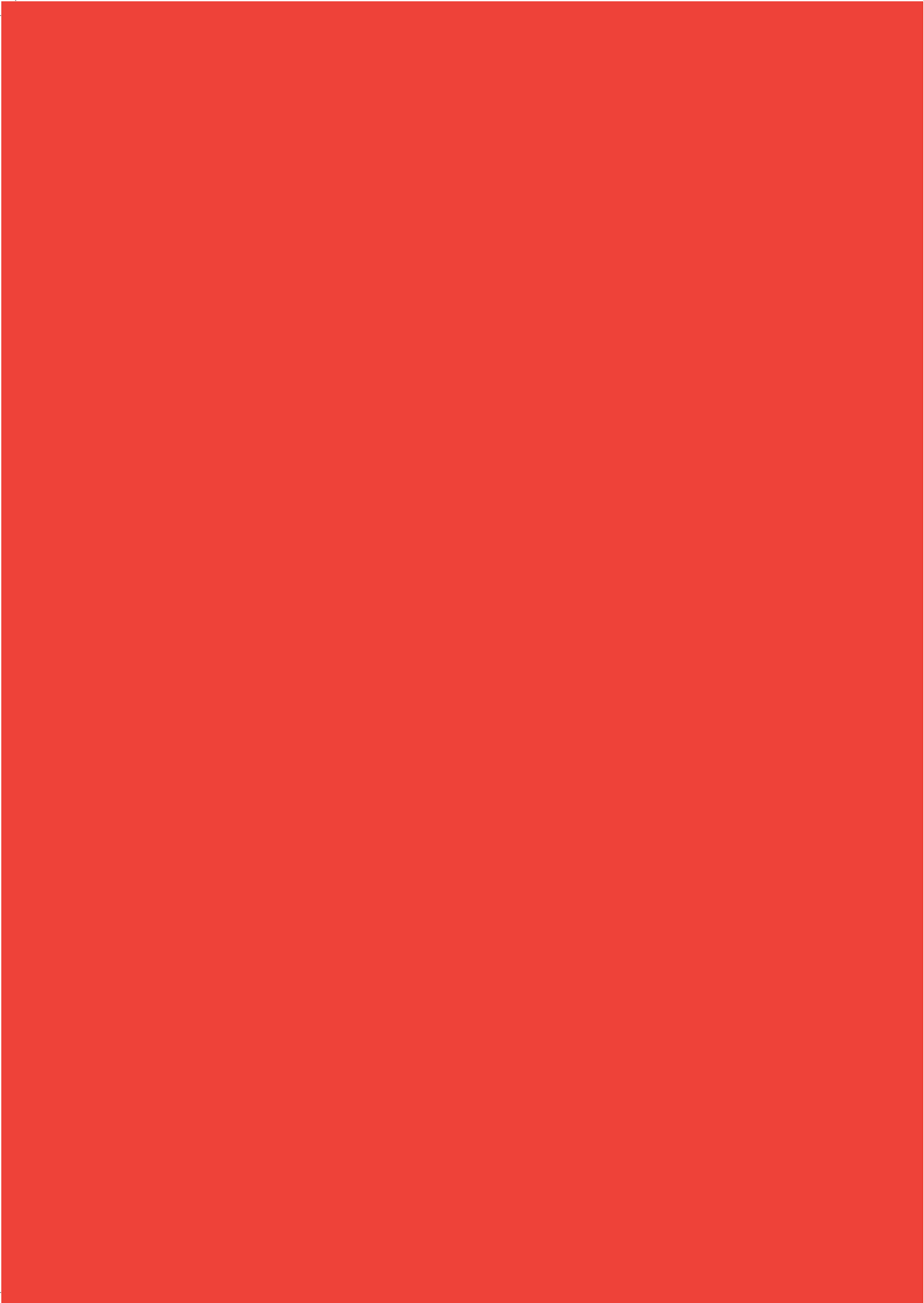
- [9] W. Adamczak, *Możliwości i efektywność przetwarzania energii wiatru*, Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Poznań 2004, s. 69.
- [10] T. Burton et al., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons 2001.
- [11] W. Niestoj, *Profile modeli latających*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [12] A. Mężyk et al., *Optymalizacja wielokryterialna łopat elektrowni wiatrowej ze względu na minimalizację drgań*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [13] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind turbines*, second ed., Eatrhsan, London 2008.
- [14] R. E. Wilson et al., *Applied aerodynamics of wind power machines*, Oregon State University 1974.
- [15] N. A. Zaks, *Podstawy aerodynamiki doświadczalnej*, Wyd. Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1957.
- [16] W. C. Goeij et al., *Implementation of bending torsion coupling in the design of a wind turbine rotor – blade*, "Applied Energy" 63, 1999, s. 191-207.
- [17] W. J. Prosnak, *Wykłady aerodynamiki: Wiadomości podstawowe, hydro- i aerostatyka, elementy hydraulik*, z. 1, Warszawa, 1962.
- [18] N. S. Arżanikow, *Aerodynamika: N. S. Arżanikow i W. N. Malcew* (tłum. J. Rościszewski), PWN, Warszawa 1959.
- [19] J. Rościszewski, *Aerodynamika stosowana*, Wyd. Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1957.
- [20] L. M. Milne-Thomson, *Theoretical Aerodynamics*, Dover Publications 2012.
- [21] R. H. Aungier, *Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis*, ASME Press, Greensburg, 2006.
- [22] J. F. Brouckaert, *Wind turbine aerodynamics: a state-of-the-art*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Sint-Genesius-Rode, 2007.
- [23] P. Uracz et al., *Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej” 59, 2006, s. 8.
- [24] P. Strzelczyk, *Aerodynamika małych prędkości*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [25] M. Sathyajith et al., *Advances in Wind Energy Conversion Technology*, Springer, Berlin, 2001.
- [26] A.S.o.C.E.T.C.o.U. Aerodynamics, *Urban Aerodynamics: Wind Engineering for Urban Planners and Designers*, American Society of Civil Engineers 2011.
- [27] M. Sathyajith, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer, Berlin, 2006.



- [28] P. R. Ebert et al., *Aspects of the Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines*, University of Newcastle, Newcastle 1996.
- [29] [A. V. da Rosa, *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Elsevier Science 2012.](#)
- [30] [Â. I. Levinson et al., *Aerodynamika dużych prędkości*, Wyd. Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1953.](#)
- [31] [E. Hau, et al., *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2013: Springer.](#)
- [32] *Modeling of the UAE Wind turbine for Refinement of FAST_AD*. DIANE Publishing, Golden, 2003.
- [33] V. Nelson, *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment 2nd ed.*, Taylor & Francis, Boca Raton, 2014.
- [34] I. E. Agency et al., *IEA Joint Action, Aerodynamics of Wind Turbines*. International Energy Agency, Lyngby, 1997.









4. Aeroenergetyka w Polsce

4.1. Historia wiatraków w Polsce

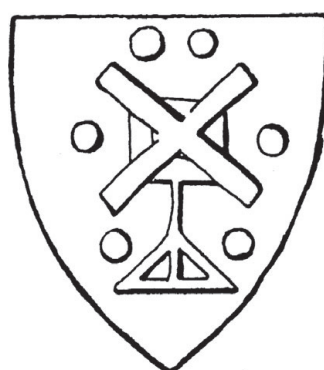
W Polsce coraz częściej spotykamy elektrownie wiatrowe, z których pozyskuje się energię odnawialną. Warto zauważyć, że wiatraki, tyle że drewniane, towarzyszą nam od kilkuset lat. Gloger [1] uważa, że młyny wietrzne przywędrowały do Polski z zachodu, a „kiedy to się stało nikt latami nie określi”. Z kolei za wschodnim pochodzeniem wiatraków opowiadają się Małyszczycy [2], Sackiewicz [3] i Kłaczyński [4]. Wzmianki o młynach wietrznych mówią o kolejnych lokalizacjach, które „postępują” z zachodu na wschód. Ponadto XIV-wieczne wizerunki wiatraków, jakie odnaleziono w Polsce, jednoznacznie określają typ wiatraka o poziomej osi, a zatem typ zachodni.

Pierwsze pisma urzędowe zawierające informacje o gospodarczym wykorzystaniu energii wiatru pochodzą z końca XIII w. Zezwolenie na budowę młynów poruszanych wodą lub powietrzem zostało nadane klasztorowi w Białym Buku przez księcia Wiesława z Rugii [5]. Wymieniony zapis nie może być wprawdzie uznany za świadectwo budowy wiatraka, dowodzi jednak znajomości użycia siły wiatru do poruszania kamieni młyńskich. Jest to dokument, w którym książęta pomorscy nadają klasztorowi cysterek w Szczecinie siedem młynów wodnych i ziemię położoną pomiędzy klasztorem a wiatrakiem [5]. W XIV w. wiatraki „zadomowiły się” w Polsce na dobre [6]. W 1303 r. pracował wiatrak w Kobylinie [5]. Kolejny zapis źródłowy pochodzi ze Wschowa z 1325 r. i dotyczy własności młynów, w tym również wiatraka dla Wschowa. W 1377 r. wydano zezwolenia na budowę dwóch wiatraków w pobliżu Chojnic. W 1394 r. kapituła diecezji pomezkańskiej zezwoliła na wzniesienie wiatraka w Rusinowie pod Kwidzynem, w 1396 r. konwent



malborski wydał zgodę na wzniesienie młyna wietrznego w Świętej Lipce pod Gdańskiem [7].

Z wieku XIV pochodzą również pierwsze w Polsce wizerunki wiatraków. Jeden z nich znajduje się na pieczęci sygnetowej (il. 1) przywieszanej do dokumentu z 1382 r., sama pieczęć może być zatem starsza [1, 8, 9]. Mimo oczywistego schematyzmu, łatwo odróżnić pewne detale konstrukcyjne: skrzydła, sztember i kozły. Nie ulega wątpliwości, że jest to typ zachodni wiatraka o poziomej osi obrotu i pionowo ustawionych skrzydłach.



Il. 1. Wizerunek wiatraka z pieczęci sygnetowej z 1382 r. [1, 8, 9]

W kolejnych wiekach liczba wiatraków systematycznie wzrastała, choć nierównomierne w poszczególnych regionach. W miejscach, gdzie panowały odpowiednie warunki hydrograficzne, dominowały młyny wodne. Wynikało to z ich większej wydajności i niezawodności.

Baranowski [10], analizując XVIII-wieczne dane ilościowe dotyczące młynów na terenie Polski (w obecnych granicach), wydzielił cztery strefy. Pierwsza, o zdecydowanej przewadze wiatraków, obejmowała tereny Wielkopolski, północnego Śląska i Kujaw. Druga strefa, w której wiatraki stanowiły 25–50% wszystkich młynów, to tereny Pomorza Zachodniego, Pomorza Gdańskiego, część Warmii i Mazur, Mazowsza oraz część Śląska. Trzecia strefa, o niewielkiej liczbie wiatraków (10–25%), to tereny wschodniego Mazowsza. W końcu czwarta strefa, gdzie wiatraki były rzadkością (mniej niż 5%) to południowa Małopolska oraz południowa część Śląska.

Największy rozkwit młynarstwa wietrznego w Polsce nastąpił w XIX w. Przyczyniło się do tego wiele korzystnych zarządzeń administracyjnych. We wszystkich zaborach uwłaszczono chłopów, zniesiono przymus mlewa, czyli obowiązku przemiału ziarna przez mieszkańców danej wsi w wyznaczonym młynie. Rozwój



techniczny spowodował, że coraz częściej budowano konkretny wiatrak „na własne potrzeby” danego gospodarstwa rolnego [6, 9].

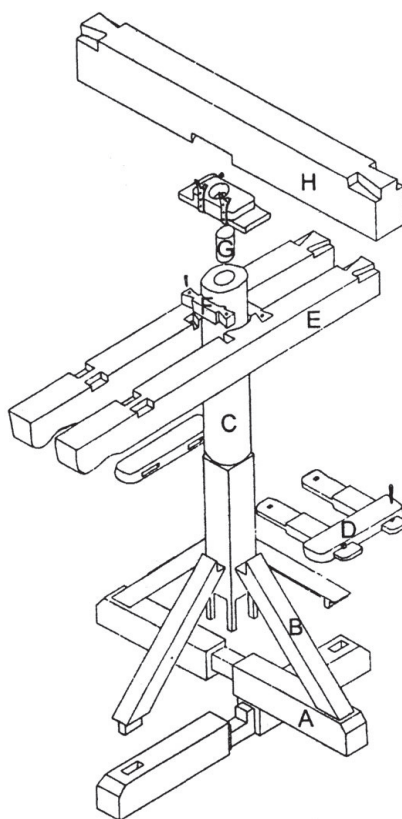
Polskie młynarstwo wietrzne praktycznie przestało istnieć w okresie II wojny światowej. Z ponad 7 tys. pracujących w 1939 r. wiatraków 60% zostało doszczętnie zniszczonych. Pozostałe popadły w ruinę z powodu braku opieki już po wojnie. Pawlik [11] podaje, że w 1954 r. na terenie Polski znajdowało się 3280 wiatraków, z czego tylko 63 zakwalifikowano do dalszej eksploatacji. Nastąpił kres wielowiekowego młynarstwa w Polsce. Obecnie dobrze zachowane wiatraki możemy spotkać głównie w skansenach.

Eksploatowane w Polsce wiatraki mają różne rozwiązania konstrukcyjne. Występujące w całym kraju wiatraki słupowe mają nieruchomą podstawę, w której osadzona jest masywna nieruchoma oś, a na niej obraca się cały budynek młyna. Do tej grupy zalicza się najpowszechniejsze wiatraki koźlaki oraz wiatraki sokólskie [6, 9].

4.1.1. Wiatrak koźlak – budowa i zasada działania

Koźlak (wiatrak koźłowy) jest najstarszym typem wiatraka europejskiego i najpopularniejszym wiatrakiem w Polsce. Pojawił się w XII w. w Belgii lub północnej Francji, jednak jego przodków należy szukać w VII w. w Chinach i Persji. Tak zwany kozioł stanowił specjalną podstawę, podtrzymującą słup stanowiący pionową oś, wokół której obracano całą konstrukcję wiatraka wraz z mechanizmem, po to, aby jego śmigła, zwane też skrzydłami, mogły przyjąć odpowiednie położenie w stosunku do napędzającego je wiatru. Zamiast drewnianego kozła, zwłaszcza od XIX w., stosowano też bardziej wytrzymałe konstrukcje murowane z cegły lub kamienia, a później z betonu. Do obracania wiatraka służył drąg drewniany długości 8–9 m (tzw. łogon lub dyszel) przytwierdzony jednym końcem do belek izbicowych wewnątrz wiatraka, drugim oparty na odpowiedniej podpórcie. Na jego zewnętrznym końcu znajdował się łańcuch przyczepiony do kołowrotu. Kiedy łogon zbliżał się do kołowrotu, przerywano nastawianie, odwijano łańcuch i przenoszono kołowrót na wcześniej przygotowane stanowiska, mogące utrzymać go w miejscu podczas pracy. Czasami zamiast kołowrotu używano koni. Skrzydła napędzane siłą wiatru najczęściej poruszały urządzenia do przemiału zbóż na mąkę. Regulację prędkości obrotowej uzyskiwano, zdejmując (aby zmniejszyć prędkość) lub dokładając (aby zwiększyć prędkość) klepki na skrzydłach. Konstrukcje koźła stanowiły 2 krzyżujące się podwaliny – przyciesie. W miejscu skrzyżowania podwalin, połączonych skomplikowanym złączem krzyżowym, ustawiana była pionowo masywna oś – sztember, zakończona czterema wąsami, które schodzą do dolnej krawędzi podwalin. Sztember wykonany był zazwyczaj z drewna sosnowego, rzadziej dębowego [6, 9].





Il. 2. Konstrukcja nośna wiatraka kozłaka:

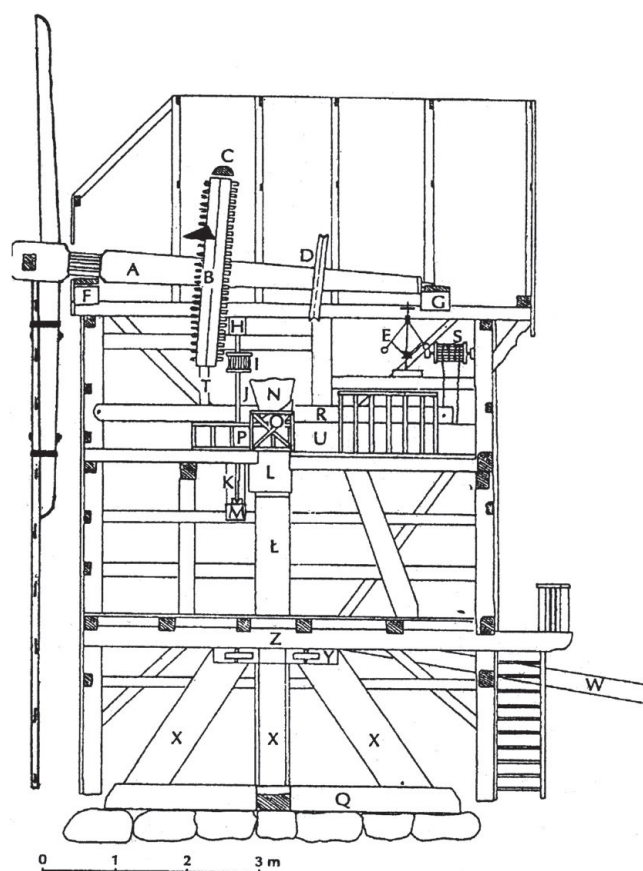
A – podwaliny, B – zastrzały – kozły, C – sztember, D – siodło, E – podjazdy, F – rygle,
G – czop, H – mącznica [9]

U góry sztember opasany był jedną lub dwoma żelaznymi obręczami chroniącymi go przed rozerwaniem. Tam też, pośrodku jego przekroju, znajduje się głębokie gniazdo, w którym tkwi walcowaty cap, wykonany zazwyczaj z twardego drewna grabowego lub dębowego. Sztember podpierają cztery zastrzały – kozły, których dolne końce osadzano w końcach podwalin za pomocą złącza czopowego (il. 2) lub w znak piorunowy. Górne końce zastrzałów osadzone były pomiędzy belkami siodła, stanowiąc jego podstawę. Siodło składa się z 4 płaskich krótkich belek opasujących ściśle sztember, połączonych ze sobą złączami na czop z zatycką klinową [6, 9].

Budynek wiatraka kozłowego ma 4 ściany: „ode drzwi” – wejściową, „odwietrzną” – od strony skrzydeł, „od stawidla” – boczna prawa od strony drzwi oraz „od cylindra” – boczna lewa. Osłonę konstrukcyjną drewnianych ścian stanowią 4 narożne pionowe słupy – „narożniki”, powiązane ze sobą poziomymi ryglami i pio-



nowymi zastrzałami. Wiatraki typu koźlak miały dwie kondygnacje, na których rozstawione były wszystkie mechanizmy. Legary pierwszej kondygnacji ułożone były na podjazdach i ryglach ścian bocznych, drugiej zaś opierały się o mącznicę i rygle ściany wejściowej i odwietrznej. Deski podłogi połączone były ze sobą na wpust i pióro, wpust i obce pióro lub wręgi. Tak solidna konstrukcja zabezpieczała przed przesypywaniem się ziarna lub otrębów, które w trakcie pracy młyna rozsypywały się w niewielkich ilościach na podłogę. Obie kondygnacje połączone były schodami jednobiegunowymi, ustawionymi zawsze przy ścianie od stawidła, czyli z prawej strony drzwi wejściowych (il. 3) [6,9].

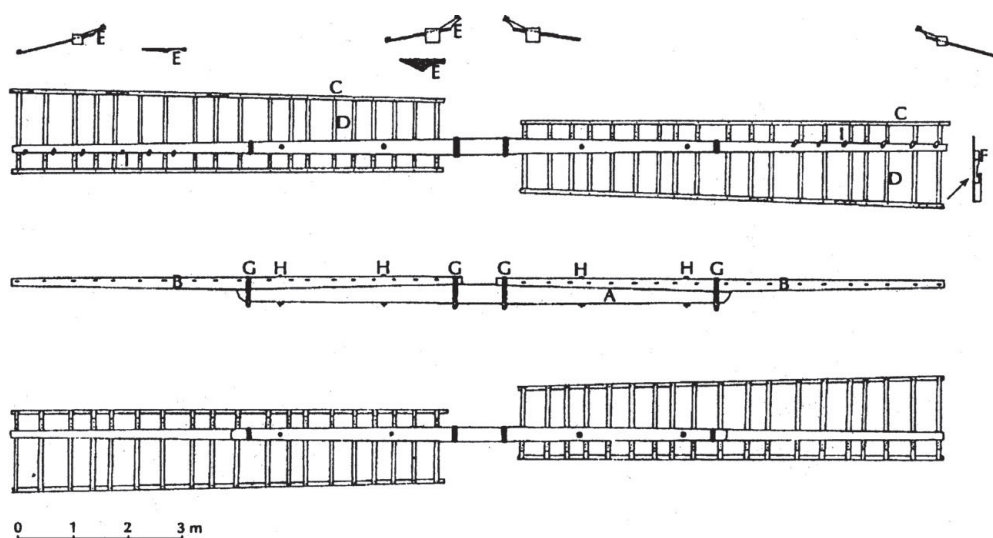


Il. 3. Przekrój poprzeczny wiatraka koźlaka (miejscowość Chrosno):

- A – wał skrzydłowy, B – koło paleczne, C – stawidło, D – koło windy,
 E – regulator rozstawu kamieni, F – podwalnica, G – podwalniczka, H – sztona,
 I – cewie, J – socha, K – wrzeciono, L – mącznica, Ł – sztember, M – podlega,
 N – kosz zasypowy, O – korczyzna, Q – podwalina, P – łubie, R – prasa,
 S – kołowrót hamulca, T – biczysko, U – rygiel mączny, W – dyszel, X – koźły,
 Y – siodło, Z – podjazdy [9]



Mechanizm wiatraka składa się z 3 zespołów: napędowego, transmisyjnego oraz roboczego. Elementy napędu to wał i skrzydła. Wał umieszczony jest lekko ukośnie na drugiej kondygnacji wiatraka; wykonywano go przeważnie z masywnej belki dębowej. W głowicy wału osadzone były skrzydła. Szkielet skrzydła składał się z 2 części: szerszej, zwężającej się ku głowicy, oraz węższej, której szerokość była w zasadzie jednakowa u dołu i przy głowicy. W tej właśnie części na miecze nabijano specjalnie uformowane listwy – knapy, których wysokość rosła ku górze skrzydła, przez co uzyskiwano zmienny kąt nachylenia tej części jej płatu. Na końce mieczy z jednej strony oraz knap z drugiej nabijane były listwy – burnice, tworząc w ten sposób zamknięty szkielet konstrukcji skrzydła (il. 4). Wypełniano go (zapierzano) płochami wykonanymi z cienko dartych deseczek. Płochy zakładane od strony knap nazywano przodkami, od strony mieczy zaś tyłkami. W każdym skrzydle 3 przodki oraz 2 tyłki umocowane były na stałe. Pozostałe dokładano w zależności od siły wiejącego wiatru, mocując je za pomocą drewnianych zaczepków – ząbek z zapinkami lub zastawek (il. 4) [6, 9].



Il. 4. Konstrukcja skrzydeł wiatraka koźlaka:

A – burszytek, B – szpice, C – burnice, D – miecze, E – knapy, F – zapiny,
G – klamry, H – śruby, I – obertelek [9]

Zespół transmisyjny składa się z koła palecznego, koła cewkowego – cewia, osi – sochy, paparzycy oraz wrzeciona. Koło paleczne osadzano pionowo na wale bliżej ściany odwietrznej. Koło składało się z 4 ramion tkwiących jednymi końcami



w wale skrzydłowym, na drugich końcach zaś mocowano przeważnie 3 warstwy pach, które tworzyły obwód koła. W boczną płaszczyznę koła wetknięte były w regularnych odstępach tryby – palce. Koło palczne wykonywano zazwyczaj z drewna dębowego, palce zaś z grabowego. Koło cewkowe – cewie miało formę walca, składającego się z wałeczków tkwiących końcami w krawędziach drewnianych tarcz, opasanych żelaznymi obręczami. Przez środek cewia przechodziła żelazna oś – socha. Górny jej koniec tkwił w gnieździe belki – sztogi, dolny zaś zakończony był 2-, 3-, niekiedy 4-zębnym rozwidleniem obejmującym paparzycę – rozwidloną sztabę żelazną umocowaną w spodzie górnego kamienia młyńskiego. Od spodu paparzyca miała czworokątny otwór – gniazdo, w którym tkwił górny koniec żelaznej osi zwanej wrzecionem. Wrzeciono przechodziło przez otwór w drewnianym pińku, tkwiącym z kolei w otworze – oku spodniego kamienia. Stanowił on rodzaj panewki z dużą ilością smarowidła i szczeciny świńskiej. Dolny koniec wrzeciona spoczywał w łożysku – kachelku ustawionym na belce – podeldze znajdującej się pod słożeniem kamieni. Podnosząc lub opuszczając podelgę, regulowano rozstaw kamieni młyńskich [6, 9].

Kolejnym zespołem mechanizmu wiatraka był zespół roboczy. Składał się z kamieni młyńskich oraz urządzeń zasypowych. Powierzchnie pracujące kamieni miały system nacięć, dzięki którym ziarno było rozprowadzane i rozgniatane całymi ich powierzchniami. Przy obudowie kamieni stawiano stojak – staciwę, na którym mocowano kosz zasypowy, zbity z desek w formie czworokątnego leja. Do kosza wsypywano ziarno przeznaczone na przemiał. Jego równomierny zasyp w oko bieguna w takiej ilości, aby była ona odpowiednia do prędkości obrotów kamienia młyńskiego, uzyskiwano poprzez ustawienie odpowiedniego kąta nachylenia korytka zasypowego – kończyny, znajdującego się pod koszem zasypowym oraz dzięki urządzeniu zwanym żabą. Stanowiła je listewka przymocowana do kończyny i opierająca się o sochę. Obracająca się socha potraçała listwę, powodując wstrząsy kończyny, a co za tym idzie, rytmiczne dozowanie ziarna w oko bieguna. Zmielone ziarno wyrzucane spod kamieni spadało pomiędzy złożenie kamieni a ściany łubia i było przesuwane do otworu pod łubiem i dalej – do pytła, urządzenia sortującego mlewo [6, 9].

Poruszane przez wiatr skrzydła wiatraka powodują obroty wału oraz osadzonego na nim koła palecznego, które zazębia się z kołem cewkowym, przenosząc ruch obrotowy na pionową oś – sochę, której dolny koniec obejmuje paparzycę, umocowaną w wierzchnim kamieniu, powodując jej obrót [6, 9].

Koźlak był w stanie w ciągu 120 do 150 wietrznych dni roku zemleć od 60 do 90 ton ziarna. Cały koźlak zbudowany był z drewna, a z zewnątrz najczęściej pokrywany gontem. Wiatrak koźłowy miał 3 kondygnacje – dolna była zajęta przez stabilizującą konstrukcję koźła, 2 wyższe były przeznaczone do produkcji mąki



(środkowa zawierała kamienie młyńskie). Gontowe ściany początkowo nie sięgały prawie do samej ziemi (ze względu na koszt i ciężar) i odsłaniały widoczny z daleka koziół. Zapewne ten widok dał początek bajkom o „chatce na kurzej łapce”. W opowieściach być może chodziło o zniechęcenie dzieci do zbliżania się do wiatraka, jego skrzydła bowiem były przyczyną wielu śmiertelnych wypadków. Koźlaki pojawiły się na ziemiach polskich już w XIV w., najwcześniej w Wielkopolsce i na Kujawach. W wieku XV były stosowane już powszechnie. Bez większych zmian konstrukcyjnych przetrwały aż do drugiej połowy XX w. [6, 9].

4.1.2. Wiatrak wieżowy – budowa i zasada działania

Budynki wiatraków wieżowych (holendrów) są nieruchome, natomiast dookoła obracają się tylko ich dachy wraz ze skrzydłami. Wiatrak holenderski (wiatrak holender, wiatrak wieżyczkowy) – typ wiatraka charakteryzujący się nieruchomym, masywnym korpusem (zwykle murowanym na planie koła lub wieloboku), na którym umocowana jest obracana na łożysku bryła dachowa ze śmigłami. Pozwalało to łatwiej dostosować śmigła do kierunku wiatru. Powstanie pierwszych pojedynczych wiatraków wieżyczkowych z ruchomą częścią dachową jest datowane na koniec XIV w. Ten typ wiatraka powstał ostatecznie w północnej Holandii. Skonstruował go w XVII w. Jan Andriasz Leeghwater. W roku 1750 „holendry” zostały udoskonalone przez A. Meikle, który na czapie umieścił wiatraczek po przeciwległej stronie w stosunku do dużych skrzydeł. Wiatraczek za pomocą przekładni palecznych (zębatach wykonanych z drewna) regulował samoczynnie ustawienie czapy wraz z dużymi śmigłami w stosunku do wiatru. Czapa poruszała się na żeliwnych rolkach, przesuwających się po żeliwnym pierścieniu, umocowanym na nieruchomej części wiatraka. Szybko zaczęto je stosować w większości krajów europejskich. W XVIII w. rozpowszechniły się w Polsce, ale zyskały popularność tylko na jej zachodnich terytoriach i nigdy nie wyparły tradycyjnych koźlaków [12, 13].

Wnętrze holendra było w porównaniu z koźlakiem przestronniejsze i miało większą powierzchnię użytkową, natomiast liczba kondygnacji wahała się między 3 i 5. Skrzydła osadzone były na poziomym wale skrzydłowym zamocowanym w przestrzeni dachu. Ruch obrotowy tego wału przenoszony był przez koło paleczne na ruch obrotowy pionowego wału przechodzącego przez wszystkie kondygnacje. Pionowy wał obrotowy umieszczony w centralnym punkcie wiatraka umożliwiał dowolne ustawianie maszyn na różnych kondygnacjach. Złożeń kamieni młyńskich mogło być więcej niż w koźlakach i nie musiały się one znajdować na najwyższej kondygnacji. W niektórych holendrach proces przemiału był całkowicie zautomatyzowany: wyposażane były w dodatkowe wirniki (prostopadłe do skrzydeł głównych), umożliwiające automatyczne ustawianie skrzydeł do kierunku wiatru,



a skrzydła były czasami wyposażane w specjalne żaluzje, które zmieniały swoje położenie w zależności od prędkości wiatru [12, 13].

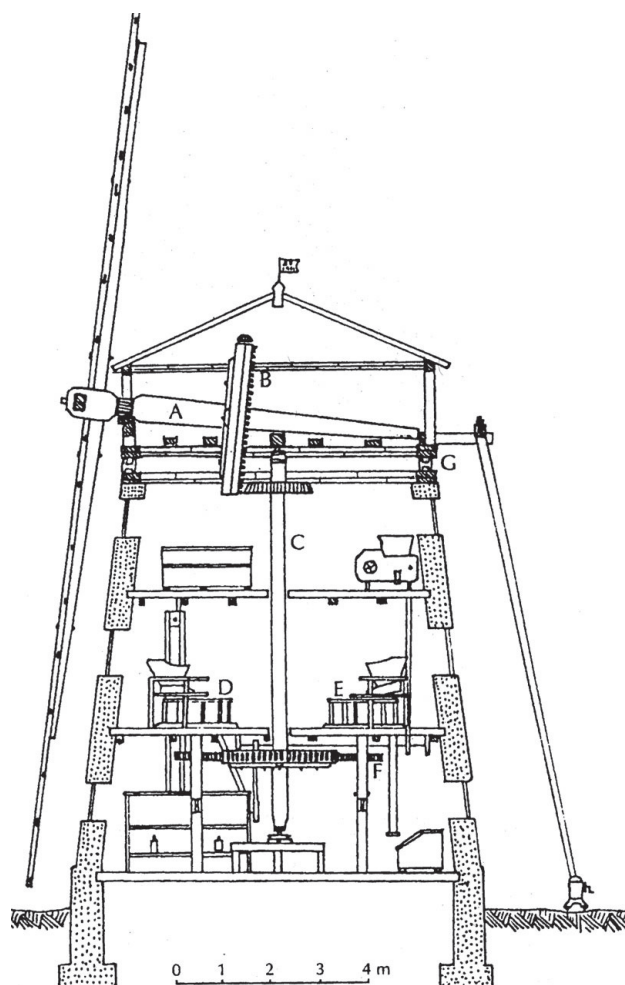
Podobnie jak omówiony wcześniej koźlak, tak i młyn wieżowy miał mechanizm złożony z 3 zespołów: napędowego (skrzydła i wał), roboczego (złożenie kamieni, urządzenia zasypowe) i transmisyjnego. Właśnie zespół transmisyjny zasadniczo różnił się od koźlaka. Palce koła palecznego, umieszczonego na wale skrzydłowym, zazębiały się ze stożkowym kołem zębatym osadzonym na masywnym, drewnianym pionowym wale. Wał ten u góry obracał się w gnieździe znajdującym się w belce zwanej sztogą i przechodził w dół przez trzecią i drugą kondygnację, gdzie znajdowały się złożenia kamieni, oraz przez pierwszą, gdzie osadzony był w łożysku spoczywającym na podłodze (il. 5). Bliżej stropu drugiej kondygnacji, na wale, na 6 ramionach zamontowane było poziome koło zębate o średnicy 2,5 m. Jego palce zazębiały się z trybami osadzonymi na wrzecionach (il. 5). Wrzeciono swoim górnym końcem o przekroju prostokąta tkwiło w paparczyce bieguna, dolnym zaś w ustawionym na podłodze łożysku – kachelku [6, 9].

Wprowadzone przez wiatr w ruch obrotowy skrzydła powodują obroty wału, w którym są osadzone, a tym samym i koła palecznego na nim zamontowanego. Ruch obrotowy koła palecznego poprzez stożkowe koło zębate przeniesiony jest na pionowy wał, ten zaś przekazuje go za pomocą poziomego koła zębatego na tryby osadzone na wrzecionie, powodując ich obroty, a tym samym również obroty górnego kamienia młyńskiego. Zatem ruch obrotowy bieguna powoduje bezpośrednio wrzeciono, a nie socha, jak to jest w przypadku transmisji stosowanej w koźlakach [6, 9].

4.1.3. Wiatrak paltrak – budowa i zasada działania

Wiatraki paltraki zbudowane są na fundamentach w kształcie koła, pośrodku którego osadzono niski pał. Drewniane budynki młynów spoczywają na rusztach belkowych i obracają się całe wokół pała, na rolkach znajdujących się pomiędzy szynami ułożonymi na fundamencie oraz pod spodem wspomnianego rusztowania. Paltrak (podobnie jak koźlak) obracany jest w całości wraz z maszynami na kierunek wiatru. Mechanizm paltraka (maszyna oraz mechanizm obrotu) oraz właściwości mielące (wydajność) są identyczne jak u koźlaka. Paltrak jest jednak konstrukcją solidniejszą i bardziej odporną na silny wiatr. Koźlak podparty jest na jednym słupie, utrzymywanym przez koziół, dlatego stosunkowo łatwo może być wywrócony, a osiowy słup nośny złamany. Paltrak oprócz osi obrotu dodatkowo opiera się na podłożu całym swoim obwodem, wpuszczonym we wzmocnione żelazne zagłębienie fundamentu. Obracanie na wiatr wymaga mniejszego wysiłku, gdyż na obwodzie, pod spodem, znajdują się stalowe rolki i istnieje możliwość ich



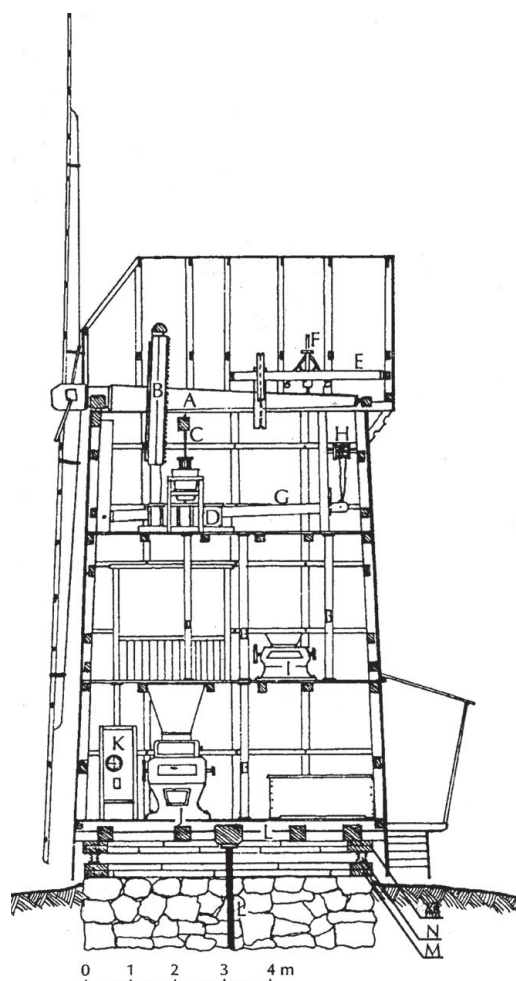


Il. 5. Wiatrak wieżowy (miejscowość Młyny):

- A – wał skrzydlaty, B – koło pałeczne,
- C – pionowy wał ze stożkowym i prostym kołem zębatym,
- D i E – złożenia kamieni, F – wrzeciono z kołem trybowym,
- G – rolki i krążyny [9]

smarowania. W nowszych mechanizmach zamiast dyszla i konia do obracania stosuje się dodatkowy mechanizm wiatrowy, umieszczony po przeciwnej stronie skrzydła roboczego. Na ilustracji 6 przedstawiono przekrój podłużny wiatraka paltraka z miejscowości Orle. Jeśli jesteście Państwo zainteresowani szczegółowymi informacjami na temat młynów wiatrznych, zachęcamy do przeczytania książek Jana Święcha [6, 9].





Il. 6. Wiatrak paltrak (miejscowość Orle):

A – wał podłużny, B – koło paleczne, C – socha i cewie, D – złożenie kamieni,
E – wał windy, F – regulator rozstawu kamieni, G – prasa, H – bęben hamulca,
I – зубownik, J – młewnik walcowy, K – odsiewacz cylindryczny, L – belki rusztu,
Ł – pał, M – krążyny, N – rolki [9]

4.1.4. Inne typy wiatraków drewnianych w Polsce

Odrębnym rodzajem wiatraków spotykanych jedynie w północno-wschodniej części naszego kraju, w okolicach Sokółki (województwo podlaskie), są wiatraki „sokólskie”. Są to obiekty konstrukcją budynków i mechanizmów wewnętrznych zbliżone do koźlaków. Ich cechą charakterystyczną są kamienne fundamenty w kształcie ściętego stożka, stanowiące podstawę [13].



Z kolei wiatraki czerpakowe były urządzeniami odwadniającymi. W Polsce występowały głównie na Żuławach, niestety nie zachował się na tym terenie żaden z nich. Koźlak był najpopularniejszym i najprostszym typem żuławskiego wiatraka odwadniającego. Jego nieduży budynek roboczy, o bryle zbliżonej do sześcianu, był osadzony na drewnianej lub ceglanej podmurówce i obracany do wiatru. Wiatraki czerpakowe stawiano nad kanałami wyposażonymi w odpowiednie śluzy. Rynny śluz były nieco szersze od łopat koła. Tymi rynnami wirujące czerpaki przepychały wodę do sąsiadującego z wiatrakiem wyższego akwenu. W okresach suszy koła wirowały w kierunku odwrotnym [13].

4.2. Wiatraki w kulturze i religii

Młynarze cieszyli się dużym autorytetem na wsi, byli też raczej zamożni. Młyn był nie tylko miejscem świadczenia usług, ale również areną załatwiania różnych interesów. Można wręcz powiedzieć, że młyn był ośrodkiem życia towarzyskiego. Często mawiano, że „tylko ksiądz i młynarz wie, co we wsi dzieje się”. Dobra kondycja ekonomiczna młynarzy sprawiała, że właśnie oni byli często prekursorami we wprowadzaniu nowych narzędzi czy też upraw w swoim gospodarstwie. Stanowili zatem elitę społeczności wiejskiej, co często wiązało się z powierzaniem im różnych funkcji społecznych, np. wójta, sołtysa czy funkcji honorowych [6].

Przedstawiony powyżej obraz wysokiej pozycji społecznej młynarzy wśród mieszkańców wsi kontrastuje zasadniczo z ich oceną w folklorze związanym z młynarstwem. W opowiadaniach, pieśniach, porzekadłach młynarze przedstawiani byli często jako ludzie przebiegli, skąpi, chciwi, często mający kontakt z siłami nieczystymi. Niechęć ta spowodowana była zachłannością niektórych młynarzy. Otóż jeszcze do połowy XIX w. używano w młynach miary objętościowej, co pozwalało łatwo oszukiwać klientów. Brak możliwości zaskarżenia nieuczciwego młynarza znajdował upust w różnego rodzaju porzekadłach, opowiadaniach, bajkach, w których często odnajdujemy motywy długotrwałej pokuty, jaką po śmierci musieli odbywać nieuczciwi młynarze za „złą miarę” [6, 9].

Warto podkreślić, że specyfika uprawianego zawodu stworzyła więź między młynarzami. Przejawiała się ona w wielu momentach życia zawodowego, towarzyskiego i rodzinnego. Wymienić należy szczególnie stosunek do czeladników młynarskich oraz młynarzy najemnych. Odbywali oni wędrówki po młynach, pierwsi doskonaląc swoje umiejętności zawodowe, drudzy w poszukiwaniu pracy. Młynarze podkreślali, że ugoszczenie czeladnika czy też oferującego swoją pomoc młynarza najemnego, zwanego wędrusem, było ich obowiązkiem. Istniejąca konkurencja pomiędzy poszczególnymi młynami nie miała większego wpływu na kontakty między



młynarzami. Spotykali się oni przy różnych okazjach, prowadząc długie rozmowy na tematy zawodowe. Jedną z takich szczególnych okazji było święto ich patrona – św. Marcina z Tours, obchodzone 11 listopada [14]. Druga część uroczystości, obchodzona w karczmie, oprócz ewidentnych walorów towarzyskich pełniła także funkcję matrymonialną. W trakcie biesiady kojarzono wiele małżeństw, uważano bowiem, iż dobór właściwego partnera życiowego pochodzącego z rodziny młynarskiej jest jak najbardziej odpowiedni. Dodatkowo wszyscy młynarze uczestniczyli w obrzędach pogrzebowych zmarłego przedstawiciela ich grupy zawodowej [9].

Atrybut wiatraka – skrzydła były często przyrównywane do krzyża Męki Pańskiej. Również podwaliny koźlaka mają kształt krzyża, którego ramiona dokładnie wyznaczają geograficzne strony świata. Krzyż w symbolice chrześcijańskiej jest znakiem zwycięstwa życia nad śmiercią, ale także nad mocami piekielnymi [15]. Być może te właśnie elementy konstrukcji wiatraka zadecydowały o jego społecznej akceptacji przed wiekami.

O wielkim znaczeniu, jakie miał wiatrak w życiu wsi, świadczy duża liczba bajek, opowiadań, przysłów, zagadek ułożonych przez ówczesnych ludzi na ten temat [16]. Walczył z nimi Don Kichot, stanowiły inspirację dla malarzy, były dominantą krajobrazu wielu wsi, świadcząc o zamożności ludzi i urodzajności ziemi. Chociaż należały – obok młynów wodnych i kuźni – do zespołu zwykłych wiejskich obiektów przemysłowych, to jednak zawsze otaczał je pewien nimb tajemniczości, pobudzający wyobraźnię człowieka. Trudno się zresztą temu dziwić, gdyż wszelkie próby ujarznienia tajemnych sił natury budziły zwykle lęk i obawę przed wymknięciem się ich spod kontroli. Opuszczone, stawały się w mniemaniu okolicznej ludności siedliskiem duchów i upiórów. A później często odchodziły cicho, stopniowo, tracąc skrzydła, dachy, ściany... Aż na wzniesieniach pozostawały tylko upiorne szkielety, rysujące się na tle nieba. Potem słychać było jedynie szum wiatru... [6, 9]

Wiatrakami nazywano też tańce (gwarowo wiatroki) towarzyskie, zespołowe i figurowe w zachodniej Wielkopolsce – rejon Zbąszynia, Nowego Tomyśla i Dąbrówki Wielkopolskiej. Tancerze poruszają się w parach, biegając lub obracając się po obwodzie koła. Inną formą wiatraków jest taniec wykonywany w parze w miejscu – szybkie obroty pary dookoła własnej osi. W rejonie Szamotuł czy Kościana wiatraki stanowią przyspieszone zakończenie jakiegoś tańca, np. wiwatów, kilkoma obrotami w parze [17].

Nadawano również nazwy odnoszące się do wiatraków. W przeszłości położenie miasta Śmigła (wielkopolskie) na wzgórzu stwarzało znakomite warunki do budowy wiatraków. Wiadomo, że w XVI w. było ich co najmniej 6, u schyłku XVIII wieku 52, a w 1936 roku – 16. Budowle te nadawały miastu charakterystyczny wygląd, przez co wyróżniało się ono w krajobrazie okolicy. Można więc przypuszczać, że właśnie „śmigające”, to znaczy obracające się śmigie, czyli skrzydła wiatraków,



dały nazwę miastu [18]. W województwie warmińsko-mazurskim znajduje się wieś Wiatrak, a w województwie kujawsko-pomorskim wieś Mełno¹.

W 1970 r. powstał zespół wokalnoinstrumentalny „Polskie wiatraki”, którego wokalistką była Katarzyna Sobczyk [19]. Poniżej tekst piosenki debiutanckiej *Polskie wiatraki*:

[...] Pośród bezdroży polne drogi,
piasek i osty, biel i zieleń,
schyla się nisko dąb wysoki,
szumią olszyny na niedziele.
Słońcem spalona gdzieś trawa,
cienia wśród drzew szukają ptaki,
tylko, jak w starym wierszu Staffa,
skrzypią drewniane dwa wiatraki.

Wiatraki, polskie wiatraki
progu sięgają nieba,
wiatraki, polskie wiatraki,
których już prawie nie ma,
wiatraki, polskie wiatraki,
których już prawie nie ma!

Jeszcze dźwigają dachy strome,
jeszcze w ich skrzydłach żyje wiatr –
może je rzuci w inne strony,
może je porwie dalej w świat?!
Drzewa jesieni warkocz plotą,
strachy na wróble w polu drzemią,
stoją wiatraki, tak jak dotąd –
pod obłokami, ponad ziemią.
Wiatraki, polskie wiatraki...

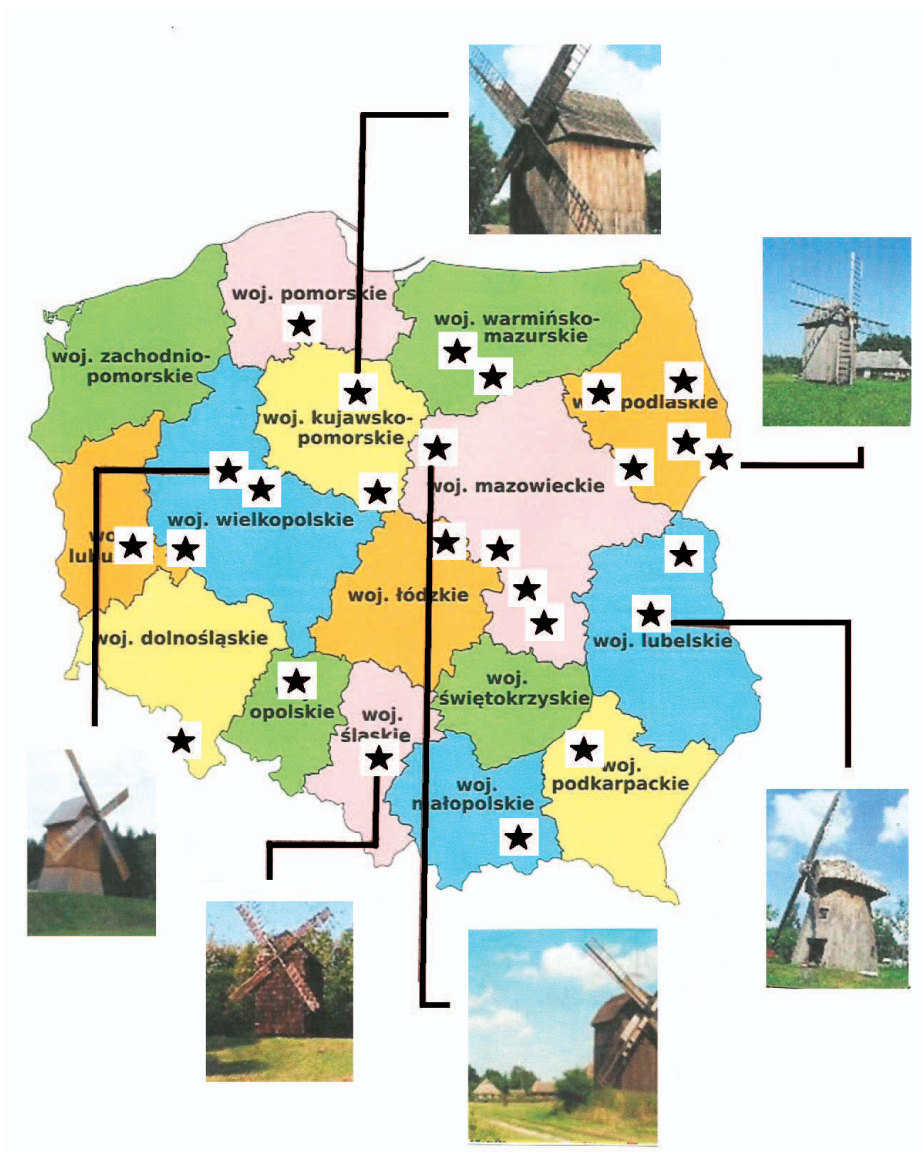
4.3. Skanseny z wiatrakami

Stare wiatraki podupadły, czasem można się jeszcze na nie natknąć w niektórych rejonach Polski. Odrestaurowane, często pracujące (pokazowo) wiatraki możemy spotkać w skansenach (il. 7–8) [20, 21].

Na rysunku 8 przedstawiono wiatrak koźlak znajdujący się w Muzeum Wsi Mazowieckiej w Sierpcu. Wiatrak wybudowany około 1860 r. trafił do skansenu z pobliskiego Zalesia [22].

¹ W Mełnie pracuje biogazownia rolnicza.





Il. 7. Skanseny z wiatrakami w Polsce [20, 21]

Przez wieki, ale również i współcześnie wiatraki są elementem często przedstawianym na obrazach czy w postaci rzeźb. Na ilustracji 9 przedstawiono figurkę wiatraka, wchodzącą w skład ekspozycji wystawowej w Muzeum Wsi Mazowieckiej w Sierpcu (lato 2012 r.).





Il. 8. Wiatrak koźlak w Muzeum Wsi Mazowieckiej w Sierpcu (fot. B. Igliński)



Il. 9. Figurka wiatraka w Muzeum Wsi Mazowieckiej w Sierpcu (fot. B. Igliński)



4.4. Warunki wietrzne

Energetyka wiatrowa jest młodą gałęzią energetyki w Polsce. Pierwsze opracowania na temat wykorzystania wiatru jako źródła energii w naszym kraju to lata 80. XX w. [23, 24]. Pierwszą szeroką ekspertyzą na temat zasobów aeroenergetyki w Polsce jest praca Haliny Lorenc z 1996 r. [25]. Do analizy statystycznej wykorzystano obserwacje średnich 10-minutowych prędkości wiatru, wykonywane na stacjach meteorologicznych 8 razy na dobę, z okresu 1966–1990.

Lorenc [25] przyjęła, że energia kinetyczna E , z jaką strumień powietrza o prędkości v działa na powierzchnię F prostopadłą do niego, wynosi:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1)$$

gdzie: m – masa powietrza [kg], v – prędkość [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], przy czym:

$$m = \rho F v \quad (2)$$

gdzie ρ – gęstość powietrza [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Ponieważ m oznacza masę powietrza przepływającego przez przekrój poprzeczny F w ciągu 1 s, więc energia kinetyczna E jest równa mocy N strumienia powietrza. Z zależności (1) i (2) otrzymuje się wzór określający moc N powietrza przepływającego przez powierzchnię F :

$$N = \frac{\rho F v^3}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] \quad (3)$$

Moc strumienia przypadającego na jednostkę powierzchni prostopadłej do jego kierunku wynosi:

$$\frac{N}{F} = \frac{\rho v^3}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}] \quad (4)$$

Mnożąc tę wielkość przez czas trwania t odpowiedniej prędkości wiatru, otrzymuje się wzór do obliczenia energii na jednostkę powierzchni:

$$E = \frac{\rho v^3 t}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$



Ponieważ energię wyraża się zazwyczaj w kilowatogodzinach, po odpowiednim przeliczeniu otrzymujemy następujący wzór określający energię brutto, czyli energię, jaką niesie strumień powietrza w całym zakresie możliwych prędkości wiatru występujących w czasie t :

$$E = \frac{\rho v^3 t}{2} 2,778 \cdot 10^{-7} \quad [\text{kWh}] \quad (6)$$

Gęstość powietrza ρ obliczano dla każdej uwzględnionej stacji meteorologicznej w zależności od średniej rocznej temperatury powietrza i ciśnienia atmosferycznego na poziomie stacji za okres 1966–1990.

Ażeby określić wydajność elektrowni wiatrowej, należy znać powierzchnię jej skrzydeł, którą oblicza się według poniższego wzoru:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (7)$$

gdzie: A – powierzchnia skrzydeł siłowni, D – średnica wirnika [m].

Znając powierzchnię skrzydeł, można w prosty sposób obliczyć wydajność energetyczną siłowni:

$$E_s = EA \quad [\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (8)$$

W tabeli 1 przedstawiono energię użyteczną wiatru [kWh] na wysokości 10 i 30 m nad powierzchnią gruntu o klasie szorstkości terenu „0” uzyskaną z 1 m² skrzydeł siłowni w ciągu roku. Przyjęto, że użyteczna energia wiatru wynosi co najmniej 4 m·s⁻¹.

„Uprzywilejowanymi” rejonami kraju pod względem zasobów energii wiatrowej są:

- Wybrzeże Środkowe, najbardziej wysunięte na północ części wybrzeża od Koszalina po Hel oraz wyspa Uznam,
- Suwalszczyzna,
- Środkowa Wielkopolska i Mazowsze,
- Beskid Śląski i Żywiecki,
- Bieszczady i Pogórze Dynowskie.

Kompleksowe badania wskazują, że najbardziej wietrzną porą roku w Polsce jest zima, a najmniej lato. Dobowe przebiegi prędkości wiatru cechują się wyraźnym rozkładem jednomodalnym z maksimum prędkości w godzinach okołopołudniowych na stacjach zlokalizowanych w głębi kraju. Z kolei w regionach przybrzeżnych dobowe krzywe prędkości mają dużo mniejszą amplitudę, co potwierdza teorię o różnej dobowej strukturze prędkości wiatru nad lądem i nad akwenami [25].



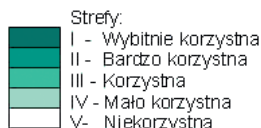
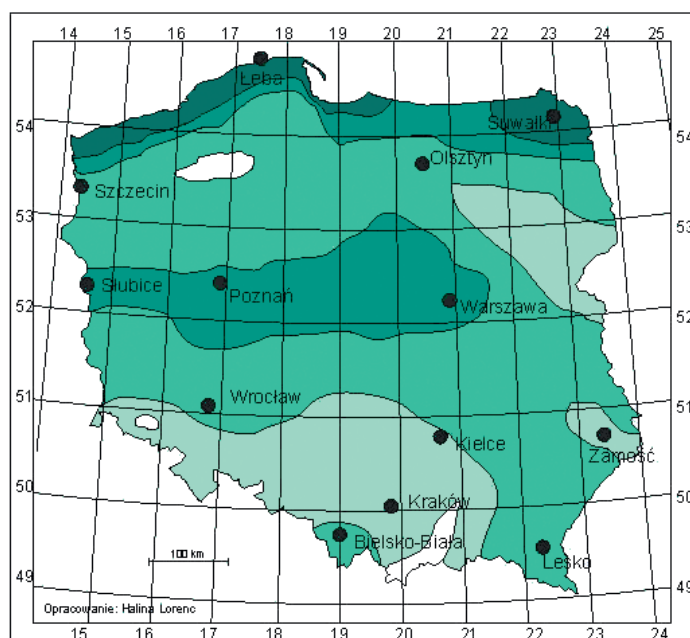
Tab. 1. Energia użyteczna wiatru [kWh] dla wybranych miejscowości w Polsce [25]

Miejscowość	$h=10$ m	$h=30$ m	Miejscowość	$h=10$ m	$h=30$ m
Białystok	394,6	646,7	Olsztyn	368,0	603,1
Bielsko-Biała	806,4	1 321,7	Opole	402,6	659,9
Chojnice	597,0	978,4	Ostrołęka	363,9	596,4
Częstochowa	523,7	858,7	Poznań	876,7	1 152,5
Elbląg	646,1	1 058,9	Przemyśl	703,2	1 152,5
Gorzów Wlkp.	650,1	1 065,5	Racibórz	326,3	534,8
Hel	1 581,9	2 592,7	Rzeszów	841,3	1 378,9
Jelenia Góra	438,1	718	Sandomierz	562,5	921,9
Kalisz	561,4	920,1	Siedlce	618,5	1 013,7
Katowice	331,6	543,5	Sulejów	663,8	1 088,0
Kętrzyn	624,4	1 023,4	Słubice	481,1	791,8
Kielce	290,6	476,3	Suwałki	989,4	1 621,6
Kłodzko	488	799,8	Szczecin	660,0	1 081,7
Koło	717,9	1 176,6	Szczecinek	551,5	903,9
Kołobrzeg	706,9	1 158,6	Świnoujście	1 043,0	1 709,5
Koszalin	1 049,9	1 720,8	Tarnów	313,2	513,3
Kraków	403,4	661,2	Terespol	404,0	662,2
Legnica	419,2	687,1	Toruń	637,4	1 044,7
Lesko	713,4	1 169,3	Ustka	1 112,1	1 822,9
Leszno	482,4	790,6	Warszawa	878,0	1 439,0
Lublin	385,9	632,5	Wieluń	672,4	1 102,1
Łeba	1 439,8	2 359,8	Włodawa	570,0	934,2
Łódź	787,0	1 289,9	Wrocław	420,5	689,2
Mikołajki	389,6	638,6	Zamość	415,5	681,0
Mława	869,7	1 425,4	Zielona Góra	640,2	1 049,3
Nowy Sącz	245,9	403,1			



Strefy energetyczne wiatru w Polsce

Mezoskala



Ośrodek
Meteorologii



Aktualizacja mapy na podstawie okresu obserwacyjnego 1971-2000

Il. 10. Strefy energetyczne wiatru w Polsce [26]

Analiza przestrzenna pola prędkości wiatru pozwala stwierdzić, że udział ciszy w bilansie wszystkich prędkości wiatru wynosi 2–5% w rejonie wybrzeża, około 5% w Polsce środkowej i 20–50% w rejonie wielkich kotlin śródgórskich. Udział wiatru o prędkości co najmniej $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przekracza 50% czasu w skali rocznej na wybrzeżu oraz na obszarze nizinnej części Polski. Właśnie tam są najlepsze warunki do rozwoju aeroenergetyki.

Najnowsze dokumenty przedstawiające warunki wietrzne w Polsce zwykle znacząco różnią się między sobą i budzą liczne kontrowersje, zwłaszcza w odniesieniu do oceny zasobów energii wiatru w Polsce południowej, które często nie są doceniane albo prezentowane w oderwaniu od stanu rozwoju techniki i realiów ekonomicznych oraz inwestycyjnych.



Dostępne pomiary i analizy wskazują, że najwyższe prędkości wiatru w naszym kraju występują na wybrzeżu Bałtyku oraz na Suwalszczyźnie. Dodatkowo obszary o podwyższonych prędkościach wiatru to tzw. tereny o złożonej topografii, gdzie prędkość wiatru wzrasta na skutek uwarunkowań lokalnych – dotyczy to głównie strefy wzgórz i dolin właśnie Polski południowej. Rozwój technologii turbin przeznaczonych na tereny o niskiej prędkości wiatru spowodował, że obecnie na większości obszarów w Polsce możliwe jest wykorzystanie energii wiatru w sposób opłacalny, pod warunkiem właściwego doboru turbiny do lokalizacji [26].

Na rysunku 10 przedstawiono strefy energetyczne wiatru w Polsce. Wybitnie korzystne i bardzo korzystne warunki do pozyskiwania energii z wiatru występują w północnej oraz w centralnej Polsce [26].

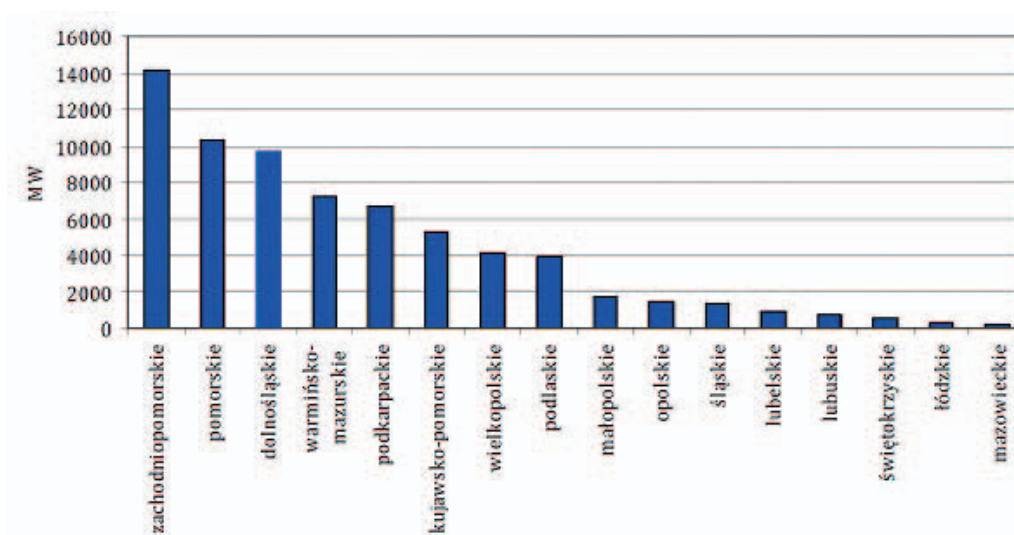
4.5. Potencjał aeroenergetyki

Potencjał techniczny energii wiatru wiąże się przede wszystkim z przestrzennym rozmieszczeniem terenów otwartych (o niskiej szorstkości podłoża i bez obiektów zaburzających przepływ powietrza). Obszary takie to w przeważającej mierze tereny użytków rolnych, których w Polsce jest 18 mln hektarów, co stanowi około 59% powierzchni kraju. Uwzględniając rozwój technologii turbin wiatrowych przeznaczonych na tereny o niskiej prędkości wiatru, można stwierdzić, że około 5% terenów rolnych w Polsce nadaje się do technicznego wykorzystania na potrzeby energetyki wiatrowej [27].

Istotnym ograniczeniem przestrzennym dla rozwoju energetyki wiatrowej, a w szczególności lądowych farm wiatrowych, jest występowanie i powiększanie się obszarów chronionych, w tym terenów należących do obszaru NATURA 2000. Należy podkreślić, że fakt, iż dany teren podlega pewnej formie ochrony obszarowej nie wyklucza w sposób jednoznaczny lokalizacji elektrowni wiatrowych; ostateczne decyzje zależą od władz lokalnych i regionalnych i powinny być podejmowane po analizie ewentualnych konfliktów środowiskowych wywołanych przez konkretny projekt. W opracowaniu [27] przyjęto ostre kryterium, iż z rozwoju energetyki wiatrowej wykluczone zostaną wszystkie tereny podlegające ochronie. Ponadto wprowadzono kolejne wykluczenia – to obszary otulin terenów chronionych oraz tereny gęsto zaludnione. W rezultacie stwierdzono, że na 50% powierzchni użytków rolnych, gdzie jest możliwe wykorzystanie energetyki wiatrowej, inwestycje w praktyce nie będą mogły być realizowane lub napotkają znaczące utrudnienia. Najwięcej ograniczeń występuje w północnej i południowej części kraju, co wynika z jednej strony z pokrywania się obszarów o wysokiej prędkości wiatru z obszarami podlegającymi ochronie (małopolskie, warmińsko-mazurskie, świętokrzyskie),



z drugiej zaś z rozdrobnienia gospodarstw rolnych i trudności w lokalizacji turbin, związanych z rozproszoną zabudową siedliskową (np. podkarpackie). Szczególnym przypadkiem jest województwo dolnośląskie, gdzie pomimo że ogólny udział terenów chronionych w powierzchni użytków rolnych utrzymuje się na względnie niskim poziomie, to jednak utrudnienia lokalizacyjne są bardzo znaczące. Region ten charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem warunków wiatrowych – są one najlepsze w południowej części województwa (wzgórza), jednak właśnie te tereny często podlegają różnym formom ochrony obszarowej. Ilustracja 11 przedstawia potencjał ekonomiczny energetyki wiatrowej w Polsce, z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych, opracowany przez Instytut Energetyki Odnawialnej [27].



Il. 11. Potencjał ekonomiczny energetyki wiatrowej w Polsce, z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych [27]

Wykorzystanie potencjału ekonomicznego zależy od uwarunkowań rynkowych i polityki wyznaczającej ich ramy. W procesie inwestycyjnym, na etapie wyboru lokalizacji, duże znaczenie ma udział największych gospodarstw rolnych w strukturze własności gruntów w regionie. Oznacza to mniejsze trudności w pozyskaniu praw do gruntu oraz konieczność negocjacji z mniejszą liczbą zainteresowanych stron (średnio w Polsce największe gospodarstwa stanowią 1,1%). Oszacowanie potencjału rynkowego nie uwzględnia ograniczeń infrastrukturalnych, gdyż są one, w odróżnieniu do innych czynników, możliwe do usunięcia w horyzoncie czasowym 10–20 lat i są zależne od uwarunkowań ekonomicznych i politycznych [27].



Oszacowanie potencjału rynkowego (możliwej do wykorzystania w określonym horyzoncie czasowym części potencjału ekonomicznego) jest trudne i wymaga złożonego modelowania makroekonomicznego. Najbardziej efektywnym scenariuszem byłaby kontynuacja obecnego rozkładu regionalnego realizacji inwestycji wielkoskalowych, wyposażonych w nowe turbiny wiatrowe, przy założeniu ograniczenia wsparcia dla inwestycji w turbiny używane i preferencji dla inwestycji o najlepszych wynikach ekonomicznych. W takiej sytuacji ulega wyhamowaniu rozwój rynku na obszarach o mniejszym potencjale, a województwa znajdujące się obecnie na pozycji liderów w rankingu instalacji nowoczesnych turbin mogą zdominować rynek do roku 2020. W województwach o dużym, aczkolwiek niewykorzystanym dotąd potencjale, należy spodziewać się bardzo powolnego przełamywania barier blokujących inwestycje i rozwoju dopiero po roku 2020 [27].

Biorąc pod uwagę obecne uwarunkowania rynkowe i polityczne, do roku 2020 najwięcej turbin wiatrowych powinno zostać zlokalizowanych w województwach: zachodniopomorskim, pomorskim, wielkopolskim, kujawsko-pomorskim i podlaskim. Rozwój technologii wiatrowej oraz upowszechnienie się turbin przeznaczonych na tereny o niższej prędkości wiatru może spowodować, że możliwe stanie się wykorzystanie nowych terenów – wzrośnie wówczas atrakcyjność województw Polski centralnej i wschodniej [27].

Polska, ze względu na długość linii brzegowej oraz obszar morza terytorialnego i wyłączonej strefy ekonomicznej, ma jeden z największych potencjałów technicznych morskiej energetyki wiatrowej na Bałtyku. Potencjał ten jest jednak znacznie ograniczony przez uwarunkowania środowiskowe oraz intensywne użytkowanie przestrzeni morskiej na cele gospodarcze. Instytut Morski w Gdańsku podjął próbę zidentyfikowania obszarów, które mogłyby być wykorzystane na potrzeby morskiej energetyki wiatrowej. Z energetycznego wykorzystania wykluczono obszary:

- zwyczajowych szlaków morskich i możliwych utrudnień nawigacyjnych,
- wykorzystywane na cele militarne,
- podlegające ochronie obszarowej ze względów środowiskowych (NATURA 2000, ochrona brzegów),
- wykorzystywane na cele rybołówstwa.

Wymienione obostrzenia powodują, że istnieje konieczność budowy farm wiatrowych poza morzem terytorialnym. Całkowita powierzchnia terenów, na których można zlokalizować morskie farmy wiatrowe, została określona przez Instytut Morski na 3590 km², co odpowiada potencjałowi rzędu 35 GW. Tereny na Ławicy Środkowej, jako odległe o ponad 80 km, mogą zostać wykorzystane dopiero w dalszej perspektywie czasowej. Do roku 2020 najbardziej prawdopodobne jest wykorzystanie lokalizacji po wschodniej stronie Ławicy Słupskiej [28].



Tab. 2. Potencjał energetyki wiatrowej w Polsce [27]

Potencjał	Na lądzie		Na morzu	
	moc [GW]	energia [TWh]	moc [GW]	energia [TWh]
Teoretyczny	3 100	6 830	130	380
Techniczny	1 400	3 600	130	380
Techniczny z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych	600	1 500	20	60
Ekonomiczny	82	210	7,5	22,5
Rynkowy 2020	11,5	28	1,5	4,5

Analizując dane w tabeli 2, należy stwierdzić, że realny potencjał rynkowy energetyki wiatrowej w Polsce do roku 2020 wynosi około 11,5 GW lądowej energetyki wiatrowej oraz 1,5 GW morskiej energetyki wiatrowej. Są to wartości znacznie wyższe od zakładanych w polskim KPD, który przewiduje jedynie 6,15 GW lądowej energetyki wiatrowej oraz 0,5 GW morskiej energetyki wiatrowej [27].

Wyniki modeli makroekonomicznych [29] wskazują, że dzięki wsparciu dla energetyki odnawialnej do roku 2020 oraz poprawie efektywności wytwarzania i użytkowania energii, moce wytwórcze w OZE (odnawialne źródła energii) mogą sięgnąć 83 GW w 2050 r. Scenariusz ten przewiduje największy przyrost i udział mocy zainstalowanych właśnie dla aeroenergetyki (ponad 40 GW lądowych farm wiatrowych w 2050 r.), a to ze względu na fakt, że jest to technologia już obecnie dojrzała rynkowo. Udział elektrowni wiatrowych w produkcji energii elektrycznej wzrośnie do 44,8% w 2030 r. oraz do 66% w 2050 r. Ze względu na długi okres niezbędny do przygotowania i realizacji inwestycji, dopiero po 2020 r. można spodziewać się znaczącego rozwoju morskich farm wiatrowych.

W strukturze kosztów inwestycyjnych morskich farm wiatrowych dominują nakłady na turbiny, fundamenty oraz przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. W przypadku polskich morskich farm można spodziewać się niższych kosztów fundamentowania oraz przyłączenia do sieci elektroenergetycznej, a to ze względu na mniejszą głębokość i odległość od lądu. Dodatkowo wprowadzanie nowych technologii i efekt skali pozwoli obniżyć koszty inwestycyjne o 28% w 2020 r. i o 43% w 2040 r. w stosunku do aktualnych kosztów [30].

Na obecnym etapie koncepcji pierwszej morskiej farmy wiatrowej założono, że najlepszym rozwiązaniem przyłączenia jej do krajowego systemu elektroenergetycznego jest wprowadzenie mocy do 2 stacji 400 kV:



- 2850 MW do stacji Żarnowiec lub Lubiatowo (wcięcie do nowej dwutorowej linii 400 kV Żarnowiec–Słupsk),
- 2850 MW do stacji Słupsk.

Proponowane wyprowadzenie mocy z farmy wiatrowej nie będzie wymagało rozbudowy krajowego systemu elektroenergetycznego ponad inwestycje konieczne w przypadku planowanego w tym samym czasie przyłączenia 3 GW-ej elektrowni jądrowej. „Moc” z farmy wiatrowej może być przekazywana do krajowego systemu przesyłowego liniami kablowymi 400 kV prądu przemiennego. Oznacza to konieczność wybudowania przynajmniej 6 linii kablowych 400 kV, każda o zdolności przesyłowej 1 GW. Należy zwrócić uwagę, że długość linii kablowej 400 kV prądu przemiennego, wynosząca 40 km, stanowi ekonomiczną granicę opłacalności przesyłu mocy. Dlatego też można przeanalizować możliwość wyprowadzenia mocy z farmy wiatrowej 400 kV prądu stałego. W Polsce brakuje doświadczeń w budowie linii prądu stałego HVDC, stąd trudno obecnie określić, czy takie rozwiązanie będzie możliwe do roku 2020, choć z perspektywy budowy kolejnych morskich farm wiatrowych i zakładanej budowy elektrowni jądrowej byłoby to zasadne [30].

Koszty eksploatacyjne morskich farm wiatrowych są wyższe niż farm lądowych o około 25–30% i wynoszą około 25 euro/MWh. Przewiduje się, że koszt ten będzie malał wraz z rozwojem morskiej energetyki wiatrowej i powinien osiągnąć poziom 18 euro/MWh w 2020 r. Obniżenie kosztów spowodowane będzie głównie rozwojem bazy serwisowej i wzrostem podaży usług w tym zakresie [30].

Morska energetyka wiatrowa tworzy więcej miejsc pracy niż energetyka wiatrowa lądowa i wywiera silniejszy wpływ na rozwój regionów oraz niektórych gałęzi przemysłu. Szacuje się, że po 2020 r. w Polsce w sektorze morskiej energetyki wiatrowej zatrudnienie będzie mogło znaleźć około 10 tys. osób, z czego większość z tych miejsc pracy można uznać za stałe. Polskie firmy mogą z powodzeniem operować na rynku produkcji podzespołów dla sektora morskiej energetyki wiatrowej. Przy czym ich głównym atutem jest nie tylko jakość, ale i dogodna lokalizacja zakładów produkcyjnych w zakresie dostaw, co daje im dużą przewagę w stosunku do konkurencyjnych firm azjatyckich. Nakłady poniesione w procesie budowy turbin oraz ich transportu w miejsce przeznaczenia stanowią połowę wszystkich kosztów inwestycyjnych. Najbardziej korzystne wydaje się więc budowanie nowych bądź adaptowanie starych zakładów do produkcji komponentów wiatraka na terenach portowych, możliwie najbliżej farmy [30].

Wśród gałęzi przemysłu, które mogą stać się największym beneficjentem rozwoju morskiej energetyki wiatrowej, należy przede wszystkim wymienić przemysł stoczniowy i elektromaszynowy. Morska energetyka wiatrowa charakteryzuje się znacznym popytem na specjalistyczne usługi stoczniowe w zakresie budowy jednostek do transportu, montażu i serwisowania morskich turbin wiatrowych [30].



4.6. Aeroenergetyka w Polsce – stan obecny

Energetyka wiatrowa jest tym rodzajem OZE, który w ostatnich latach rozwija się najszybciej w kraju. Według danych URE na koniec 2011 r. na terenie Polski łączna moc siłowni wiatrowych wynosiła 1616 MW. Wyprodukowano 3088 GWh energii elektrycznej. Pod koniec 2013 r. pracowało w Polsce 835 siłowni wiatrowych o łącznej mocy 3080 MW, co daje blisko 2-krotny wzrost mocy [31]. Według „Krajowego planu działania w zakresie odnawialnych źródeł energii (KPD)” [32] aeroenergetyka ma odegrać główną rolę w realizacji 15% celu OZE w finalnym zużyciu energii w 2020 r. (z udziałem sięgającym 13%). Warto zwrócić uwagę, że zgodnie z propozycją KPD, dalszy rozwój dotychczas wiodącej w aeroenergetyce produkcji energii w lądowych farmach wiatrowych, uzupełniony zostanie szybkim rozwojem małej energetyki wiatrowej oraz morskiej energetyki wiatrowej.

Tab. 3. Moc i liczba instalacji aeroenergetycznych w poszczególnych województwach [31]

Województwo	Liczba instalacji ²	Łączna moc [MW]	Udział mocy [%]
dolnośląskie	9	157,4	4,6
kujawsko-pomorskie	226	306,7	9,0
lubelskie	5	2,1	0,1
lubuskie	7	56,6	1,7
łódzkie	178	313,2	9,2
małopolskie	11	3,0	0,1
mazowieckie	64	155,7	4,6
opolskie	8	96,2	2,8
podkarpackie	25	84,2	2,5
podlaskie	20	122,7	3,6
pomorskie	36	384,4	11,3
śląskie	17	12,8	0,4
świętokrzyskie	15	7,8	0,2
warmińsko-mazurskie	26	217,1	6,4
wielkopolskie	130	430,5	12,7
zachodniopomorskie	58	1 045,3	30,8
Polska	835	3 395,7	100

² Pod pojęciem „instalacji” rozumie się obiekt na danym obszarze, może to być zarówno pojedynczy wiatrak, jak i farma.



Analizując dane w tabeli 3, należy stwierdzić, że aeroenergetyka silnie rozwija się w województwach: kujawsko-pomorskim (306,7 MW), łódzkim (313,2 MW), pomorskim (384,4 MW), wielkopolskim (430,5 MW) i przede wszystkim zachodniopomorskim (1045,3 MW), natomiast praktycznie w ogóle się nie rozwija w województwach: lubelskim (2,1 MW), małopolskim (3,0 MW) oraz świętokrzyskim (7,8 MW).

W tabeli 4 przedstawiono charakterystykę farm wiatrowych w Polsce [33].

Tab. 4. Przemysłowe farmy wiatrowe w Polsce [33]

Lp.	Położenie	Liczba turbin	Typ	Średnica wirnika [m]	Moc znamionowa [MW]	Data uruchomienia
- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -	- 7 -
1	Barzowice	6	Vestas V-52	52	5	2001
2	Cisowo	9	Vestas V80	80	20	2002
3	Zagórze	15	Vestas 80	80	30	2002
4	Lisewo	17	14 turbin Enercon E60/600, 3 turbiny Enercon E48/800	40 i 48	10,8	2005
5	Tymień	25	Vestas V80	80	50	2006
6	Gniezdzewo k. Pucka	11	Gamesa G87/2000	87	22	2006
7	Kisielice	47	GE 1.5sle	77	80,5	2007, 2011
8	Jagniątkowo	17	Vestas V90	90	30,6	2007
9	Kamieńsk	25	Enercon E-70 E-4	71	30	2007
10	Sztum	25			18	2007
11	Łebicz k. Pucka	4	Enercon E-48/800	48	3,2	2007
12	Łebicz k. Pucka	4	Vestas V80/2000	80	8	2008
13	Zajączkowo	24	Vestas V80/2000	80	48	2008
14	Karścino-Mołtowo	17	Vestas V90/3000	90	90	2008
15	Krzęcin	7	Gamesa G90/2000	80	6	2008
16	Darżyno	6	Enercon E-82/2000	82	12	2008



cd. tab. 4

- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -	- 7 -
17	Śniatowo	16	Vestas V90/2000	90	32	2008
18	Inowrocław	16	Vestas V90/2000	90	32	2008
19	Hnatkowice- -Orzechowce k. Przemysła	6	Gamesa G87-2 MW	87	12	2009
20	Łęki Dukielskie	5	Repower MM92/2050	92	10	2009
21	Suwałki	18	Siemens SWT-2.3-93	92,8	41	2009
22	Tychowo- -Noskowo	20	Nordex N90	90	50	2009
23	Margonin	60	Gamesa G90	90	120	2010
24	Karnice	13	Siemens SWT-2.3-101	101	31	2010
25	Karcino	17	Vestas V90	90	51	2010
26	Piecki k. Suwałk	16	Gamesa g90	90	32	2011
27	Tychowo	35	Nordex N90, Siemens SWT-2.3-93	90, 93	35	2011
28	Lipniki	15	REpowe MM92	92,5	30	2011
29	Łukaszów	17	Vestas V90	90	34	2011
30	Modlikowice	12	Vestas V90	90	24	2011
31	Taciewo	15	Gamesa G90-2.0M	90	30	2012
32	Pągów	17	Vestas V112.3.0	112	51	2012
33	Nowy Tomyśl	2	Fuhrländer FL-2500	100	50	2012
34	Krobia	11	AW 3000	116	33	2012
35	Taczalin	22	REpower MM92	brak danych	45,1	2013



Pierwsza w Polsce farma wiatrowa o mocy 5 MW powstała w kwietniu 2001 r. w miejscowości Góra Barzowicka (gmina Darłowo). Inwestycja poprzedzona była wieloletnimi staraniami, pracami przygotowawczymi oraz kilkuletnimi pomiarami siły wiatru w regionie. Całkowity koszt inwestycji przekroczył kwotę 26 mln PLN. W skład farmy wchodzi 6 siłowni firmy Vestas A/S o mocy 833 kW każda. Siłownie mają zautomatyzowany system sterowania, dostosowujący kąt natarcia łopatek na wiatr (tzw. system PITCH), pracując przy wietrze w zakresie 4–25 m/s. W przypadku wiatru o prędkości przekraczającej 25 m/s urządzenia elektrowni automatycznie wyłączają się, ustawiając łopaty równoległe do kierunku wiatru. Każda elektrownia wyposażona jest w wirniki o 3 łopatach i średnicy 52 m; wieża ma wysokość 67 m. Generatory asynchroniczne mają moc znamionową 850 kW każdy, ograniczoną do łącznej mocy farmy 5 MW [34].

Pierwsza polska elektrownia wiatrowa, mimo że produkuje czystą i taną energię, spotkała się z niechęcią ze strony spółek energetycznych, które nie chciały kupować energii odnawialnej [34]. Podobne niedogodności spotykały również inne instalacje produkujące energię odnawialną w Polsce. Problem rozwiązało Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 grudnia 2005 r. [35], nakładające obowiązek zakupu energii ze źródeł odnawialnych.

Farma wiatrowa Zagórze jest zlokalizowana nieopodal wsi Zagórze nad Zalewem Szczecińskim, na południowy wschód od wyspy Wolin (il. 12). Na fundamentach, do budowy których wykorzystano 5,26 km drutu zbrojeniowego oraz 6750 m³ betonu, posadowiono 15 elektrowni wiatrowych o mocy 2 MW każda. Moc całkowita farmy wynosi 30 MW. Każda elektrownia wyposażona jest w turbinę wiatrową Vestas V80, zaopatrzoną w wirnik, składający się z łopatek i piasty umieszczonej na wysokości 78 m, na przedniej części gondoli ustawionej na wiatr. Masa całkowita turbiny wynosi ok. 265 ton. Prędkość wiatru konieczna do uruchomienia turbin to 4 m/s. Pełną moc farma osiąga przy prędkości wiatru 14 m/s, a przy prędkości 25 m/s następuje automatyczne wyłączenie turbin. Każda z nich połączona jest podziemnymi liniami kablowymi z odległą o około 5 km stacją GPZ Reclaw. Łączna długość instalacji parku wiatrowego wynosi 119 km. Średnia prędkość wiatru w rejonie zlokalizowania Farmy Wiatrowej „Zagórze”, na wysokości rotora, wynosi 6,9 m/s. Każdego roku farma produkuje od 56 do 72 mln kWh energii elektrycznej, co odpowiada zużyciu energii przez około 25 tys. polskich gospodarstw domowych [36].

Od 2009 r. największa farma wiatrowa znajduje się w miejscowości Margonin w województwie wielkopolskim. W skład farmy wchodzi 60 wiatraków o łącznej mocy 120 MW, co pozwala zaspokoić potrzeby energetyczne 90 tys. gospodarstw domowych. Wartość inwestycji to 166 mln euro. W momencie uruchomienia całkowita moc farmy stanowiła prawie 10% mocy obecnie działających w Polsce elektrowni wiatrowych [38].





Il. 12. Farma wiatrowa Zagórze (fot. Juhaskov [37])

4.6.1. Przemysł i zatrudnienie w polskiej aeroenergetyce

W grudniu 2013 r. oficjalnie rozpoczęto budowę fabryki spółki Bilfinger Crist Offshore (BCO), gdzie będą powstawać fundamenty do morskich farm wiatrowych. Inwestycja jest realizowana w Szczecinie, a jej wartość to ponad 350 mln zł. Spółka BCO planuje budować około 50 konstrukcji wsporczych pod morskie farmy wiatrowe rocznie. Każda z nich będzie ważyła od 700 do 900 ton. Produkcja będzie prowadzona w nowo wybudowanych obiektach – hali produkcyjnej (pow. ok. 30 tys. m²) oraz malarni (pow. ok. 4,2 tys. m²). Głównymi odbiorcami konstrukcji wsporczych produkowanych w Szczecinie będą firmy niemieckie oraz brytyjskie. Produkcja ma ruszyć w 2015 r. [39].

W grudniu 2013 r. podczas oficjalnych uroczystości podniesiono banderę na jednostce *Vidar*, służącej do budowy i obsługi farm wiatrowych. Statek o wartości 150 mln euro zbudowała gdyńska stocznia Crist. *Vidar* to specjalistyczna jednostka typu *heavy lift jack up vessel* zaopatrzona w ciężki system dźwigowy do budowy i obsługi morskich farm wiatrowych. Statek ma 140 m długości oraz 41 m szerokości i będzie mógł rozwinąć prędkość do 11 węzłów. Może szybko przekształcić się w 1200-tonowy dźwig służący do instalacji morskich farm wiatrowych, na co pozwala specjalny system samopodnoszący, czyli charakterystyczne, opuszczane



na morskie dno „nogi” o wysokości 90 m. Konstrukcja umożliwia prowadzenie prac na głębokości nawet 50 m. Jednostka ma system pozycjonowania statku na morzu z dokładnością do jednego metra, a na jej pokładzie znajduje się m.in. lądowisko dla helikopterów [40].

Ze względu na powolny i hamowany barierami administracyjnymi rozwój energetyki wiatrowej w Polsce, nie rozwinęła się w naszym kraju produkcja kompletnych turbin wiatrowych. Istnieje za to znacząca i dysponująca dużym potencjałem rozwojowym produkcja komponentów i urządzeń towarzyszących dla energetyki wiatrowej. Przykładowo firma Aarselef ze Świnoujścia produkuje fundamenty betonowe dla morskich farm wiatrowych, Energomontaż Północ konstrukcje stalowe, Stocznia „Crist” statki montażowe, Stocznia Gdańska wieże do elektrowni wiatrowych, KK Elektronik systemy sterujące. Ponadto w Polsce działa około 10 producentów małych elektrowni wiatrowych. Dalszy rozwój krajowego rynku energetyki wiatrowej sprzyjałby rozwojowi kolejnych przedsiębiorstw produkcyjnych na tym obszarze. Możliwe jest tu wykorzystanie znaczącego potencjału produkcyjnego polskiego przemysłu stocznioowego i okrętowego, elektromaszynowego i innych [27].

Zaletą energetyki wiatrowej w aspekcie społeczno-gospodarczym jest korzystny wpływ na rynek pracy i aktywność gospodarczą. Obecnie w Europie sektor ten zapewnia ponad 150 tys. pełnoetatowych stanowisk pracy (średnio 15 pełnoetatowych miejsc pracy przypada na 1 MW mocy zainstalowanej w ciągu roku) [41]. Według prognozy EWEA zatrudnienie w sektorze energetyki wiatrowej w UE w 2020 r. wzrośnie do ponad 350 tys. miejsc pracy. Według danych opublikowanych przez EuroObserv'ER 2011 [42] w latach 2009–2010 najwięcej osób zatrudniono w Niemczech, Hiszpanii, Włoszech, Danii, Francji i Wielkiej Brytanii.

Z końcem 2011 r. w Polsce w energetyce wiatrowej było zatrudnionych ponad 3 tys. osób. Przy założeniu pełnego wykorzystania potencjału rynkowego w 2020 r. liczba miejsc pracy w sektorze energetyki wiatrowej mogłaby wzrosnąć do około 66 tys. Nie bez znaczenia jest także pozytywny wpływ farm wiatrowych na dochód budżetów gmin. Zgodnie z wynikami wcześniejszych symulacji i przyjętym scenariuszem rozwoju energetyki wiatrowej w 2020 r., do kas gminnych z tytułu podatku od nieruchomości liczonego od elektrowni wiatrowych posadowionych na terenie gmin może wpłynąć około 21,2 mln zł [27].

Główne zespoły elektrowni wiatrowej oraz odpowiadające im dziedziny przemysłu to:

- konstrukcja wież, gondoli oraz piast wirników (przemysł stalowy, hutniczy),
- generatory, transformatory, układy regulacji (przemysł elektromaszynowy),
- przekładnie, wały, sprzęgła, hamulce, łożyska, systemy hydrauliczne i pneumatyczne (przemysł maszynowy),



- kompozytowe skrzydła wirników (przemysł lotniczy),
- układy automatyki i sterowania (producenci automatyki i elektroniki przemysłowej) [43].

4.6.2. System wsparcia aeroenergetyki

System wsparcia OZE w Polsce jest uregulowany prawem energetycznym i obowiązuje w niezmienionym kształcie od 1 października 2005 r. [44]. Mechanizm wsparcia opiera się na gwarancji możliwości sprzedaży energii wytworzonej z OZE po określonej w ustawie cenie minimalnej. Dodatkowo właściciel instalacji OZE będzie mógł uzyskać świadectwa pochodzenia (zielone certyfikaty) za każdy MW. W przypadku źródeł o mocy do 40 kW wsparcie polega na nałożeniu na określone w ustawie podmioty obowiązku zakupu energii. Sprzedaż świadectw pochodzenia OZE odbywa się na Towarowej Giełdzie Energii, gdzie cena jest kształtowana na zasadzie popytu i podaży. W 2013 r. cena oscylowała na poziomie od 129,55 zł/MWh w marcu do 192,59 zł/MWh we wrześniu. Sprzedaż świadectw pochodzenia może być również przedmiotem indywidualnie wynegocjowanych długoterminowych, dwustronnych umów [44].

4.7. Wymagania formalnoprawne wybudowania elektrowni wiatrowej

Inwestor zainteresowany aeroenergetyką w Polsce musi wykazać się dużą cierpliwością i samozaparciem. Bariery, jakie napotyka, związane są z długim i skomplikowanym procesem inwestycyjnym, którego powodzenie zależy nie tylko od kompetencji i determinacji inwestora, ale także od przychylnych władz lokalnych oraz organizacji samorządowych i środowiskowych. Proces inwestycyjny można podzielić na następujące etapy:

Etap I – koncepcyjny (2–5 miesięcy):

1. Wyszukanie lokalizacji.
2. Wstępna analiza wietrzności.
3. Analiza ograniczeń środowiskowych.
4. Analiza uwarunkowań społecznych.

Etap II – formalnoprawny (2–4 lat):

1. Uzyskanie praw do terenu.
2. Pomiar wiatru, wybór klasy turbin wiatrowych.
3. Uzyskanie zmiany planu zagospodarowania przestrzennego.
4. Uzyskanie warunków przyłączenia do sieci od Operatora.



5. Wykonanie raportu oddziaływania na środowisko.
6. Podpisanie umowy przyłączeniowej z Operatorem.
7. Wykonanie projektów budowlanych farmy i przyłączy.
8. Uzyskanie decyzji środowiskowych.
9. Uzyskanie pozwolenia na budowę.

Etap III – finansowy (1–2 lat).

1. Przygotowanie inżynierii finansowej.
2. Umowy na sprzedaż energii i świadectw pochodzenia.
3. Uzyskanie współfinansowania (kredyt, dotacje).

Etap IV – realizacyjny (1–3 lat)

1. Wybór dostawcy turbin.
2. Wybór wykonawców robót.
3. Realizacja inwestycji [43].

Aby otrzymać pozwolenie na budowę elektrowni wiatrowej, należy najpierw uzyskać decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach, w ramach której może zostać stwierdzony wymóg przeprowadzenia oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko. Posiadając taką decyzję, inwestor może wystąpić o wydanie orzeczenia o warunkach zabudowy lub w przypadku, gdy na terenie objętym wnioskiem obowiązuje miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego, niemalże od razu o pozwolenie na budowę [45–47].

Tryb postępowania w sprawie wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, obowiązki i prawa inwestorów oraz władz lokalnych, a także warunki udziału społeczeństwa w postępowaniu określa ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko [47]. Postępowanie w sprawie przeprowadzania oceny oddziaływania na środowisko prowadzone jest przez następujące organy:

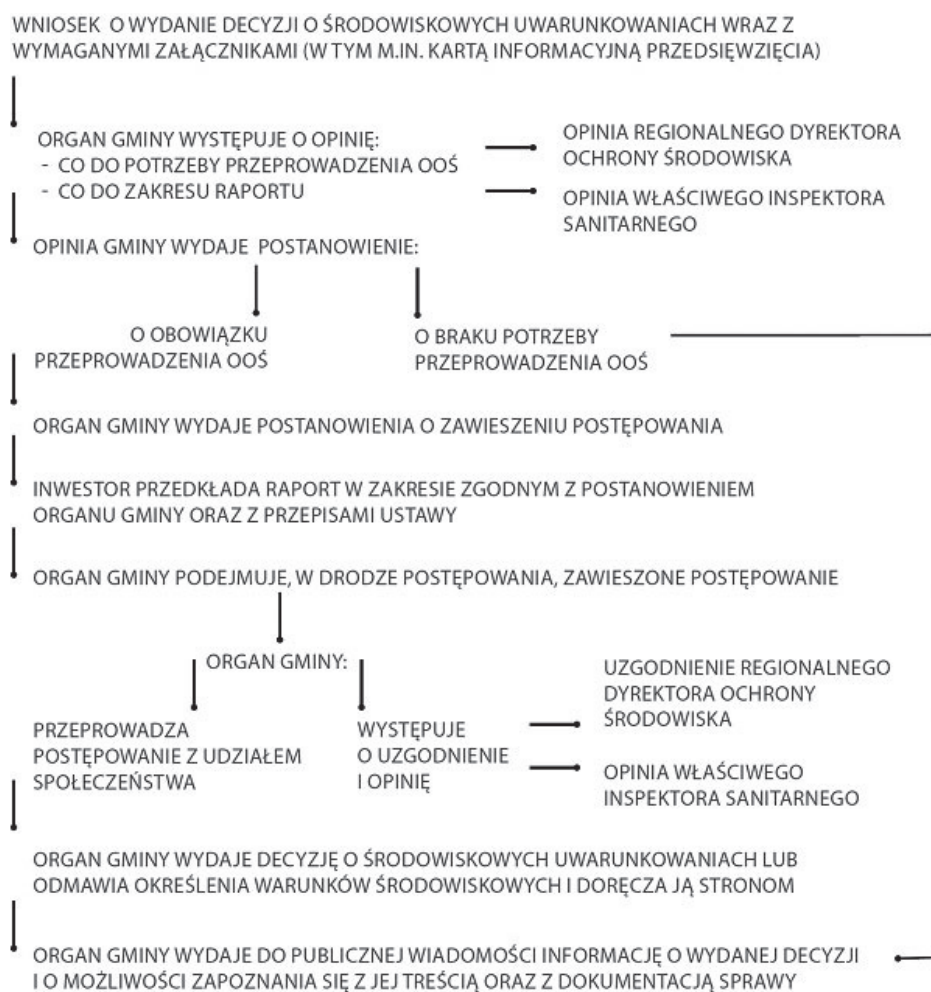
- władze lokalne – wójt, burmistrz lub prezydent miasta,
- regionalnego dyrektora ochrony środowiska – w przypadku budowy elektrowni wiatrowej na terenach zamkniętych (lotniska, tereny kolejowe, wojskowe itp.).

Rodzaj procedury przyjętej podczas postępowania w sprawie uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach zależy od parametrów planowanej inwestycji. W przypadku budowy elektrowni wiatrowej o łącznej mocy nie mniejszej niż 100 MW istnieje ustawowy obowiązek przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko. Dla przedsięwzięcia na budowie elektrowni wiatrowej innej niż określona powyżej, zlokalizowanej na obszarach objętych formami przyrody, o których mowa w ustawie o ochronie przyrody [48], lub o całkowitej wysokości nie niższej niż 30 m, przeprowadzenie oceny oddziaływania na środowisko nie jest bezwzględnie wymagane. Władze gminy lub regionalny dyrektor ochrony środo-



wiska mogą podjąć decyzję o obowiązku przeprowadzenia OOŚ bądź zwolnienia inwestora z tego obowiązku. Przed podjęciem decyzji wymagane jest uzyskanie opinii państwowego powiatowego inspektora sanitarnego.

Ilustracja 13 przedstawia schemat wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach w sprawie zgody na realizację przedsięwzięcia mogącego potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko, gdy organem właściwym do wydania decyzji jest wójt/burmistrz/prezydent miasta [45].



Il. 13. Schemat wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach w sprawie zgody na realizację przedsięwzięcia mogącego potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko, gdy organem właściwym do wydania decyzji jest wójt/burmistrz/prezydent miasta [45]



Po złożeniu wniosku o wydanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla elektrowni wiatrowych, dla których przeprowadzenie OOS nie jest obligatoryjne (poniżej 100 MW łącznej mocy), organ prowadzący postępowanie zwraca się o opinię co do konieczności przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko do

- Regionalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska (RDOŚ),
- Państwowego Powiatowego Inspektora Sanitarnego (PPIS).

W tym celu inwestor przedkłada kartę informacyjną przedsięwzięcia, zawierającą wstępną analizę potencjalnych oddziaływań na środowisko planowanej inwestycji. Jeżeli w danym przypadku nie stwierdzono potrzeby przeprowadzania oceny oddziaływania na środowisko, organ prowadzący postępowanie może przystąpić do oceny zebranego materiału dowodowego i wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach. W przeciwnym razie inwestor zostaje zobowiązany do sporządzenia analizy uwarunkowań środowiskowo-przyrodniczych oraz społecznych, obejmującej m.in.:

- monitoring określonych gatunków organizmów żywych, na które inwestycja może oddziaływać; w przypadku elektrowni wiatrowych najczęściej prowadzi się monitoring ptaków oraz nietoperzy, rzadziej określonych gatunków owadów czy roślinności;
- opis elementów przyrodniczych środowiska, objętych zakresem przewidywanego oddziaływania na środowisko;
- oddziaływanie elektrowni w zakresie hałasu;
- oddziaływanie inwestycji na powietrze, ziemię, wodę, krajobraz, klimat, dobra materialne;
- wpływ inwestycji na ludzi – w tym analizę istniejących i potencjalnych konfliktów społecznych, ich przyczyn oraz możliwości negocjacji z mieszkańcami [45].

Podsumowaniem wymienionych analiz jest raport o oddziaływaniu inwestycji na środowisko, który obok karty informacyjnej przedsięwzięcia stanowi najważniejszy dokument w procedurze OOS. Inwestor przedkłada raport władzom gminy, które są zobowiązane:

- uzgodnić warunki realizacji przedsięwzięcia z Regionalną Dyrekcją Ochrony Środowiska;
- uzyskać opinię Państwowego Powiatowego Inspektora Sanitarnego.

Władze lokalne, wydając decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach, biorą pod uwagę wyniki uzyskanych uzgodnień i opinii PPIS i RDOŚ. Organ prowadzący postępowanie powinien również wskazać, które z nich uwzględniono, a które nie, i z jakich przyczyn. Strony postępowania, składając odwołanie od decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, mogą skarżyć nie tylko samo rozstrzygnięcie organu prowadzącego, ale również postanowienia organów opiniujących lub uzgadniających [45].



Organ prowadzący postępowanie w sprawie wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, w którym jest przeprowadzana OOŚ, ma obowiązek zapewnienia określonych praw szerszemu kręgowi podmiotów, a przede wszystkim społeczeństwu (lokalnemu). Każda osoba fizyczna lub prawna, niezależnie od miejsca zamieszkania czy siedziby, ma prawo do zapoznania się z dokumentacją inwestycji oraz do wniesienia w określonym terminie uwag i wniosków. Do wiadomości publicznej muszą być podane następujące informacje o:

- przystąpieniu do przeprowadzenia oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko;
- wszczęciu postępowania;
- przedmiocie decyzji, która ma być wydana w sprawie;
- organie właściwym do wydania decyzji oraz organach właściwych do wydania opinii i dokonania uzgodnień;
- możliwościach zapoznania się z niezbędną dokumentacją sprawy i miejscu, w którym jest ona wyłożona do wglądu;
- możliwości składania uwag i wniosków;
- sposobie i miejscu składania uwag i wniosków, wskazując jednocześnie 21-dniowy termin ich składania;
- organie właściwym do rozpatrzenia uwag i wniosków;
- terminie i miejscu rozprawy administracyjnej otwartej dla społeczeństwa, jeżeli ma być ona przeprowadzona;
- postępowaniu w sprawie transgranicznego oddziaływania na środowisko, jeżeli jest prowadzone.

Obowiązek ten jest realizowany przez:

- udostępnienie informacji na swojej stronie Biuletynu Informacji Publicznej;
- ogłoszenie informacji w sposób zwyczajowo przyjęty w swojej siedzibie;
- ogłoszenie informacji przez obwieszczenie w sposób zwyczajowo przyjęty w miejscu planowanego przedsięwzięcia (np. na słupach ogłoszeniowych).

Uwagi i wnioski społeczeństwa mogą być wnoszone w formie:

- pisemnej;
- ustnej do protokołu;
- komunikacji elektronicznej (np. e-mail), bez konieczności opatrywania ich bezpiecznym podpisem elektronicznym [45].

Organ ma obowiązek rozpatrzyć wszystkie złożone w terminie uwagi i wnioski zgłoszone przez społeczeństwo. W uzasadnieniu decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach powinna znaleźć się informacja, w jakim zakresie wnioski zostały uwzględnione.

Przeprowadzenie całej procedury postępowania z udziałem społeczeństwa jest niezbędnym warunkiem prawidłowej oceny oddziaływania na środowisko. W praktyce



często zdarzają się sytuacje, w których organ prowadzący postępowanie nie uwzględni w decyzji OOS wszystkich uwag i wniosków przedstawicieli społeczeństwa. Tak przeprowadzone postępowanie stanowi naruszenie procedury, a decyzja wydana bez uwzględnienia uwag i wniosków społeczeństwa może zostać uznana za wadliwą [45].

Procedury formalno-prawne dla morskich farm wiatrowych

W celu realizacji projektu morskiej farmy wiatrowej inwestor musi uzyskać szereg pozwoleń. Proces ten może trwać od 3 do nawet 7 lat. Wymagane decyzje to:

1. Pozwolenie na wznoszenie i wykorzystywanie sztucznych wysp, konstrukcji i urządzeń w polskich obszarach morskich – czyli tzw. decyzja lokalizacyjna, wydawana przez ministra infrastruktury na wniosek inwestora dla wybranej przez niego lokalizacji, a po uchwaleniu planu zagospodarowania przestrzennego obszarów morskich – dyrektora właściwego Urzędu Morskiego.
2. Decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach – wydawana przez Regionalną Dyрекcję Ochrony Środowiska
3. Warunki przyłączenia do sieci wydawane przez operatora sieci przesyłowej.
4. Decyzja o pozwoleniu na budowę – wydawana przez wojewodę [49].

Procedurę uzyskania decyzji lokalizacyjnej uregulowano w ustawie z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej. Zmiana tej ustawy [50] umożliwiła realizację inwestycji *offshore* na polskich obszarach morskich, dzięki dostosowaniu przepisów regulujących wydawanie pozwoleń na wznoszenie i wykorzystywanie sztucznych wysp, konstrukcji i urządzeń do uwarunkowań procesu inwestycyjnego w tej dziedzinie gospodarki. Zmiana przede wszystkim wydłuża okres, na jaki wydawane jest pozwolenie, z 5 do 30 lat, z możliwością jego przedłużenia o kolejne 20 lat. Ustawa zakazuje wznoszenia i wykorzystywania elektrowni wiatrowych na morskich wodach wewnętrznych i na morzu terytorialnym [49].

Za wydanie pozwolenia, bez względu na lokalizację inwestycji, organ pobiera opłatę w wysokości stanowiącej równowartość 300 jednostek obliczeniowych. Jeśli inwestycja zlokalizowana jest na obszarze wyłącznej strefy ekonomicznej, za wydanie pozwolenia pobiera dodatkową opłatę w wysokości 1% wartości planowanego przedsięwzięcia [51].

4.8. Ocena oddziaływania elektrowni wiatrowej na środowisko

Ocena ryzyka związanego z niewłaściwym zlokalizowaniem farmy wiatrowej powinna być podstawą i pierwszą czynnością wykonywaną przez deweloperów przygotowujących projekt inwestycyjny, jakim jest budowa farmy wiatrowej. Oprócz



zagadnień technologicznych, takich jak wietrzność na danym obszarze, możliwość przyłączenia do sieci, infrastruktura umożliwiająca transport i budowę elektrowni wiatrowych oraz wpływ na infrastrukturę lotniczą, należy bezwzględnie dodać ocenę potencjalnego wpływu elektrowni na środowisko przyrodnicze, ponieważ właściwa, rzetelna i całościowa analiza przyrodnicza wymaga wieloetapowej procedury, uwzględniającej specyfikację procesów przyrodniczych. Aby zapewnić jak najwłaściwszą użyteczność przeprowadzonych działań, pozwalających na podejmowanie decyzji o rezygnacji lub kontynuacji projektu bez ponoszenia zbędnych kosztów, ocena ryzyka przyrodniczego powinna być wykonywana w 3 etapach [52].

Etap I. Przedrealizacyjna Analiza Przyrodnicza (PAP)

Pozwala na szybkie, niewielkim kosztem, wyeliminowanie lokalizacji o zbyt dużym ryzyku przyrodniczym na podstawie dostępnych danych oraz wstępnych lokalizacji.

1. Wstępne określenie obszaru potencjalnych lokalizacji parku wiatrowego (zamierzonej i alternatywnych).
2. Zebranie danych źródłowych, takich jak:
 - a) mapy;
 - b) plany ochrony obszarów chronionych;
 - c) gminne i powiatowe programy ochrony środowiska;
 - d) wyniki przeprowadzonych w ostatnich latach inwentaryzacji przyrodniczych;
 - e) raporty WIOŚ o stanie środowiska;
 - f) dokumenty zgłaszające obszar do sieci Natura 2000;
 - g) listy i opisy obszarów Natura 2000, publikowane przez Ministerstwo Środowiska oraz organizacje ekologiczne;
 - h) wyniki monitoringu ptaków prowadzone przez organizacje ornitologiczne;
 - i) plany zagospodarowania przestrzennego;
 - j) dokumentacje dotyczące procedur środowiskowych dla innych projektów inwestycyjnych na danym terenie.
3. Analiza danych źródłowych pod kątem mocnych i słabych stron planowanych lokalizacji elektrowni wiatrowych.
4. Weryfikacja analiz wykonanych na podstawie dostępnej dokumentacji podczas wizytacji terenowej.
5. Wstępne konsultacje planów inwestycyjnych z właściwymi organami administracji samorządowej, organizacjami ekologicznymi i lokalną społecznością.



6. Kategoryzacja planowanej lokalizacji:
- a) lokalizacja niskiego ryzyka – brak przeciwwskazań dla dalszego przygotowywania inwestycji, możliwe uproszczenie dalszej procedury;
 - b) lokalizacja średniego ryzyka – należy dokonać szczegółowej inwentaryzacji przyrodniczo-środowiskowej dla właściwego oszacowania ryzyka przed podjęciem ostatecznej decyzji o kontynuacji projektu;
 - c) lokalizacja dużego ryzyka – należy zrezygnować z dalszego przygotowywania inwestycji [52].

Etap II. Inwentaryzacja przyrodniczo-środowiskowa

Dla lokalizacji niskiego i średniego ryzyka konieczna jest weryfikacja wyników PAP poprzez dokonanie inwentaryzacji właściwych zasobów przyrodniczych i wykonanie badań empirycznych potencjalnego wpływu inwestycji na środowisko. Wyniki przeprowadzonych badań będą stanowiły podstawę do podjęcia ostatecznej decyzji o realizacji inwestycji oraz będą materiałem wyjściowym do przygotowywania informacji o potencjalnym wpływie inwestycji na środowisko lub raportu oddziaływania na środowisko, niezbędnych do uzyskania decyzji środowiskowych.

Procedura na tym etapie obejmuje:

1. Określenie lokalizacji poszczególnych elektrowni wiatrowych w wariantcie preferowanym oraz w wariantach alternatywnych.
2. Konsultacje z zakresu Postępowania OOŚ z władzami samorządowymi, wojewódzkimi i organizacjami ekologicznymi.
3. Określenie zakresu szczegółowej analizy przyrodniczo-środowiskowej dla wariantów preferowanego i alternatywnych:
 - a) inwentaryzacja ornitologiczna;
 - b) inwentaryzacja przyrodnicza;
 - c) ocena oddziaływania hałasowego;
 - d) ocena oddziaływania na krajobraz.
4. Wykonanie szczegółowej analizy przyrodniczo-środowiskowej według określonego zakresu.
5. Podjęcie ostatecznej decyzji o realizacji projektu. Weryfikacja lokalizacji elektrowni wiatrowych, ustalenie preferowanego projektu farmy wiatrowej.

Etap III. Uzyskanie decyzji środowiskowej

W przypadku pozytywnych rezultatów przeprowadzonych badań wskazujących na brak znaczącego negatywnego oddziaływania na środowisko planowanej inwestycji, inwestor może zgodnie z ustawą Prawo ochrony środowiska rozpocząć Postępowanie OOŚ. Obejmuje ono w szczególności:



1. Złożenie wniosku o wydanie decyzji środowiskowej do właściwego organu administracji.
2. Wydanie przez właściwy organ postanowienia o konieczności lub braku konieczności sporządzenia raportu OOŚ.
3. Sporządzenie raportu OOŚ.
4. Przeprowadzenie konsultacji społecznych.
5. Przeprowadzenie konsultacji z właściwymi organami.
6. Uzyskanie decyzji środowiskowej.

Szczegółowa analiza przyrodniczo-środowiskowa powinna inwestorowi pomóc wykazać, że planowana przez niego inwestycja nie będzie miała znaczącego negatywnego oddziaływania na środowisko, a w szczególności na obszary i gatunki chronione. Na podstawie danych uzyskanych w wyniku badań zasobów ornitologicznych, przyrodniczych oraz zagrożeń hałasowych i krajobrazowych, możliwe będzie przygotowanie informacji o potencjalnym wpływie inwestycji na środowisko lub raportu oddziaływania na środowisko zgodnych z wymogami ustawy Prawo ochrony środowiska [53]. Zalecane jest, aby analizy poszczególnych składników środowiska były wykonywane według następujących metodologii:

1. Analiza ornitologiczna:
 - a) inwentaryzacja ornitologiczna powinna obejmować wizytację terenową potencjalnej lokalizacji elektrowni wiatrowej, wykonywaną w odstępach 2-tygodniowych przez cały rok kalendarzowy;
 - b) ocena występowania ptaków w transektach poprowadzonych wzdłuż planowanej lokalizacji parku wiatrowego w odległości 1 km od siebie;
 - c) w okresie migracji jesiennych i wiosennych obserwacje terenowe należy prowadzić raz w tygodniu w godzinach porannych w wyznaczonych uprzednio punktach obserwacyjnych, gwarantujących objęcie zasięgiem obserwacji jak największego obszaru planowanej farmy;
 - d) należy spisać wszystkie osobniki poszczególnych gatunków ptaków, widoczne na badanym obszarze oraz przelatujące nad nim, wraz ze wskazaniem miejsca występowania oraz kierunków i wysokości przelotów;
 - e) dodatkowo, w okresie lęgowym, należy przeprowadzić 2 badania transektowe w kwadratach o boku 1 km.
2. Analiza przyrodnicza:
 - a) na terenie parku wiatrowego należy zinwentaryzować ekosystemy, które mogą zostać czasowo bądź całkowicie uszkodzone podczas prac budowlanych, budowy infrastruktury drogowej oraz przyłączeniowej;
 - b) należy określić wpływ budowy, eksploatacji i likwidacji elektrowni na ekosystemy;



- c) szczególną uwagę należy zwrócić na stanowiska gatunków roślin chronionych oraz siedliska typowe dla występowania gatunków zwierząt chronionych, występujące na terenie planowanych lokalizacji dróg, linii przyłączeniowych oraz poszczególnych elektrowni.

3. Analiza hałasowa:

do oceny stopnia ryzyka lokalizacyjnego ze względu na przewidywane zmiany klimatu akustycznego konieczne jest:

- a) ustalenie mocy akustycznej planowanych do zainstalowania urządzeń (w miarę możliwości porównanie tych parametrów z innymi urządzeniami dostępnymi na rynku);
- b) wstępne określenie potencjalnego zasięgu oddziaływania akustycznego zespołu elektrowni wiatrowych – niewymagające żadnych dodatkowych pomiarów czy modelowania; postępowanie może polegać na wykreśleniu na mapie stref kołowych o promieniu 500 m od podstawy wieży elektrowni; połączone granice tych stref wyznaczają obszar podwyższonego ryzyka akustycznego;
- c) zidentyfikowanie ewentualnych obszarów akustycznej ingerencji (tereny chronione prawnie), zlokalizowanych wewnątrz lub przylegających bezpośrednio do granic tak wyznaczonej strefy;
- d) zidentyfikowanie wrażliwych receptorów hałasu (pojedyncze siedliska ludzkie, inne miejsca stałego przebywania ludzi, skupiska drzew lub krzewów mogące stanowić siedliska zwierząt lub ptaków), zlokalizowanych wewnątrz lub na granicy strefy wyznaczonej zgodnie z zaleceniami punktu a.

4. Analiza krajobrazowa:

- a) określenie charakteru krajobrazu na danym terenie i występujących na nim typów krajobrazów;
- b) określenie znaczących cech krajobrazowych, na które może oddziaływać realizacja projektu;
- c) określenie kluczowych punktów widokowych oraz obserwatorów, na które może mieć wpływ widok inwestycji;
- d) wizualizacja fotograficzna projektowanej inwestycji wkomponowanej w panoramy krajobrazowe z dostępnych punktów i ciągów widokowych;
- e) oszacowanie wpływu farmy wiatrowej na zasoby krajobrazowe, ich charakter oraz wizualność [51].

W określonych przypadkach, na lokalizacjach o niskim ryzyku, możliwe jest ograniczenie powyższego zakresu procedury ryzyka przyrodniczego. Inwestor powinien jednak pamiętać, że przeprowadzenie skróconej i uproszczonej procedury może zwiększyć ryzyko inwestycyjne w przypadku ujawnienia się negatywnego



wpływu na środowisko już zrealizowanej inwestycji lub spowodować zgłaszanie przez lokalnych mieszkańców albo organizacje ekologiczne mniej lub bardziej uzasadnionych protestów podczas jej realizacji. Dlatego też zaleca się, aby przy podejmowaniu decyzji o ograniczeniu zakresu procedury brać pod uwagę następujące czynniki:

1. Aktualne wyniki badań naukowych potwierdzające brak walorów przyrodniczych wrażliwych na oddziaływanie elektrowni wiatrowych w bezpośrednim sąsiedztwie planowanego obiektu.
2. Brak sąsiedztwa obszarów wrażliwych w odległości 10 km od badanej lokalizacji.
3. Projekt parku wiatrowego składającego się z nie więcej niż 5 wiatraków lub niewielkich grup wiatraków (do 3 sztuk) znacznie od siebie oddalonych (powyżej 1 km) przy braku kumulacyjnego wpływu na środowisko innych inwestycji realizowanych lub planowanych na danym terenie.
4. Brak obszarów ochrony akustycznej i/lub wrażliwych receptorów w zasięgu mierzalnego oddziaływania akustycznego inwestycji.
5. Pozytywne wyniki przedrealizacyjnej analizy przyrodniczej.
6. Pozytywny wynik konsultacji z właściwymi organami, organizacjami ekologicznymi i społecznością lokalną [51].

Opis raportu o oddziaływaniu elektrowni wiatrowej na środowisko³

Poniżej przedstawiamy opis typowego raportu o oddziaływaniu elektrowni wiatrowej na środowisko, zatytułowany „Raport o oddziaływaniu na środowisko planowanego przedsięwzięcia, polegającego na budowie wolno stojącej elektrowni wiatrowej wraz z elementami towarzyszącymi na działce nr 249 i 248 (zjazd z drogi) położonymi w obrębie miejscowości Łopatki gmina Książki, powiat wąbrzeski, województwo kujawsko-pomorskie” [54].

Strona pierwsza to wyżej podany tytuł przedsięwzięcia oraz dokładny adres inwestora; w kwalifikacji przedsięwzięcia uznano, że może ono potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko [54].

Kolejne strony (3–20) omawianego raportu to streszczenie w języku niespecjalistycznym informacji zawartych w raporcie. Strona 21 to szczegółowy spis treści raportu. Na stronie 23 jest wprowadzenie, w którym czytamy, że raport opisuje oddziaływanie na środowisko przedsięwzięcia, polegającego na realizacji budowy wolno stojącej elektrowni wiatrowej o mocy 0,8 MW wraz z elementami towarzyszącymi w obrębie miejscowości Łopatki gmina Książki. Celem raportu, stanowiącego niezbędny element postępowania w sprawie oceny oddziaływania

³ Podziękowania dla pana Krzysztofa Bąka za przekazane materiały.



na środowisko planowanego przedsięwzięcia, jest uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach. We wprowadzeniu czytamy, że raport stanowi element postępowania w sprawie oceny oddziaływania na środowisko, którego celem jest uzyskanie pozwolenia na budowę [54].

Na stronie 24 przedstawiono uzasadnienie potrzeby realizacji przedsięwzięcia i ogólne właściwości funkcjonalno-użytkowe. Jako pierwszy argument za realizacją inwestycji podano fakt, że globalne zapotrzebowanie na energię do roku 2050 wzrośnie 24-krotnie. W dalszej części uzasadnienia zwrócono uwagę na pilną potrzebę poszukiwania alternatywnych źródeł energii, co wiąże się z wyczerpywaniem się zasobów paliw kopalnych oraz negatywnym oddziaływaniem gazów powstających podczas spalania paliw na środowisko i klimat. Kolejne zagadnienie, jakie poruszono, to warunki wietrzne w Polsce i w województwie kujawsko-pomorskim. Stwierdzono, że na terenie inwestycji występują korzystne warunki wiatrowe. Wymieniono również zalety aeroenergetyki: oszczędność paliw, czysta energia, stały jednostkowy koszt uzyskanej energii, konkurencyjność ekonomiczna w stosunku do źródeł konwencjonalnych, minimalne straty przesyłu, prosta obsługa (automatyczne sterowanie), znikomy koszt obsługi, krótki czas montażu i demontażu na miejscu użytkownika, możliwość zdalnego monitorowania i sterowania, okres eksploatacji – około 30 lat [54].

W rozdziale 1.3 na stronie 30 oraz w rozdziale 1.4 na stronie 32 przytoczono podstawy prawne opracowania oraz ustawy i akty wykonawcze związane ze sporządzeniem raportu – łącznie aż 65 pozycji. Rozdział 1.5 na stronie 35: „Klauzula zgodności z przepisami Unii Europejskiej”, mówi, że sporządzony raport o oddziaływaniu na środowisko planowanego przedsięwzięcia, rozpatrywanego w niniejszym opracowaniu, został przygotowany zgodnie ze znowelizowanymi, dostosowanymi do przepisów Unii Europejskiej przepisami. W związku z powyższym spełnia warunki stawiane ocenom oddziaływania na środowisko, konieczne przy występowaniu o dofinansowanie ze środków pomocowych Unii Europejskiej. W rozdziale 1.6 na stronie 35 przedstawiono zakres opracowania, streszczony w następujących akapitach [54].

Rozdział 2 na stronie 39 raportu to szczegółowy „Opis planowanego przedsięwzięcia”. Planuje się budowę wolno stojącej elektrowni wiatrowej o mocy 0,8 MW wraz z elementami towarzyszącymi (linia kablowa podziemna SN 15 kV, stacja pomiarowa, droga dojazdowa oraz plac manewrowy) na działce nr 249 i 248 (zjazd z drogi) położonej w obrębie miejscowości Łopatki, gmina Książki. W ramach elementów towarzyszących planuje się budowę trasy linii energetycznej kablowej SN 15 kV wraz ze stacją kontenerową położoną przy elektrowni i słupem przy istniejącej linii napowietrznej. Trasa linii kablowej składać się będzie z jednego obwodu i zostanie podana we wniosku o ustalenie lokalizacji celu publicznego. Przy elek-



trowni usytuowana będzie stacja kontenerowa pomiarowa o wymiarach 3×3 m. Do wieży zostanie doprowadzona trwale utwardzona droga dojazdowa o szerokości 4,5 m. Droga dojazdowa z placami i lukami będzie wykonana z kamienia o różnym uziarnieniu i grubości warstwy, zależnej od warunków gruntowych i stosownie zagęszczonej. Droga dojazdowa połączona będzie z istniejącą drogą publiczną o numerze ewidencyjnym 248. W przypadku kolizji dróg z rowami śródpolnymi przewiduje się wykonanie przejazdów uwzględniających zachowanie prawidłowego przepływu wody [54].

Rozdział 2.1 na stronie 39 raportu to opis i zdjęcie lokalizacji inwestycji – działka 249 w miejscowości Łopatki, gmina Książki, powiat wąbrzeski, województwo kujawsko-pomorskie. W rejonie oddziaływania planowanej elektrowni wiatrowej nie ma ośrodków edukacji, szpitali, obiektów militarnych, cmentarzy, terenów turystyczno-rekreacyjnych, obszarów ważnych z punktu widzenia wartości kulturowo-historycznych lub naukowych oraz zasobów wód powierzchniowych. Łączna powierzchnia przeznaczona pod inwestycję (place, fundament, drogi itd.) nie przekroczy 2,5 tys. m².

Rozdział 2.2 ze strony 42 raportu opisuje „Charakterystykę całego przedsięwzięcia i warunki użytkowania terenu w fazie budowy i eksploatacji lub użytkowania”, a rozdział 2.3 z tej samej strony „Główne cechy charakterystyczne procesów produkcyjnych”. Założono, że należy utwardzić 1,5 tys. m² dróg, a pod fundament należy zrobić wykop $15 \times 15 \times 2,5 = 562,5$ m³. Założono, że budowa fundamentu powinna zająć 2–3 tygodnie, montaż i demontaż dźwigu to łącznie 6 dni, sam montaż elektrowni to 1,5 dnia. Wskazano, że na etapie budowy mogą powstać następujące zanieczyszczenia: gruz, złom, odpady komunalne, może nastąpić emisja hałasu i emisja niezorganizowanego pyłu i spalin pochodząca z transportu i prac budowlanych. Zaznaczono, że nieunikniona jest krótkotrwała dewastacja terenu, zarówno w czasie budowy planowanych obiektów, jak i na etapie ich demontażu. Ewentualne szkody powstałe w związku z realizacją planowanej inwestycji winien usunąć wykonawca, a teren wokół inwestycji musi zostać przywrócony do stanu poprzedniego [54].

W rozdziale 2.3.2 na stronie 47 raportu przedstawiono cechy charakterystyczne procesu wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem siły wiatru. Do atutów aeroenergetyki zaliczono: brak zużycia wody, brak ścieków technologicznych, brak emisji gazów i pyłów do atmosfery, sposób procesu wytwarzania energii elektrycznej sprawia, że elektrowni wiatrowej nie zalicza się do zakładu o zwiększonym ryzyku albo zakładu o dużym ryzyku wystąpienia awarii przemysłowej. Do wad elektrowni wiatrowej zaliczono fakt, że jest ona źródłem hałasu i stanowi przeszkodę na trasie przelotów ptaków, a także jest obiektem o dużej wysokości i kontrastowym kolorze w stosunku do tła nieba oraz powierzchni ziemi; wpływa na krajobraz [54].



W rozdziale 2.3.3 na stronie 48 raportu przedstawiono szczegółowy zakres instalacji. Planowana elektrownia, jak już wcześniej wspomniano, ma mieć moc 0,8 MW, ma być trójpłatową turbiną z systemem obracania gondoli oraz o zmiennym skoku, pracującą z uwzględnieniem kierunku wiatru. Turbina ma być wyposażona w śmigło (wirnik) o długości 53 m. Generator prądu zostanie umieszczony w gondoli na wieży stalowej (rurowej) o wysokości 75 m. Turbina będzie wyposażona w systemy regulacji, pozwalające na monitorowanie kąta łopat, co z kolei pozwoli na optymalne ich ustawienie do wiatru. Określono, że elektrownia będzie rocznie produkować 1850 MWh energii elektrycznej. W rozdziale szczegółowo opisano budowę elektrowni wiatrowej, opis poparto trzema rysunkami.

Najważniejszy jest rozdział 2.4 raportu na stronie 53 – Przewidywane oddziaływanie na środowisko, wynikające z funkcjonowania planowanego przedsięwzięcia. Podkreślono, że podczas funkcjonowania elektrowni wiatrowej może nastąpić:

- emisja hałasu,
- emisja odpadów,
- wytwarzane będzie pole elektromagnetyczne niejonizujące.

Z uwagi na stosowaną technologię produkcji energii elektrycznej nie przewidyje się wystąpienia nadzwyczajnych zagrożeń dla środowiska, takich jak wybuch czy pożar. Praca elektrowni nie wymaga zaopatrzenia w wodę, nie potrzebuje ciepła grzewczego i technologicznego, nie wytwarza ścieków socjalno-bytowych i ścieków technologicznych. Niezbędna do funkcjonowania energia elektryczna będzie pochodzić z własnego źródła, czyli właśnie z elektrowni wiatrowej. Przewidywane zapotrzebowanie na energię elektryczną wynosi 15 kW. Podczas trwania inwestycji:

- wszystkie powstające odpady będą podlegać ewidencji ilościowej i jakościowej;
- odpady, które mogą stanowić zagrożenie dla środowiska, do czasu ich wywozu będą selektywnie gromadzone w wydzielonych, szczelnych i zamkniętych pojemnikach;
- transport odpadów niebezpiecznych odbywać się będzie zgodnie z przepisami o przewozie materiałów niebezpiecznych [54].

Rozdział 2.5 na stronie 54 raportu opisuje rozwiązania zapobiegające zagrożeniom dla środowiska. W rozdziale tym ponownie poruszany jest problem zagospodarowania odpadów. Pojawiają się ważne informacje na temat uniknięcia ewentualnych kolizji z elektrownią wiatrową. W tym celu zostaną zamontowane typowe oznaczenia przeszkodowe, zarówno nocne, jak i dzienne. Nocne oznakowanie stanowić będą lampy oświetleniowe koloru czerwonego na szczycie gondoli. Jest to oświetlenie składające się z dwóch czerwonych synchronicznie migających świateł ostrzegawczych. Oznakowaniem dziennym będzie pomalowanie końcówek łopat śmigieł na kolor czerwony.



Rozdział 3, rozpoczynający się na stronie 57, przedstawia opis elementów przyrodniczych środowiska, objętych zakresem przewidywanego oddziaływania planowanego przedsięwzięcia na środowisko. Na początku szczegółowo przedstawiono opis terenu pod inwestycję: położenie geograficzne, ludność, turystykę, atrakcje turystyczne, walory flory i fauny, warunki klimatyczne, stosunki anemologiczne. Opisano metody badań kierunku i siły wiatru. Zaznaczono, że w 2005 r. największą częstością na terenie województwa charakteryzowały się wiatry z sektora zachodniego, ich udział wynosił od 39,5% dla Bydgoszczy, 35,5% dla Grudziądza, 35,1% dla Torunia po 27,3% w Kołudzie Wielkiej. Średnia roczna prędkość wiatru wahała się od 2,1 m/s w Kołudzie Wielkiej do 3,1 m/s w Grudziądzu. Maksymalna chwilowa prędkość wiatru wyniosła w Toruniu 19 m/s i zanotowano ją w styczniu. Również w styczniu zanotowano największą liczbę dni z prędkościami wiatru > 10 m/s. Najmniej takich dni zanotowano w maju, październiku oraz listopadzie. Opis warunków wietrznych poparto licznymi tabelami i rysunkami ze stacji meteorologicznych. Na stronach 70–75 zestawiono obszary chronionego krajobrazu znajdujące się w pobliżu inwestycji, w tym obszary Natura 2000 [54].

Rozdział 4 na stronie 77 opisuje istniejące w sąsiedztwie lub w bezpośrednim zasięgu oddziaływania planowanego przedsięwzięcia zabytki chronione. Rozdział 5 na stronie 79, bardzo ważny dla późniejszych decyzji, przedstawia przewidywane skutki dla środowiska w przypadku niepodejmowania przedsięwzięcia. Wskazano, że w przypadku niezrealizowania inwestycji:

- wystąpi konieczność postawienia siłowni wiatrowej w miejscu o mniej dogodnym dostępie do drogi publicznej oraz infrastruktury technicznej w pobliżu elementów środowiska objętych ochroną;
- obecne grunty niskiej jakości mogą ulec dalszej degradacji i stać się nieużytkami.

Kolejny ważny fragment to rozdział 6 na stronie 79 raportu przedstawiający opis analizowanych wariantów „inwestycyjnych”.

- 1) wariant proponowany przez inwestora – budowa elektrowni wiatrowej o mocy 0,8 MW wraz z instalacjami towarzyszącymi;
- 2) wariant alternatywny – budowa elektrowni wiatrowej o mocy 2 MW i wysokości wieży powyżej 100 m;
- 3) wariant alternatywny – budowa 3 elektrowni wiatrowych o mocy 0,6 MW każda;
- 4) wariant alternatywny – budowa źródła energii elektrycznej, opartego na paliwach konwencjonalnych.

Jako wariant najkorzystniejszy dla środowiska wybrano propozycję inwestora, czyli budowę elektrowni wiatrowej o mocy 0,8 MW. Wybór uzasadniono oceną



punktową danej inwestycji. W tabeli 7 przedstawiono punktację dla inwestycji najkorzystniejszej dla środowiska [54].

Tab. 7. Punktacja dla inwestycji najkorzystniejszej dla środowiska [54]

Lp.	Element środowiska	Liczba punktów
1	ludzie	2
2	flora, fauna	3
3	woda	1
4	powietrze	1
5	powierzchnia ziemi	1
6	klimat	1
7	krajobraz	3
8	dobry materialne	1
9	zabytki i krajobraz kulturowy	1
10	wzajemne oddziaływanie między elementami o których mowa w punktach 1-9	2
Łączna ocena oddziaływania na środowisko		16

Przyznawana liczba punktów zależała od oddziaływania na dany element środowiska:

- 1 pkt – oddziaływanie nie występuje;
- 2 pkt – oddziaływanie słabe;
- 3 pkt – oddziaływanie w stopniu akceptowalnym, wymaga monitorowania;
- 4 pkt – oddziaływanie występuje w stopniu pogarszającym;
- 5 pkt – oddziaływanie stanowi istotne zagrożenie lub oddziaływanie transgraniczne.

Z kolei przyjęta skala punktowa przedstawia się następująco:

- Σ 1-10 pkt – nie stwierdza się wymiernego oddziaływania na środowisko;
- Σ 11-20 pkt – przedsięwzięcie oddziałuje na środowisko w sposób słaby;
- Σ 21-30 pkt – przedsięwzięcie oddziałuje na środowisko w sposób dopuszczalny, wymagane jest stosowanie monitoringu;
- Σ 31-40 – przedsięwzięcie wpłynie na pogorszenie stanu środowiska, wymagane są dodatkowe zabezpieczenia ekologiczne;
- Σ 41-50 – przedsięwzięcie stwarza zagrożenie dla środowiska, nie powinno być realizowane w rozpatrywanym wariantcie.

Warianty alternatywne zostały ocenione na 20 punktów i więcej.



Rozdział 9 ze strony 87 zawiera opis metod prognozowania zastosowanych przez wnioskodawcę oraz opis przewidywanych znaczących oddziaływań planowanego przedsięwzięcia na środowisko, obejmujący bezpośrednie, pośrednie, wtórne, skumulowane, krótko-, średnio- i długoterminowe, stałe i chwilowe oddziaływania na środowisko. Przeprowadzone obliczenia zamieszczono w kilku tabelach, stwierdzając ostatecznie, że realizacja budowy elektrowni wiatrowej wpłynie w sposób nieznaczący na stan środowiska i zdrowie ludzi, a jej wpływ na aspekty społeczno-gospodarcze będzie korzystny [54].

W przypadku siłowni wiatrowej ważna jest analiza warunków akustycznych i właśnie jej poświęcono rozdział 9.3.3 na stronie 95. Wyliczono, że maksymalny poziom hałasu wytwarzany przez elektrownię, przy prędkości wiatru 10 m/s, wynosi 103 dB. Minimalny poziom hałasu powstający podczas pracy siłowni wynosi 43 dB. Ocenę zasięgu emisji hałasu sporządzono na podstawie zalecanych przez Ministerstwo Środowiska modeli obliczeniowych zawartych w Instrukcjach nr 308–338. Na rysunkach przedstawiono rozkład natężenia dźwięku w zależności od odległości od elektrowni w ciągu dnia i nocy. Stwierdzono, że poziom hałasu emitowany przez elektrownię nie będzie przekraczał wartości dopuszczalnych, określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. [55]. Zaznaczono, że dokładna ocena wpływu projektowanej instalacji na klimat akustyczny powinna być poprzedzona badaniami poziomu dźwięku, wykonanymi w pobliżu elektrowni wiatrowej i na terenach zabudowy zagrodowej, w terminie do 3 miesięcy od uruchomienia elektrowni [54].

Rozdział 9.4 na stronie 108 raportu został poświęcony oddziaływaniom aeroenergetyki na ptaki. Stwierdzono również, że w Polsce nadal nie ma (2009 r.) dokładnych badań na ten temat. Należy zatem przeprowadzić analizę wpływu elektrowni na ptaki, a przede wszystkim zbadać zmianę natężenia wykorzystania terenu przez ptaki w porównaniu z okresem przedrealizacyjnym. W tym celu prowadzony będzie monitoring ornitologiczny przez rok od uruchomienia elektrowni. Monitoring zostanie powtórzony w ciągu 5 lat po oddaniu elektrowni do eksploatacji, w wybranych przez ornitologa okresach, np. w latach 1, 2, 3 lub 1, 3, 5. Wyniki monitoringu ornitologicznego powinny zostać wykorzystane przez organy administracji do uaktualnienia decyzji dotyczących dalszego funkcjonowania siłowni wiatrowej. W przypadku stwierdzenia oddziaływania przekraczającego prognozy zawarte w raporcie istnieje możliwość:

- wdrożenia stosownych działań minimalizujących, np. zmiana nocnego oświetlenia elektrowni, okresowe wyłączenie turbin,
- zastosowania działań kompensacyjnych [54].

Rozdział 9.5 na stronie 114 raportu przedstawia „pozostałe” oddziaływania na środowisko i zdrowie ludzi. Zwrócono uwagę, że elektrownie wiatrowe jako



urządzenia wysokie (w tym wypadku 75 m), o kolorze znacząco różniącym się od tła, w dodatku poruszające się, wpływają na krajobraz. W zależności od liczby i typu wiatraków, ukształtowania i zagospodarowania terenu, warunków atmosferycznych, wiatraki są widoczne nawet ze znacznych odległości. Podkreślono, że ocena krajobrazu z wiatrakami jest subiektywna. Jest wielu przeciwników, ale i zwolenników, którzy odbierają turbiny wiatrowe jako nowoczesne urządzenia o wyrafinowanym kształcie. W raporcie podkreślono, że oceniając wpływ elektrowni wiatrowych na krajobraz, nie należy zapominać, że alternatywą jest elektrownia węglowa i dymiące kominy.

Obracające się łopaty turbiny wiatrowej mogą wytwarzać efekt stroboskopowy, w tym wypadku wywołany przez cień migoczący z dużą częstotliwością. Zaznaczono, że turbiny, które zostaną zastosowane w elektrowni, będą obracać się z mniejszą częstotliwością, dzięki czemu efekt zostanie zredukowany u źródła. Przyjmuje się, że dla tej wysokości wieży efekt migotania cieni nie przekroczy promienia 300 m, a w tym promieniu nie ma terenów zamieszkałych [54].

Na stronie 115 raportu napisano, że generatory prądu stanowią źródło niejonizującego promieniowania elektromagnetycznego, które może być niebezpieczne dla organizmów żywych. Zaznaczono jednak, że generatory montowane w turbinach wiatrowych są szkodliwe w odległości kilku metrów, i to pod warunkiem, że promieniowanie jest długotrwałe. W przypadku mającej powstać elektrowni wiatrowej jej wysokość (75 m) oraz znaczna odległość od najbliższych terenów zamieszkałych (400 m) sprawiają, że będzie ona bezpieczna dla otoczenia [54].

W rozdziale 9.5.4 na stronie 115 raportu opisano przewidywane przypadki pracy w sytuacjach odbiegających od normalnych bądź wystąpienie poważnej awarii przemysłowej. Sytuacje awaryjne mogą się zdarzyć w przypadku bardzo silnych wiatrów bądź erozji fundamentu wieży. W ekstremalnych sytuacjach może to doprowadzić do przewrócenia wieży lub do ścięcia jednej z łopat wirnika. Sytuacjom ekstremalnym zapobiega ustawienie łopat wirnika pod kątem zapewniającym najmniejszy opór w przypadku bardzo silnych wiatrów. W razie potrzeby grunt pod wieżą może zostać ustabilizowany w celu zapobieżenia erozji. Zakładając mało prawdopodobną sytuację przewrócenia się wieży, to sięgnie ona około 75 m od fundamentu. W sytuacji ścięcia łopaty, według danych literaturowych może ona być odrzucona na trzykrotność całkowitej wysokości turbiny, czyli 225 m. Nawet tak duża katastrofa nie zagraża obszarom zamieszkałym znajdującym się 400 m od elektrowni. Podkreślono, że planowana elektrownia nie jest zakładem stwarzającym zagrożenie wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. Nie będą używane ani produkowane substancje niebezpieczne [54].

Opisano, że na etapie budowy inwestycji wystąpią zagrożenia związane z prowadzonymi pracami: naruszenie wierzchnich warstw gruntu oraz niezorgani-



wana emisja hałasu i pyłów w związku z dojazdem samochodów dostarczających materiały i elementy konstrukcji. Zagrożenia te będą krótkotrwałe, odwracalne i niepozostawiające trwałych śladów w środowisku. Dodatkowo zasięg ich oddziaływań będzie ograniczony. Zakłada się, że turbina wiatrowa będzie pracować przez minimum 20 lat. Prawdopodobnie po tym czasie turbina i wieża zostaną zastąpione bardziej nowoczesnymi. Uciążliwości związane z wymianą nie będą większe niż na etapie budowy. W przypadku likwidacji elektrowni wiatrowej należy przeprowadzić złomowanie konstrukcji, zlikwidować fundamenty oraz przeprowadzić rekultywację terenu w kierunku rolnym [54].

W rozdziale 9.6 na stronie 117 raportu podkreślono, że inwestycja nie będzie źródłem oddziaływań transgranicznych. Z kolei rozdział 10 ze strony 117 opisuje planowane działania mające na celu zapobieganie, ograniczanie lub kompensację przyrodniczą negatywnych oddziaływań na środowisko. Celem ochrony wód powierzchniowych, podziemnych oraz gruntu przewiduje się realizację zamkniętego systemu gospodarowania olejami w obrębie turbiny (wylimitowanie wycieków oleju i smaru z instalacji). Aby ograniczyć uciążliwość akustyczną, prowadzona będzie systematyczna konserwacja i naprawa urządzeń mechanicznych. W przypadku stwierdzenia przekroczeń dopuszczalnych wartości hałasu będą przeprowadzone działania mające na celu zmniejszyć uciążliwość akustyczną. W rozdziale tym ponownie jest omawiana gospodarka odpadami i oddziaływanie na obszary Natura 2000.

Krótki rozdział 11 ze strony 119 raportu informuje, że planowane przedsięwzięcie nie będzie zawsze znacząco oddziaływać na środowisko. Z kolei rozdział 12 z tej samej strony porównuje (w formie tabeli) czy proponowana inwestycja spełnia wymagania ustawy Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r. [53]. Wiele informacji jest tu powielanych, są jednak wymienione kruczki techniczne. Zastosowany pierścieniowy generator prądu przemiennego o dużej średnicy ma zapewnić dużą sprawność nawet przy niewielkiej sile wiatru. Strojarn generatora jest zbudowany w ramie agregatu prądotwórczego, natomiast bezpośrednio sprzęgnięte ze sobą wirniki: łopatkowy i prądniczy, są ułożyskowane na nieruchomym czopie stanowiącym element ramy. Łopaty wirnika są wykonane z żywicy epoksydowych, które znacznie lepiej znoszą duże obciążenie niż stosowane często żywice poliestrowe wzmocnione włóknem szklanym. System czujników badających chwilowy kierunek i siłę wiatru zapewni optymalne ustawienie gondoli i odpowiedni kąt natarcia łopat. Kąt natarcia decyduje o obrotach wirnika i optymalnym uzysku energii. W rozdziale zaznaczono, że realizowana inwestycja będzie współmierna z najlepszą dostępną techniką (BAT) stosowaną przy wykorzystaniu siły wiatru do produkcji energii elektrycznej. Planowana instalacja spełnia dyrektywy Unii Europejskiej, dotyczące odnawialnych źródeł energii [54].



Rozdział 13 na stronie 121 raportu jednoznacznie stwierdza, że zgodnie z ustaleniami ustawy Prawo ochrony środowiska [53], planowana inwestycja nie wymaga stworzenia obszaru ograniczonego użytkowania. Rozdział 14 z tej samej strony wymienia rysunki zawarte w raporcie.

Na stronie 122 w rozdziale 15 opisano analizę możliwych konfliktów społecznych związanych z planowanym przedsięwzięciem. Zaznaczono, że społeczeństwu przysługuje konstytucyjne prawo do życia w zdrowym środowisku, tj. niezagrażającym zdrowiu fizycznemu i psychicznemu. Analiza konfliktów społecznych na tle ekologicznym wskazuje, że najistotniejszą ich przyczyną jest całkowite ignorowanie lub lekceważenie społecznej percepcji zdarzeń ekologicznych. Często źródłem protestu jest nie tyle stopień uciążliwości inwestycji, ile sam sposób podejmowania decyzji, ignorujący daną społeczność lokalną. Celem badania opinii społecznej w procedurze oceny oddziaływania na środowisko jest dostarczenie informacji mieszkańcom oraz wzięcie pod uwagę ewentualnych propozycji alternatywnych. Najczęściej występują dwa typy konfliktów: bezpośredni i pośredni. Konflikty bezpośrednie to protesty mieszkańców użytkujących tereny przylegające do terenu inwestycji. Przy braku wiedzy o oddziaływaniu przedsięwzięcia oraz niezapoznaniu się z rzeczywistymi wynikami zagrożenia, popartymi pomiarami szkodliwego czynnika, konflikt bezpośredni musi wystąpić. W konflikt pośredni zaangażowane są osoby niezwiązane bezpośrednio z konkretną inwestycją, ale widzące zagrożenie w inwestycji jako takiej. Tego typu protesty stanowią jednak tylko niewielką część protestów i odwołań. Planowana inwestycja ma być szeroko konsultowana ze społecznością lokalną. W raporcie zwrócono uwagę na pozytywne aspekty budowy elektrowni wiatrowej. Produkcja energii odnawialnej jest tańsza i czystsza niż ze źródeł konwencjonalnych, co w sposób pośredni może zapewnić tańszą energię. Doświadczenia gmin, na terenie których wybudowano w Polsce farmy wiatrowe, dowodzą, że elektrownie wiatrowe pozytywnie wpływają na rozwój turystyki. Turbiny postrzegane są jako atrakcje turystyczne, a z czasem stają się lokalnymi symbolami [54].

Rozdział 16 na stronie 123 omawia propozycje monitoringu oddziaływania planowanego przedsięwzięcia na etapie realizacji i eksploatacji, czyli powtarzane są informacje opisane wcześniej w raporcie. W rozdziale 17 na stronie 125 wskazano, że podczas pisania raportu nie napotkano trudności wynikających z niedostatków techniki lub luk we współczesnej wiedzy.

W rozdziale 18 na stronie 126 raportu przedstawiono dane personalne osób sporządzających raport, rozdział 19 zaś to wykaz literatury, którą wykorzystano przy opracowywaniu raportu. Ostatni, 20 rozdział ze strony 129 to wnioski końcowe. Na stronie 131 znajduje się jeszcze załącznik nr 1 – dane do obliczeń i wyniki obliczeń poziomu hałasu, natomiast na ostatniej, 133 stronie, umieszczono załącznik 2 – graficzne przedstawienie wyników obliczeń [54].



4.9. Montaż elektrowni wiatrowej

Budowę farmy wiatrowej zaczyna się od przygotowania infrastruktury. Aby ciężarówki transportujące elementy wiatraków mogły dotrzeć do miejsca, gdzie stanie elektrownia, należy wybudować drogi dojazdowe (il. 14).



Il. 14. Gruntowe drogi dojazdowe do miejsca posadowienia wiatraka (fot. K. Bąk)

Następnie w miejscu, w którym stanie wiatrak, przygotowuje się wykop pod fundament wykonany ze zbrojonego betonu (il. 15).

W wykopany dole wylewa się tzw. chudziak – beton podkładowo-wyrównawczy klasy B7,5, B10 lub B15 (il. 16). Im wyższa klasa betonu, tym większa jego wytrzymałość. Następnie umieszcza się dolną kratę na wcześniej wylanym betonie. Kształt kraty zazwyczaj przypomina ośmiobok, sześciobok bądź okrąg (il. 16 i 17). Fundament każdego wiatraka sięga głęboko pod powierzchnię ziemi. Podstawę fundamentu stanowi betonowy okrąg, do którego mocowana jest konstrukcja stalowa oraz elementy zbrojenia. Po wykonaniu stalowego szkieletu jest on zalewany betonem, a następnie zasypywany ziemią.





Il. 15. Wykop pod fundament ze zbrojonego betonu (fot. K. Bąk)



Il. 16. Fundament pod elektrownię wiatrową (fot. K. Bąk)





Il. 17. Zbrojenie fundamentu pod elektrownię wiatrową (fot. K. Bąk)

Transport dużych części musi być odpowiednio zaplanowany, tak by bez przeszkód dojechały one na teren budowy. Transport nie powinien być uciążliwy dla społeczności lokalnej. Po wykonaniu fundamentów przykręcana jest do nich sekcja wieży, na której montuje się gondolę ze śmigłami za pomocą dźwigów (il. 18–20).



Il. 18. Montowanie gondoli (fot. K. Bąk)





Il. 19. Montowanie wirnika (fot. K. Bąk)



Il. 20. Gotowa elektrownia wiatrowa (fot. K. Bąk)



4.10. Scenariusze rozwoju aeroenergetyki

Polityka energetyczna Polski do 2030 r. [56] przewiduje podjęcie działań w kierunku wzrostu bezpieczeństwa energetycznego poprzez pełniejsze wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Program ten wymaga znaczących zmian legislacyjnych, umożliwiających rozwój infrastruktury sieci oraz budowę nowych mocy wytwórczych pochodzących z OZE.

Poprawa bezpieczeństwa energetycznego kraju jest jednym z 9 kierunków priorytetowych polityki morskiej RP, który został zawarty w dokumencie rządowym *Założenia polityki morskiej RP do roku 2020* [57]. W zakres tego priorytetu wchodzi rozwój morskiej energetyki wiatrowej. Dokument zwraca szczególną uwagę na kwestię lokalizacji farm wiatrowych i sieci dystrybucyjno-przesyłowych na wybranych obszarach morskich wód wewnętrznych oraz na potrzebę przeprowadzania badań w poszukiwaniu najdogodniejszych obszarów do ich lokalizacji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu inwestycji na środowisko i ekosystemy morskie, koszty inwestycji, eksploatacji i bezpieczeństwo morskie. Ponadto dokument zwraca uwagę na konieczność usprawniania procedur wydawania pozwolenia na wznoszenie konstrukcji w polskich obszarach morskich.

Krajowy plan działania w zakresie odnawialnych źródeł energii [32] zakłada trzy scenariusze rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce:

Scenariusz A

Jako scenariusz A założono rozwój energetyki wiatrowej w obecnym tempie – roczne przyrosty będą zwiększały się średniorocznie o 10%. Nie zakładano budowy farm wiatrowych na morzu ani rozwoju niewielkich instalacji.

Uzasadnienie: scenariusz ten zakłada, że nie uda się zlikwidować większości istniejących barier uniemożliwiających szybszy rozwój energetyki wiatrowej, w tym budowy farm offshore.

Ocena wykonalności scenariusza: jest sprzeczny z przyjętą polityką energetyczną Polski do 2030 r., nie zakłada likwidacji barier [32].

Scenariusz B

Jako scenariusz B przyjęto zmodyfikowany scenariusz z przyjętej *Polityki energetycznej Polski do 2030 roku*.

Uzasadnienie: jest spójny, dobrze uzasadniony, najlepiej poparty analizą uwarunkowań.

Ocena wykonalności scenariusza: duże szanse na realizację przy konsekwentnie realizowanej polityce gospodarczej, w tym polityce energetycznej.



W scenariuszu B założono wielkość mocy zainstalowanej w roku 2010 na poziomie 1100 MW. W latach 2011–2020 założono przyrost mocy zainstalowanej o 450 MW/rok (farmy wiatrowe na lądzie). Dodatkowo w roku 2020 założono możliwość oddania do eksploatacji farmy wiatrowej o mocy 500 MW na morzu. Przyjęto ponadto, że w latach 2013–2015 przyrost mocy będzie wynosił 60 MW/rok, w latach 2015–2019 odpowiednio 70 MW/rok, w roku 2020 zaś nastąpi wzrost mocy zainstalowanej o 80 MW [32].

Scenariusz C

Jako scenariusz C przyjęto projekt przygotowany przez Instytut Energetyki Odnawialnej dla Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej.

Ocena wykonalności scenariusza: Zrealizowanie pełnego katalogu ułatwień, w tym możliwości wyłączeń elementów sieciowych w zakresie niezbędnym do modernizacji i rozbudowy nie jest możliwe. Liczba możliwych wyłączeń elementów sieciowych w tym okresie, przy wzroście zapotrzebowania na energię elektryczną, będzie ograniczona z uwagi na konieczność utrzymania standardów niezawodnościowych dostaw energii dla odbiorców końcowych [32].

Według PSEW [58] rozwój morskich farm wiatrowych na polskich obszarach morskich niesie wymierne korzyści dla naszej gospodarki. Osiągnięcie 6 GW mocy w 2025 r. pozwoli na rozwój gospodarczy Polski dzięki realizowaniu zamówień w powiązanych sektorach i przełoży się na:

- osiągnięcie 73,8 mld PLN łącznej wartości dodanej;
- 14,9 mld PLN przychodów dla sektora finansów publicznych, w tym 12,2 mld PLN dla budżetu centralnego, 2,7 mld PLN dla samorządów;
- uniknięcie emisji około 40 mln Mg CO₂ oraz kosztów z tym związanych (około 1,6 mln PLN).

Z punktu widzenia aktywności Polski na arenie międzynarodowej oraz zachęcania zagranicznych przedsiębiorców do inwestowania właśnie w naszym kraju, niezwykle istotny jest wizerunek i reakcja na międzynarodowe trendy. Ochrona środowiska zajmuje bardzo ważne miejsce w polityce na całym świecie, motywuje do udoskonalania istniejących technologii i tworzenia nowych rozwiązań, tworzy grunt dla inwestycji, kreuje miejsca pracy, motywuje ośrodki naukowe. Według Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej [58] ważne jest, aby Polska wykorzystała szansę, jaką dają jej nowe trendy, prezentując się jako kraj innowacyjny, „zielony”, dbający o inwestorów zainteresowanych polskim rynkiem, kraj zainteresowany pozyskiwaniem *know-how* oraz dający szansę na wykorzystanie potencjału krajowego przemysłu. W związku z dynamicznym rozwojem morskiej energetyki wiatrowej oczekiwany jest znaczący spadek jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej, który może doprowadzić

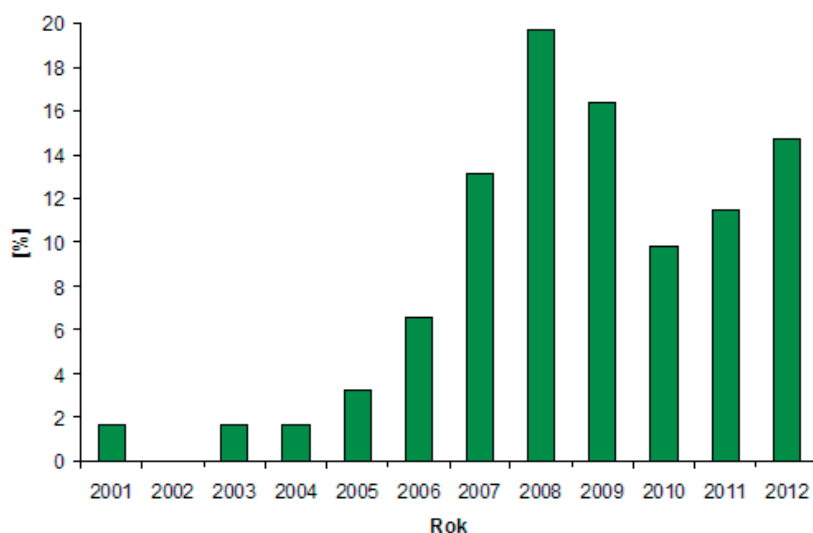


do sytuacji, w jakiej energetyka wiatrowa będzie jedną z najbardziej konkurencyjnych ekonomicznie technologii OZE. Wynika to głównie z korzystnego „uczenia się” sektora, zwiększenia skali inwestycji i poprawy produktywności farm wiatrowych.

4.11. Aeroenergetyka w Polsce – badania ankietowe

Przygotowano i wysłano ponad 100 ankiet socjometrycznych dotyczących aeroenergetyki w Polsce zarówno do właścicieli wiatraków/farm wiatrowych [59], jak i do firm zajmujących się sprzedażą/montażem siłowni wiatrowych [60].

Na ilustracji 21 przedstawiono, liczbę właścicieli (w procentach), którzy uruchomili swoje elektrownie wiatrowe. Widać, że od 2006 r. nastąpił „boom” wiatrakowy. Spadek w latach 2009–2010 był prawdopodobnie pokłosiem kryzysu. Od 2011 r. liczba stawianych wiatraków ponownie wzrasta.



Il. 21. Udział procentowy nowo stawianych wiatraków, na podstawie danych ankietowych

Ankietowani napisali, iż okres oczekiwania na inwestycję wynosi aż 2–6 lat, przy czym najczęściej są to 4 lata. Widać, że proces ten jest długotrwały i zależy przede wszystkim od wielkości planowanej farmy wiatrowej, a także od uzyskania niezbędnej dokumentacji (np. warunków przyłączenia do sieci, certyfikatów środowiskowych czy pozwolenia na budowę). Sam montaż trwa krótko, natomiast powyższe wytyczne wymagają zaangażowania i cierpliwości w procesie inwestycyj-



nym. Kilku ankietowanych dość mocno obnażyło „dyskryminację” energetyki wiatrowej w Polsce. Jako główne przeszkody wymieniają: brak ustawy o odnawialnych źródłach energii, skomplikowane procedury i długi okres uzyskania wymaganych zezwoleń oraz brak woli politycznej wspierania aeroenergetyki.

Ankietowani posiadają od 2 do 60 siłowni wiatrowych, często zlokalizowanych w różnych częściach kraju. Z sondażu wynika, że najczęściej inwestorzy mają 6 bądź 17 siłowni wiatrowych. Koszt turbiny zależał głównie od mocy i roku jej postawienia i wynosił od 5 do 10 mln zł/MW. Blisko połowa ankietowanych nie chciała odpowiedzieć na to pytanie.

Na pytanie, co było przyczyną podjęcia działalności, ankietowani odpowiedzieli, że:

- zyski z inwestycji – 46% ankietowanych,
- wzorowanie się na właścicielach innych farm – 20% ankietowanych,
- nowość na rynku polskim – 17% ankietowanych,
- chęć ochrony środowiska – 17% ankietowanych.

W mediach często pojawiają się informacje na temat licznych protestów społeczności lokalnej, związanych z aeroenergetyką, dlatego też zadano pytanie, czy ankietowani spotkali się z tym zjawiskiem. 42% respondentów borykało się ze sprzeciwem społeczności lokalnej lub/i grup ekologicznych. Pozostałe 58% nie miało problemów z budową swoich elektrowni. Kilku respondentów stwierdziło, że bardzo ważny jest właściwy dobór lokalizacji oraz edukacja i dialog ze społecznością lokalną.

Pomimo wielu trudności, jakie napotykają przedsiębiorcy lokujący kapitał w aeroenergetykę w Polsce, 86% ankietowanych jest zadowolonych z inwestycji. Dodatkowo blisko 75% ankietowanych ma w planach montaż kolejnych wiatraków.

Literatura

- [1] Z. Gloger, *Encyklopedia Staropolska Ilustrowana*, t. 4, Druk P. Laskauera i S-ki, Warszawa 1903.
- [2] S. Maływczycki, *Młynarstwo zbożowe*, Wyd. Arkonii, Warszawa 1890.
- [3] E. Sackiewicz, *Z dziejów młynarstwa w Polsce*, „Studia i Materiały Kultury Materialnej”, PWN, Warszawa 1957.
- [4] F. Klaczyński, *Wiatraki w Polsce*, „Rocznik Muzeum Narodowego Rolnictwa w Szreniawie”, t. 12, 1981, s. 27–65,
- [5] M. Demińska, *Przetwórstwo zbożowe w Polsce średniowiecznej (X–XIV wiek)*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1973.
- [6] J. Świąch, *Wiatraki. Młynarstwo wietrzne na Kujawach*, Oficyna Wydawnicza Włocławskiego Towarzystwa Naukowego, Włocławek 2001.



- [7] F. Klonowski, *Z historii inwentaryzacji wiatraków na Warmii, Mazurach i Powiślu*, „Rocznik Olsztyński” 1, 1958, s. 193–222.
- [8] Z. Gloger, *Encyklopedia staropolska ilustrowana*, t. 3, Druk P. Laskauera i S-ki, Warszawa 1902.
- [9] J. Święch, *Tajemniczy świat wiatraków*, „Łódzkie Studia Etnograficzne”, t. XLIV, Łódź 2005.
- [10] B. Baranowski, *Rozmiary i rejonizacja przemysłu młynarskiego w Polsce od XVI–XVIII wieku*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Łódzkiego” 1 (75), 1971, s. 15–37.
- [11] M. Pawlik, *Wiatraki północno-wschodniej Polski*, Dział Wydawnictw Filii Uniwersytetu Warszawskiego, Białystok 1984.
- [12] R. Wailes, *The English windmill*, Routledge & Kegan Paul, London 1954.
- [13] <http://wiatraki1.home.pl/wiatraki/info/typy.php> (wejście 07.01.2014).
- [14] U. Janicka-Krzywda, *Atrybut, patron, symbol, czyli co o świętych i błogosławionych powinien wiedzieć – przewodnik*, Oddział Akademicki PTTK, Kraków 1987.
- [15] D. Forstner, *Świat symboliki chrześcijańskiej*, Wyd. PAX, Warszawa 1990.
- [16] B. Baronowski, *Kultura ludowa XVII i XVIII wieku na ziemiach Polski środkowej*, Łódź 1971.
- [17] <http://regionwielkopolska.pl/kultura-ludowa/tance/wiatraki.html> (wejście 09.01.2014).
- [18] http://ck-smigiel.pl/go.php?fstrona=ciekawe_miejsca,0111 (wejście 09.01.2014).
- [19] <http://www.bibliotekapiosenki.pl/Wiatraki> (wejście 10.01.2014).
- [20] K. Jankowska, *Rozwój aeroenergetyki w Polsce*, praca magisterska, Toruń 2013.
- [21] <http://www.wiatraki.org.pl> (wejście 10.01.2014).
- [22] <http://mwmskansen.pl> (wejście 10.01.2014).
- [23] K. Kopecki, *Jutro energetyczne Polski*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1981.
- [24] J. Bogdanienko, *Odnawialne źródła energii*, Biblioteka Problemów PWN, Warszawa 1989.
- [25] H. Lorenc, *Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1996.
- [26] <http://www.imgw.pl> (wejście 26.10.2008).
- [27] G. Wiśniewski, K. Michałowska-Knap, S. Koć, *Energetyka wiatrowa – stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2012.
- [28] G. Wiśniewski (red.), *Określenie potencjału energetycznego regionów Polski w zakresie odnawialnych źródeł energii – wnioski dla Regionalnych Programów Operacyjnych na okres programowania 2014–2020*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2011.
- [29] G. Wiśniewski (red.), *[R]ewolucja energetyczna dla Polski. Scenariusz zaopatrzenia Polski w czyste nośniki energii w perspektywie długookresowej*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2008.
- [30] G. Wiśniewski (red.), *Morski wiatr kontra atom. Analiza porównawcza kosztów morskiej energetyki wiatrowej i energetyki jądrowej oraz potencjału tworzenia miejsc pracy*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2011.

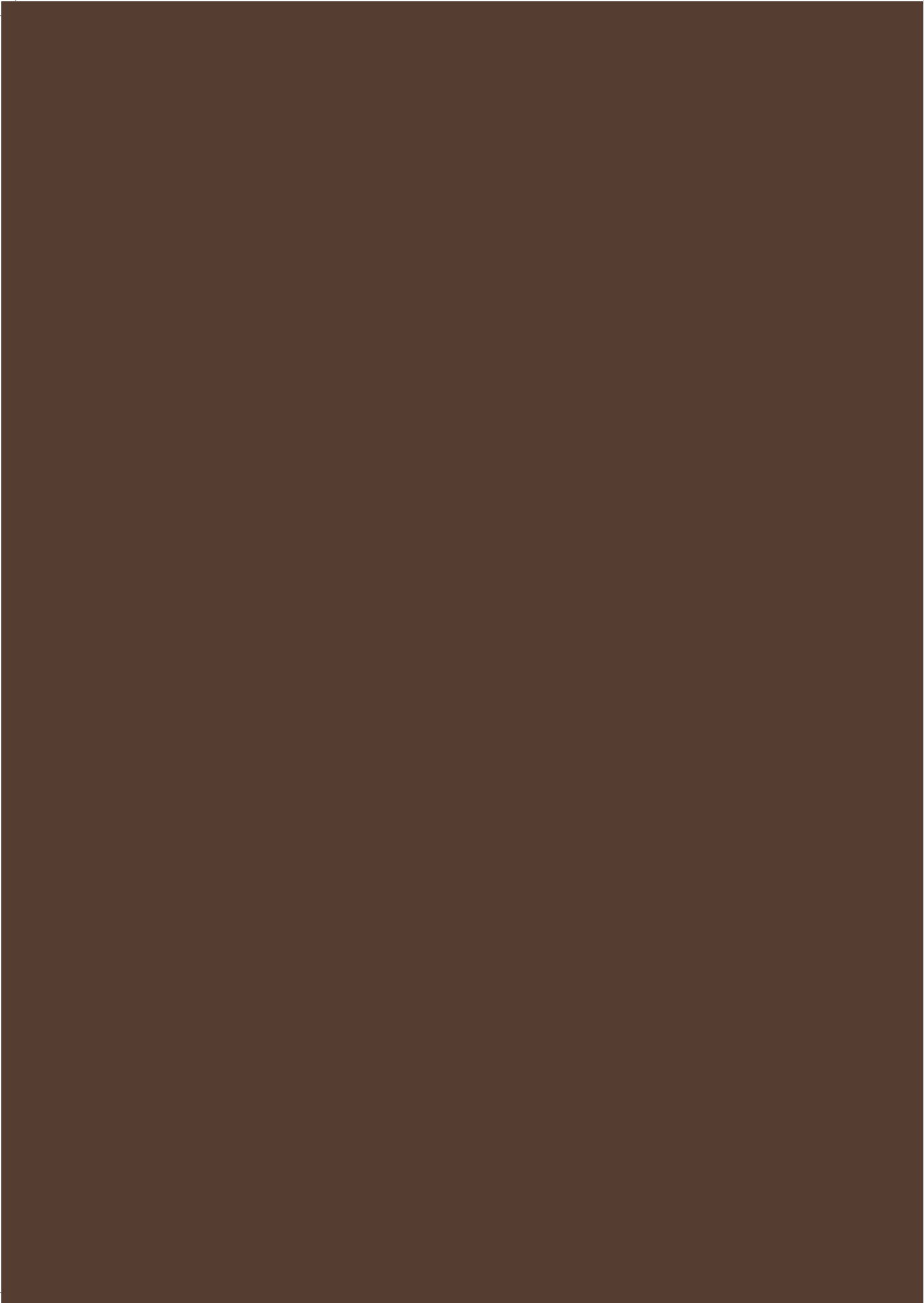


- [31] Urząd Regulacji Energetyki, *Mapa odnawialnych źródeł energii*, <http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html> (wejście 18.02.2014).
- [32] Minister Gospodarki, *Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych*, Warszawa 2010.
- [33] http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownie_wiatrowe_w_Polsce (wejście 20.01.2014).
- [34] J. Zimny, M. Laskowski, *Energetyczna farma wiatrowa Barzowice o mocy 5 MW*, http://pga.org.pl/biblioteka/artykuly/Energetyczna_Farma_Wiatrowa_Barzowice_o_mocy_5MW.pdf (wejście 20.01.2014).
- [35] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 grudnia 2005 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectwa pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej oraz zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii, Dz.U. Nr 261, poz. 2187.
- [36] <http://www.tauron-ekoenergia.pl/elektrownie/energia-z-wiatru/farma-wiatrowa-zagorze/Strony/start.aspx#ad-image-0>, http://pl.wikipedia.org/wiki/Farma_Wiatrowa_Zag%C3%B3rze (wejście 12.02.2014).
- [37] Zdjęcie z zasobów Wikimedia Commons.
- [38] <http://www.margonin.pl> (wejście 12.02.2014).
- [39] <http://www.ptmew.pl/posts/ruszyla-budowa-fabryki-bilfinger-crist-offshore-583.php> (wejście 12.02.14.)
- [40] <http://www.ptmew.pl/posts/podniesienie-bandery-na-vidarze-584.php> (wejście 12.02.2014).
- [41] I. Blanco, C. Kjaer, *Wind at work – wind energy job creation in the UE*, European Wind Energy Association, 2009.
- [42] <http://www.eurobserv-er.org/pdf/barobilan11.pdf> (wejście 13.02.2014).
- [43] G. Wiśniewski (red.), *Analiza możliwości rozwoju produkcji urządzeń dla energetyki odnawialnej w Polsce dla potrzeb krajowych i eksportu*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2010.
- [44] W. Sztuba i in., *Energetyka wiatrowa w Polsce*, Raport, listopad 2013, TPA Horwath, 2013.
- [45] K. J. Móraski, A. Zwolińska-Mańczak, *Analiza jakości postępowań w sprawach o wydanie decyzji środowiskowej dla lądowych elektrowni wiatrowych na terenie Polski*, Instytut Koźmiana, Warszawa 2013.
- [46] M. Stryjecki, *Energetyka wiatrowa w Polsce w 2007 r.*, https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_04/f3d54df577713c1793be9a70ba65a7aa.pdf (wejście 18.02.14.)
- [47] Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko, Dz.U. 2008 r, Nr 199, poz. 1227.
- [48] Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o Ochronie Przyrody, Dz.U. 2004, Nr 92, poz. 880.
- [49] http://www.ptmew.pl/media/projekty/websr2/przewodnik_inwestorzy_websr2.pdf (wejście 19.02.2014).



- [50] Ustawa z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej, Dz.U. z 2003, Nr 153, poz. 1503 (ujednolicone).
- [51] <http://www.pwea.pl/pl/energetyka-wiatrowa/offshore> (wejście 27.01.2014).
- [52] Polska Izba Gospodarcza Energetyki Odnawialnej, *Ocena ryzyka środowiskowego przy realizacji inwestycji w energetyce wiatrowej*, [ww.pigeo.org.pl/pliki/fck/Publikacje/Ocena Ryzyka Inwestycyjnego przy Realizacji Inwestycji w Energetyce Wiatrowej – Przewodnik dla Inwestorów.pdf](http://www.pigeo.org.pl/pliki/fck/Publikacje/Ocena_Ryzyka_Inwestycyjnego przy Realizacji Inwestycji w Energetyce Wiatrowej – Przewodnik dla Inwestorów.pdf) (wejście 27.01.2014).
- [53] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Dz.U. 2001, Nr 62, poz. 627.
- [54] M. Łangowska, *Raport o oddziaływaniu na środowisko planowanego przedsięwzięcia polegającego na budowie wolno stojącej elektrowni wiatrowej wraz z elementami towarzyszącymi na działce nr 249 i 248 (zjazd z drogi) położonych w obrębie miejscowości Łopatki gmina Książki, powiat wąbrzeski, województwo kujawsko-pomorskie*, Bydgoszcz 2009.
- [55] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, Dz.U. 2007, Nr 120, poz. 826.
- [56] Ministerstwo Gospodarki, *Polityka energetyczna Polski do 2030 r.*, Warszawa, 9 listopada 2009.
- [57] Międzyresortowy Zespół do Spraw Polityki Morskiej Rzeczypospolitej Polskiej, *Polityka morska Rzeczypospolitej Polskiej do roku 2020*, Warszawa 2013.
- [58] Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, *Stanowisko PSEW w sprawie morskiej energetyki wiatrowej*, www.psew.pl (wejście 27.01.2014).
- [59] Zakład Chemicznych Procesów Proekologicznych, *Aeroenergetyka w Polsce – inwestorzy*, Toruń 2013.
- [60] Zakład Chemicznych Procesów Proekologicznych, *Aeroenergetyka w Polsce – firmy*, Toruń 2013.







5. Aeroenergetyka na świecie

5.1. Żeglarstwo

Człowiek wykorzystuje wiatr do swoich celów od dawna. Dzięki temu możliwe były wielkie odkrycia geograficzne [1, 2]. Historia żeglarstwa sięga starożytności, od pradawnych czasów ludzie pływali po morzach i oceanach. Była to metoda poznawania świata, sposób transportu i podboju nowych terytoriów. W okolicach basenu Morza Śródziemnego archeolodzy odkryli pozostałości łodzi, które pochodzą już z V w. p.n.e. Na lata 3500–3400 p.n.e. szacuje się datę odkrycia żagli. Najstarsze malowidła przedstawiające żaglowce pochodzą z 3100 r. p.n.e. Pierwszą morską potęgą była Kreta na przełomie II i III w. p.n.e. Informacje na temat fenickich statków odnaleźć można w Biblii, przekazach Tukidydesa, Homera oraz Herodota. Naród ten, zamieszkujący nieprzyjazne, górzyste, niezbyt bogate w surowce terytorium, zmuszony był do ciągłego handlu i wymiany dóbr. Brak odpowiednich warunków do uprawiania rolnictwa wynagradzały Fenicjanom lasy pełne drzew zdatnych do budowy okrętów. Oprócz Fenicjan duże sukcesy na morzach odnosili w tym okresie także Egipcjanie, którzy rozpoczęli wymianę handlową z Kretą i Syrią. Około 2000 r. p.n.e. wybudowali kanał łączący Nil z Morzem Czerwonym. Sztukę budowy łodzi rozwinęli Grecy, a w późniejszym okresie także Rzymianie. Żaglowce służyły im nie tylko do handlu, ale także do potyczek zbrojnych i ekspansji terytorialnej (np.: bitwa pod Salaminą 483 r. p.n.e.) [1, 2].

Z czasem budowano coraz większe, szybsze i wyporniejsze jednostki. Oprócz sztuki budowy łodzi rozwijała się także nawigacja – szacuje się, że od 1302 r. n.e. używane były kompasy [3]. W latach 1405–1433 r. zorganizowano 7 chińskich ekspedycji odkrywczych pod dowództwem Zheng He do niemal wszystkich państw nad Morzem Chińskim i Oceanem Indyjskim. W wyprawach uczestniczyło w sumie 370 statków [1, 2].



W XV w. żaglowce były już na tyle obszerne, iż pozwalały na zabranie dość licznej załogi oraz zapasów pozwalających na bardzo długie rejsy. To właśnie żaglowce umożliwiły kolonizację ziem poza Europą. Jako pierwsi spróbowali jej w 1415 r. Portugalczycy, zdobywając Ceutę. Niedługo później powstał pierwszy ośrodek morski przeznaczony do szkolenia żeglarzy, planowania wypraw, a także gromadzenia map i informacji na temat Afryki. W latach 1497–1498, dzięki wyprawie Vasco da Gamy, nowożytni Europejczycy pierwszy raz dotarli do Indii [1–3].

Jednych z najważniejszych odkryć geograficznych dokonano w wyniku wypraw Krzysztofa Kolumba do Ameryki. Dnia 3 sierpnia 1492 r. karaka Santa María (il. 1) oraz dwie karawele – Pinta i Niña, na których przebywało łącznie około 90 ludzi, podniosły kotwice. Po postoju w Las Palmas na Wyspach Kanaryjskich 5 września eskadra statków ruszyła na zachód. Po ponad dwumiesięcznej żegludze, gdy już zaczęło dochodzić do głosu zniecierpliwienie, 12 października o 2⁰⁰ nad ranem jeden z marynarzy, Rodrigo de Triana, dostrzegł ląd. Wyprawa wylądowała prawdopodobnie na Wyspie Watlinga (zwanej przez Indian *Guanahani*), niewielkiej wyspie grupy Bahama. Następnie Kolumb obrał nowy kurs na południowy zachód i 28 października odkrył Kubę, a 6 grudnia Haiti (Hispaniołę), którą to wyspę, urzeczony jej pięknem, wybrał na swoją kwaterę. Gdy rozbił się okręt flagowy Santa María, a w czasie burzy stracono kontakt z Pintą, Kolumb postanowił dostarczyć wiadomość o odkryciu drogi do Ameryki na dwór królewski, wypływając na Niñi. Dnia 16 grudnia 1492 r., pozostawiwszy w ufortyfikowanym forcie Navidad na Hispanioli 43 ochotników z załogi, udał się w drogę powrotną. 15 marca 1493 r. zawinął do portu w Palos, skąd w triumfalnym pochodzie udał się na dwór królewski do Barcelony ze sprawozdaniem dla kastylijskich monarchów [4].

Kolejne wielkie odkrycie możliwe dzięki sile wiatru to opłynięcie kuli ziemskiej. Dnia 20 września 1519 r. flota pięciu statków z 270 członkami załogi pod dowództwem Ferdynanda Magellana wyruszyła na południowy zachód. Pierwszy postój odbył się na Wyspach Kanaryjskich, potem były Wyspy Zielonego Przylądka, skąd Magellan obrał kurs na Przylądek Świętego Augustyna w Ameryce Południowej. 20 listopada przekroczono równik, a 6 grudnia załoga zobaczyła brzegi Brazylii. Po blisko dwóch miesiącach postoju i uzupełnieniu zapasów żeglarze ruszyli w dalszą drogę. Magellan wciąż szukał przejścia na morza po drugiej stronie lądu amerykańskiego. Zimę postanowił spędzić u wybrzeży Argentyny. Bunt załogi i nieudane próby odnalezienia właściwej drogi wstrzymywały podróż. Przejście zostało odnalezione dopiero 21 października 1520 r. Cztery statki rozpoczęły powolne przedzieranie się przez liczące 372 mile przejście, które Magellan, z racji wpłynięcia na jej wody w Dzień Wszystkich Świętych, nazwał Cieśniną Wszystkich Świętych. Dziś ta cieśnina nosi jego imię i łączy Atlantyk z Pacyfikiem. Wyprawa skończyła się dla wielkiego podróżnika tragicznie. Zginął 27 kwietnia 1521 r.





Il. 1. Santa Maria – replika statku Krzysztofa Kolumba (skala 1:1), która znajduje się w Muzeum Arkadego Fiedlera [5]

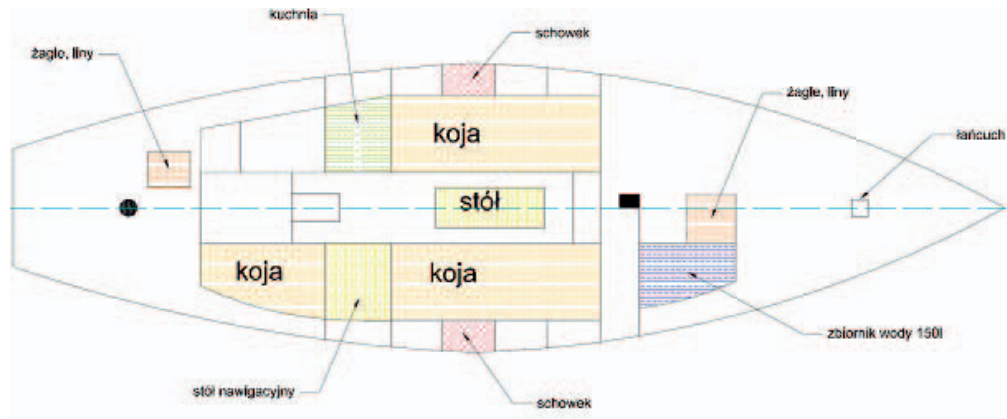
w potyczce z ludnością tubylczą na wyspie Mactan. Wraz z nim życie straciła część załogi. Pozostali żeglarze wycofali się z pola walki. Sami, bez swego przywódcy dotarli do Borneo, a potem do Wysp Korzennych. Powrócili do Hiszpanii na jednym statku, zdziśniętym, ale z ładunkiem, który okazał się cenniejszy niż złoto. Były to przyprawy. Człowiek, który zainwestował pieniądze w wyprawę Magellana, Cristobal de Haro, mimo poniesionych strat, został bogaczem. Około 26 ton goździków sprzedał za zawrotną sumę 8 mln maravedi, co dziś dałoby około miliona dolarów [6, 7]. Od 1621 r. pierwsi emigranci europejscy na statku przepływają Atlantyk i osiedlają się na stałe w Ameryce Północnej (Nowa Anglia). Jak wiemy, dało to początek Stanom Zjednoczonym Ameryki Północnej.

Kolejnych ważnych odkryć dokonał angielski żeglarz James Cook. Zorganizował i przeprowadził trzem wyprawom dookoła świata (1768–1780). W trakcie pierwszej z nich (1768–1771) zdobył wyspy Towarzystwa, spenetrował obszary Melanezji i Nowej Zelandii, dotarł do wybrzeży Australii (1779) i przepłynął cieśninę Torresa. Podczas drugiej (1772–1775) odkrył m.in.: Nową Kaledonię, archipelag Fidżi, wyspy w Polinezji (nazwane później jego imieniem) wyspy – Georgię Południową i Sandwich Południowy. Trzecia wyprawa (1776–1780), zorganizowana w celu odnalezienia przejścia morskiego z Oceanu Spokojnego na Ocean Atlan-



tycki, dotarła do wybrzeży Alaski, na Morze Czukockie oraz na Hawaje, gdzie Cook zginął w potyczce z tubylcami. Sporządzone przez niego mapy zmieniły wyobrażenie o zarysach lądów i mórz [1, 2, 8].

Warto choć parę słów napisać o polskich osiągnięciach w żeglarskim. W 1967 r. Leonid Teliga jako pierwszy Polak wyrusza na samotny rejs dookoła świata, na własnoręcznie zbudowanym jachcie „Opty” (il. 2). Zamknięcie pętli wokół kuli ziemskiej trwało 2 lata 13 dni 21 godzin 35 minut. W 1978 r. Krystyna Chojnowska-Liskiewicz jako pierwsza kobieta w historii żeglarskiego zamyka wokółziemską pętlę. Swoją samotny rejs kończy na miesiąc przed swoją rywalką Naomi James [9].



Il. 2. Uproszczony schemat żaglowca „Opty” (fot. Jakubtr [5])

O tym, że Polacy potrafią żeglować świadczą liczne medale przywożone z mistrzostw świata czy igrzysk olimpijskich. W 1996 r. Mateusz Kusznierewicz zdobył w Atlancie złoty medal olimpijski, zwyciężając rywalizację w klasie Finn, a w 2004 r. w Atenach, w tej samej klasie, zdobył brązowy medal [10].

5.2. Historia aeroenergetyki na świecie

W Indiach 400 lat p.n.e. powstał pierwszy opis zastosowania wiatraka do transportowania wody, a 200 lat p.n.e. w Chinach stosowano wiatraki w kształcie kołowrotów do nawadniania pól uprawnych. Na początku naszej ery wiatraki pojawiły się w krajach basenu Morza Śródziemnego. Rok 644 n.e. uznany został za datę pierwszej udokumentowanej wzmianki o wiatrakach. Od VI w. n.e. Persowie mielili ziarno, używając do tego celu młynów wiatrowych. W przeciwieństwie do



konstrukcji, które rozpowszechniły się w Europie, perskie wiatraki miały skrzydła poruszające się w płaszczyźnie poziomej na pionowym wale. W VIII w. w całej Europie pojawiły się wiatraki, w których wykorzystywano cztery skrzydła. Specjalistami w ich budowie byli Holendrzy. Na rok 1390 datuje się powstanie pierwszego czteroskrzydłowego wiatraka – holendra (wiatrak wieżowy), zbudowanego przez holenderskiego konstruktora Jana Andriasa Leeghwatera, aby usprawnić proces mielenia zboża (il. 3). Wiek XVII przyniósł w Europie upowszechnienie się wiatraka holenderskiego, mającego sztywną konstrukcję, ruchomą bryłę dachu o podstawie kołowej, która może się obracać, dzięki czemu skrzydła ustawiają się zawsze prostopadle do kierunku wiatru. Budynki holenderskich wiatraków drewnianych wznoszono na rzucie ośmioboku, a murowanych na rzucie koła [11].



Il. 3. Wiatrak wieżowy w Sønderho (Dania) [5]

W roku 1745 angielski konstruktor Edmund Lee wprowadza pomocnicze koło kierujące automatycznie wiatrak w stronę wiatru. W roku 1850 młyny napędzane energią wiatru pracowały z ogólną mocą około 1 TW. Pod koniec XIX w. rozwój maszyny parowej spowodował wyparcie napędu wiatrowego z wielu dziedzin życia



gospodarczego, co przyczyniło się do zastoju tej dziedziny techniki. W tym czasie na terenie Danii pracowało 30 tys. młynów, podobna liczba wiatraków była ówczesnie także w Holandii [11]. Nowy rozdział światowej energetyki to wykorzystanie energii wiatru do produkcji energii elektrycznej. Więcej informacji o drewnianych wiatrakach znajdują Państwo w rozdziale *Aeroenergetyka w Polsce*, a historia turbin wiatrowych została przedstawiona w rozdziale *Typy elektrowni wiatrowych*.

5.3. Współczesne wykorzystanie energii wiatru na świecie

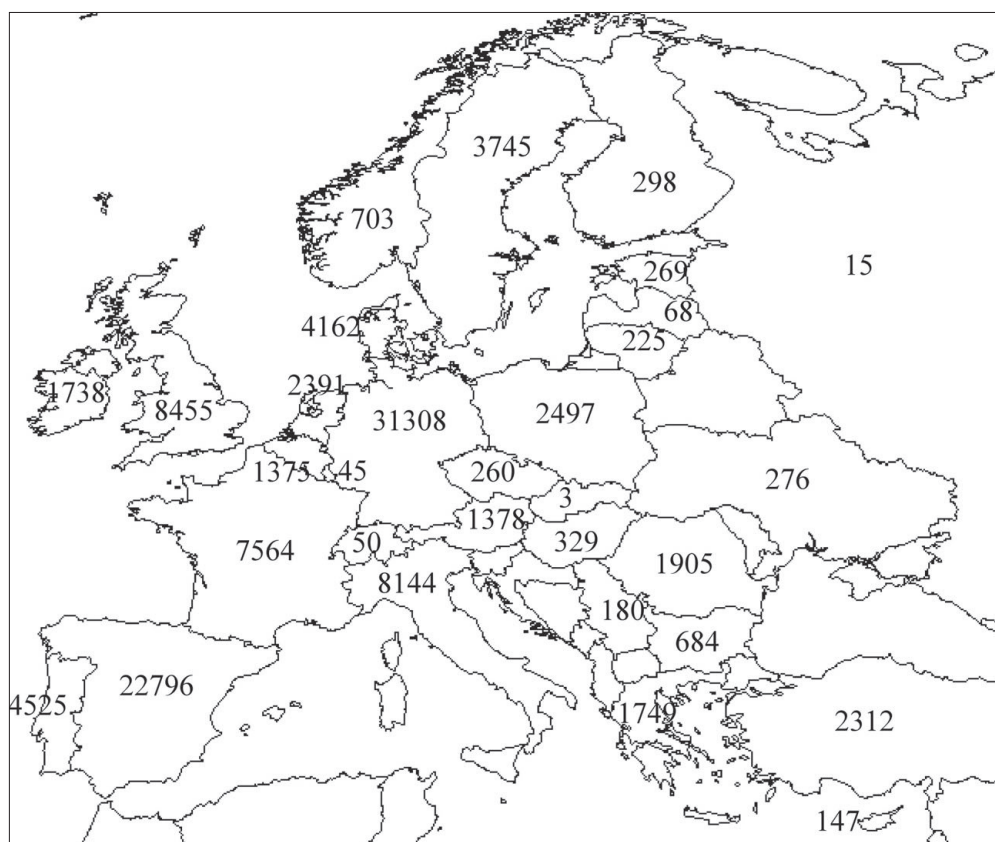
Energetyka wiatrowa odgrywa coraz większą rolę w światowej gospodarce. W latach 1990–2010 moc istniejących elektrowni wiatrowych zwiększyła się prawie 94-krotnie od poziomu 2170 MW do 197 039 MW. W 2010 r. sześć krajów wybudowało ponad 1 GW nowych mocy: Chiny (18,9 GW), USA (5,1 GW), Indie (2,1 GW), Niemcy (1,55 GW), Hiszpania (1,53 GW) oraz Francja (1,09 GW). Kolejnych pięć krajów wybudowało 500 MW lub więcej: Wielka Brytania (962 MW), Włochy (950 MW), Kanada (690 MW), Szwecja (604 MW), Rumunia (577 MW) oraz Turcja (528 MW) [12].

Ogólna tendencja wskazuje, że sektor energetyki wiatrowej poszerza swój udział w rynku. Coraz więcej krajów zwiększa poziom mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej. W 2010 r. energetyka wiatrowa była wykorzystywana komercyjnie w 83 krajach świata; 50 z nich zwiększyło w tym roku poziom mocy zainstalowanej [12].

W roku 2011 łączna moc elektrowni wiatrowych osiągnęła 238,4 GW, powstały też nowe farmy o łącznej mocy 40,6 GW, co przekłada się na 24% przyrostu. Największy przyrost mocy osiągnięto w Chinach (17,6 GW) oraz w USA (6,8 GW) [12]. Na koniec roku w Europie pracowały farmy wiatrowe o łącznej mocy wynoszącej 96,6 GW. Tylko w 2011 r. w Europie zainstalowano nowe farmy wiatrowe o mocy 9616 MW, analogicznie do 2010 r. (9648 MW). Według Europejskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej wartość tych projektów wyniosła 12,6 mln euro. W 2011 r. moc wszystkich elektrowni wiatrowych wzrosła o 35,5 GW do 895,9 GW.

Z kolei w 2012 r. zainstalowano 12,7 GW nowych mocy aeroenergetyki w Europie, z czego 11,9 GW dotyczy państw członkowskich UE. Na koniec roku łączna moc elektrowni wiatrowych zainstalowanych w Europie wynosiła 106 GW. W UE liderami pod względem skumulowanej mocy są Niemcy – 29,5%, Hiszpania – 21,5% i Francja – 7,5%. Europa jest obecnie największym rynkiem energii odnawialnej na świecie (38% światowej produkcji). Na ilustracji 4 przedstawiono moc aeroenergetyki w poszczególnych krajach Europy. Warto zauważyć, że mała Luksemburg ma trzy razy większą moc zainstalowaną niż Rosja [12].





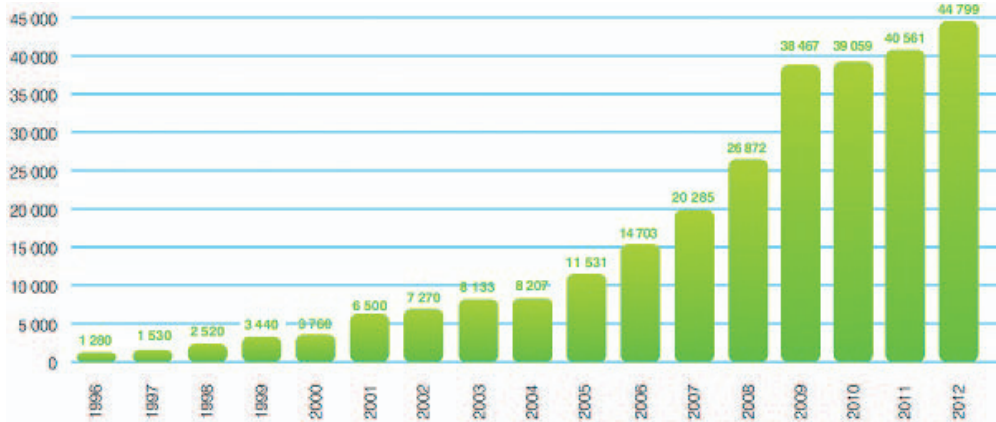
Il. 4. Moc elektrowni wiatrowych [MW] w Europie, opracowanie własne za [12]

Aeroenergetyka jest liderem wśród ekologicznego pozyskiwania energii na świecie [12]. Przez ostatnie 20 lat sektor ten rozwijał się dynamicznie i w każdym kolejnym roku instalowano więcej elektrowni wiatrowych niż w poprzednim. W 2012 r. zainstalowano 44,8 GW nowych mocy, o 20% więcej niż w 2011 r. (il. 5).

Łącznie na koniec 2012 r. moc elektrowni wiatrowych na świecie sięgnęła 282,6 GW – największy udział miały Chiny (26,7%), USA (21,2%) oraz Niemcy (11,1%). Pod względem dynamiki rozwoju w czołówce znalazły się te same państwa, jednak w innej konfiguracji – USA (29,3% nowych mocy), Chiny (28,9%) oraz Niemcy (5,4%) [12].

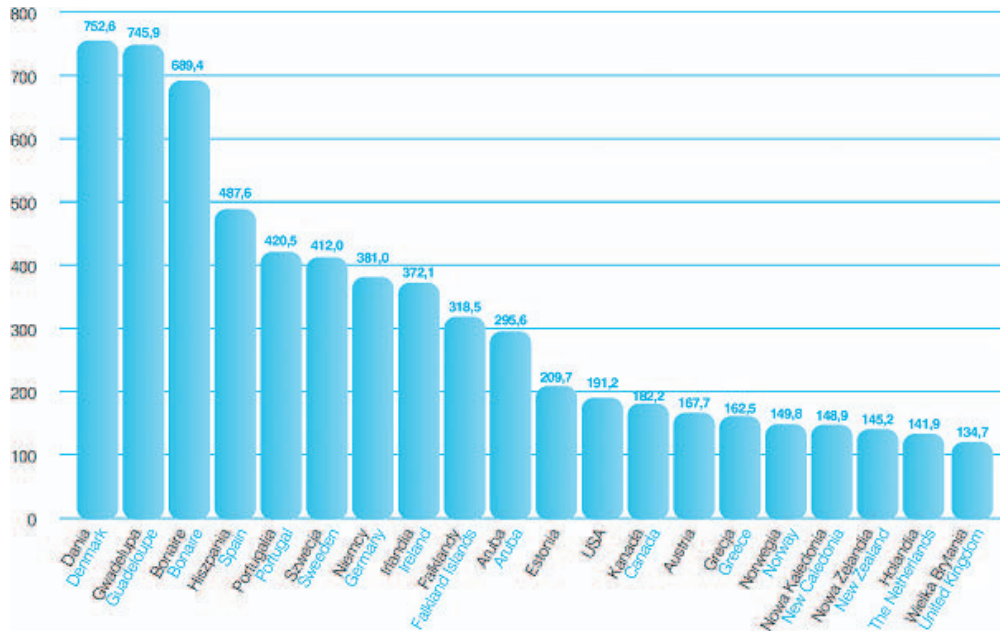
W połowie 2013 r. światowa moc zainstalowana w energetyce wiatrowej osiągnęła 296,255 GW (tab. 1) [13]. Obecnie największą moc elektrowni wiatrowych na świecie mają Chiny (80,8 GW), również w Chinach odnotowany największy wzrost mocy w pierwszej połowie 2013 r. (5,5 GW). Podczas powstawania niniejszej monografii (luty 2014) nie ma jeszcze oficjalnych danych za cały 2013 r., z pewnością światowa moc przekroczyła już 300 GW.





Il. 5. Wzrost mocy zainstalowanych [MW] rok do roku na świecie [12]

Na ilustracji 6 przedstawiono zainstalowaną moc farm wiatrowych na mieszkańca w 2012 r. Zdecydowanie prym wiodą: Dania, Gwadelupa i Bonaire. Według naszych obliczeń, w Polsce w 2012 r. na 1 mieszkańca przypadała moc 64,8 W [14].



Il. 6. Zainstalowana moc farm wiatrowych na mieszkańca w 2012 r. (W/mieszkańca) [14].



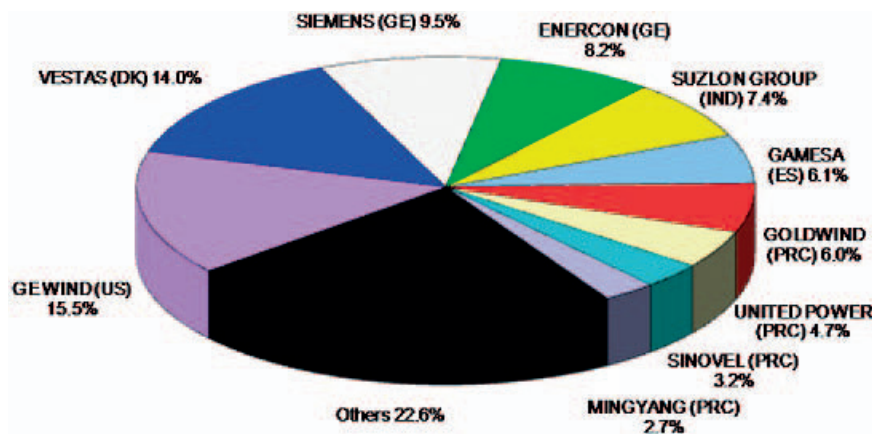
Tab. 1. Moc elektrowni wiatrowych na świecie [13]

Kraj	Moc na koniec 2012 r. [MW]	Moc zainstalowana do połowy 2013 r. [MW]	Moc w połowie 2013 r. [MW]
Chiny	75 324	5 500	80 824
USA	60 007	16	60 009
Niemcy	31 308	1 143	32 422
Hiszpania	22 785	122	22 907
Indie	18 321	1 243	19 564
UK	8 228	1 331	9 610
Włochy	8 152	273	8 415
Francja	7 623	198	7 821
Kanada	6 201	377	6 578
Dania	4 162	416	4 578
Portugalia	4 542	22	4 564
Szwecja	3 743	526	4 066
Australia	2 584	475	3 059
Brazylia	2 507	281	2 788
Japonia	2 614	41	2 655
Reszta świata	24 174	2 030	26 204
RAZEM	282 275	13 980	296 255

Warto również wspomnieć, że na świecie bardzo dobrze rozwija się rynek małych turbin wiatrowych. Szacuje się [13], że pracuje ich co najmniej 740 tys., przy corocznym wzroście wynoszącym 11%. Około 500 tys. małych turbin pracuje w Chinach, 151 tys. w USA, 20 tys. w Wielkiej Brytanii, 11 tys. w Kanadzie, 10 tys. w Niemczech, w Polsce zaś około 3,2 tys.

Jeśli chodzi o producentów elektrowni wiatrowych, to dotychczasowy lider duński Vestas musiał niedawno uznać wyższość amerykańskiej firmy GEwind (*GE Wind Energy*) (il. 7). Dziesięciu największych producentów turbin wiatrowych to przedsiębiorstwa z Chińskiej Republiki Ludowej. Na świecie ponad 100 przedsiębiorstw jest związanych z wytwarzaniem urządzeń na potrzeby energetyki wiatrowej [15].





Il. 7. Udział w rynku największych producentów elektrowni wiatrowych [15]

Rokrocznie wzrasta średnia moc turbin produkowanych na świecie. W 2011 r. średnia moc wyniosła 1,677 MW, w 2012 r. nastąpił wzrost o 170 kW do 1,847 MW. W 2012 r. turbiny wiatrowe o największej mocy produkowano w Danii, gdzie średnia moc wynosiła 3,080 MW [15].

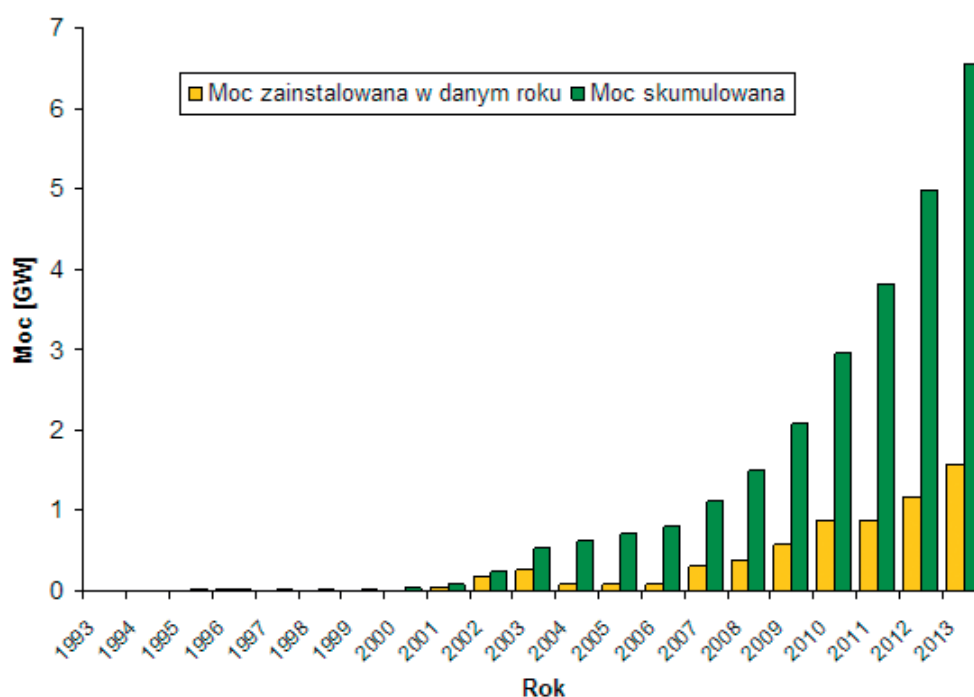
Do tej pory większość chińskich turbin wiatrowych była sprzedawana wyłącznie w Chinach, ale niektóre firmy rozpoczęły ekspansję poza terytorium tego kraju, przede wszystkim ze względu na nadwyżki podaży oraz ostrą konkurencję na rynku krajowym. Chińskie przedsiębiorstwa były bardzo widoczne podczas ostatnich Europejskich Targów Energetyki Wiatrowej – Husum 2010 oraz EWEA 2011. Niektóre z nich otworzyły swoje biura w Europie, np. Sinovel w Madrycie. Oczywiście jest, że wizja chińskich producentów turbin wiatrowych nie ogranicza się do sprzedawania urządzeń poza granicami ich kraju, ale polega na stworzeniu silnych ośrodków produkcyjnych na dużych rynkach oraz oferowaniu finansowania i eksploatacji farm wiatrowych. Pomimo rekordowej mocy zainstalowanej, wynoszącej 80,8 GW, Chiny wciąż zmagają się z poważnymi problemami z przyłączeniem. Chiński operator sieci, SGCC, szacuje, że do końca roku 2010 nie przyłączono do sieci farm wiatrowych o łącznej mocy około 15 GW. Mimo problemów, analitycy przewidują, że Chiny zwiększą poziom mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej do 300 GW do roku 2020 [16].

Według WWEA na koniec roku 2010 branża utrzymywała 670 tys. bezpośrednich oraz pośrednich miejsc pracy. Wielkość zatrudnienia w okresie ostatnich pięciu lat wzrosła ponad trzykrotnie. Prawdopodobnie obecnie branża energetyki wiatrowej zatrudnia ponad milion ludzi na całym świecie [16].



5.4. Rozwój aeroenergetyki morskiej

Morska energetyka wiatrowa jest nową technologią pozyskiwania energii elektrycznej. O ile pierwsze elektrownie na morzu stawiane były już w latach 90. XX w., o tyle znaczący wzrost mocy można zaobserwować od 2001 r. (il. 8). Ostatnie dziesięciolecie miało kluczowe znaczenie dla rozwoju farm wiatrowych na świecie. Pomimo lekkiego zahamowania w latach 2004–2006, już od 2007 r. widoczne jest znaczące zwiększenie tempa rozwoju morskiej energetyki wiatrowej [17–19].



Il. 8. Przyrost mocy aeroenergetyki morskiej na świecie
(opracowanie własne za [17–19])

Jeszcze niedawno największą moc aeroenergetyki morskiej posiadała Dania, będąca pionierem rozwoju technologii morskich farm wiatrowych. Od 2008 r. prym wiedzie Wielka Brytania. Obecnie $\frac{3}{4}$ mocy morskich farm wiatrowych znajduje się u wybrzeży Danii i Wielkiej Brytanii, należy jednak podkreślić, że wiele krajów jest bądź na etapie stawiania, bądź zaawansowanych planów budowy farm. Są to głównie Niemcy i Holandia i należy mieć nadzieję, że dołączy do nich również Polska [17–19].



W roku 2010 moc zainstalowana w morskiej energetyce wiatrowej zwiększała się ponad dwukrotnie szybciej niż w przypadku energetyki lądowej – stopa wzrostu wynosiła 59,4%. Niemniej jednak należy pamiętać, że wzrost następował z niskiego poziomu wyjściowego. Nowa moc zainstalowana w morskiej energetyce wiatrowej w wysokości 1,16 GW zwiększyła łączny poziom do 3,1 GW (1,6% łącznej mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej na świecie) [17–20].

Do 2010 r. projekty morskich farm wiatrowych koncentrowały się głównie na stosunkowo małych głębokościach (do 20 m) oraz obszarach bliskich lądu (do 20 km). Ciągły rozwój technologii oraz rosnące doświadczenie firm inwestujących w ten sektor energetyki powodują, że morskie farmy wiatrowe mogą być lokalizowane na obszarach coraz bardziej odległych od lądu i na coraz głębszych wodach. Dla projektów realizowanych w 2010 r. przeciętna głębokość morza wynosiła 17,4 m, a odległość od lądu 27,1 km, podczas gdy jeszcze w 2009 r. było to odpowiednio 12 m i 14,4 km. Farmy, które są obecnie na etapie konstrukcji, lokalizowane są średnio na głębokości 25,5 m, w odległości średnio 35,7 km od brzegu. Przewiduje się, że do roku 2030 standardem będzie lokalizacja na morzach o głębokości 60 m i w odległości 60 km od lądu. Istnieją też perspektywy zagospodarowania obszarów jeszcze bardziej odległych, nawet powyżej 60 km od lądu. Warto zwrócić uwagę, że wzrasta również średnia moc farmy. O ile w 2010 r. było to 72 MW, o tyle w 2011 r. już 155 MW. W sprzyjających warunkach wielkie, kilku- lub kilkunastogigawatowe projekty stworzą superwęzeł (ang. *supernode*) i umożliwią przesył energii elektrycznej do odbiorców z różnych krajów. Obiekty zlokalizowane na wodach o znacznej głębokości (ponad 60 m) będą prawdopodobnie wykorzystywane do budowy platform pływających, które na większą skalę pojawią się po 2020 r. Najnowsze koncepcje, rozważane zwłaszcza na Morzu Północnym, próbują połączyć realizację projektów na wodach głębokich oraz w dużej odległości od lądu (ang. *far deep offshore*) [17–21].

W technologii fundamentowania elektrowni wiatrowej na morzu dominuje technologia *monopole*, czyli siłownie typu jednopalowego. W miarę odsuwania farm w głąb morza, fundamenty będą wymagać większych udoskonaleń, najprawdopodobniej w kierunku konstrukcji typu *jacket*, czyli kratownicowego. Kolejne fazy rozwoju obejmują opracowanie technologii pływających platform, które będą sytuowane na wodach bardzo głębokich [21].

Dużym wyzwaniem jest opracowanie technologii transportu wyposażenia farm wiatrowych na miejsce ich montażu. Jest to skomplikowany proces logistyczny, który wymaga dużych jednostek transportowych oraz punktów przeładunkowych. Należy zaadaptować jednostki pływające do przewozu poszczególnych części konstrukcji. Kolejnym istotnym aspektem, z punktu widzenia rozwoju sieci morskich, jest infrastruktura przesyłu energii elektrycznej, do której zalicza się





Il. 9. Morska farma wiatrowa u wybrzeży Danii (fot. Paul Langrock, Greenpeace)

całe wyposażenie i okablowanie służące podłączeniu turbiny wiatrowej do sieci. Produkcja i instalacja okablowania należą do dość kosztownych inwestycji, ale zarówno lepsza jakość podłączenia morskich farm wiatrowych do sieci, jak i lepiej dostosowane do warunków morskich okablowanie, skutkują obniżeniem kosztów eksploatacji i poprawą niezawodności działania. Największym problemem jest zintegrowanie systemu przesyłowego sieci morskich z systemem przesyłu energii na lądzie. Obecnie najlepszą technologią w sieciach morskich jest *High Voltage Direct Current (HVDC)*, oferująca możliwość pełniejszej kontroli i zarządzania strumieniem wytwarzanej na morzu energii elektrycznej oraz niskie straty energii na przesyśle. Dzisiejsze technologie pozwalają na przesył na dużych dystansach (do 600 km) z gwarancją minimalnych strat, a mniejsze przekroje przewodów minimalizują koszty budowy i oddziaływanie na środowisko [19, 21].

Ze względu na znacznie wyższe prędkości wiatru w stosunku do lądu, produktywność morskich farm wiatrowych jest zdecydowanie wyższa niż lądowych. Dla przykładu w 2010 r. w Danii średni współczynnik wykorzystania mocy wyniósł 19,7% dla farm lądowych oraz 35,4% dla morskich farm wiatrowych (il. 9). Szacuje się, że w 2020 r. współczynnik ten wyniesie 45,5% [21, 22].



Koszty budowy morskich elektrowni wiatrowych są duże, lecz wraz z postępem technologii systematycznie spadają. Przykładowo koszty budowy farmy wiatrowej Baltic 2 wyniosły około 3500 euro/kW. W strukturze kosztów inwestycyjnych dominują ceny turbin, a także fundamentów oraz przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. W przypadku polskich morskich farm wiatrowych można spodziewać się niższych kosztów fundamentowania oraz przyłączenia do sieci elektroenergetycznej, a to ze względu na mniejszą głębokość i odległość od lądu [21, 23].

Obecnie na rynku turbin wiatrowych morskich działa 6 głównych dostawców: Siemens, Vestas, Repower, BARD, Multibrid i GE. Oferowane przez nich turbiny są w większości adaptacją konstrukcji lądowych. Warunki morskie pozwalają na swobodne traktowanie niektórych kwestii, takich jak estetyka turbiny czy normy emisji hałasu, tworzą jednak nowe wyzwania dla konstruktorów, zwłaszcza w zakresie ochrony przed korozją i niezawodności. Przeciętna moc zainstalowana turbiny wiatrowej na morzu wyniosła średnio 3,2 MW – większość producentów pracuje nad większymi siłowniami, o mocy 507 MW, które zostaną wprowadzone na rynek około 2015 r. Kolejne wprowadzane na rynek turbiny charakteryzują się coraz większymi wirnikami – dostępne są już turbiny o średnicy wirnika około 120 m, projektowane są także modele o wirnikach osiągających średnicę 150–160 m. Oczekuje się, że spowoduje to znaczący przyrost produktywności elektrowni wiatrowych o około 20% [21].

5.5. Największe na świecie lądowe farmy wiatrowe

W ustawodawstwie polskim farmą wiatrową nazywa się jednostkę wytwórczą lub zespół tych jednostek wykorzystywanych do wytwarzania energii elektrycznej z energii wiatru, przyłączonych do sieci w jednym miejscu przyłączenia [24]. Zwykle jest to instalacja złożona z wielu turbin wiatrowych, co pozwala na ograniczenie kosztów budowy i utrzymania oraz uproszczenie sieci elektrycznej. Farmy wiatrowe mogą być lokowane na lądzie lub poza lądem. Pierwszą farmę wiatrową zbudowała amerykańska firma U.S. Windpower (później Kenetech) w 1980 roku na zboczach Crotched Mountain w południowym New Hampshire. Farma składała się z 20 turbin o mocy 30 kW każda [25].

Obecnie (początek 2014 r.) największe lądowe farmy wiatrowe pracują w USA, Indiach, Rumunii i Chinach (tab. 2). Warto podkreślić, że właśnie USA stają się światowym liderem, jeśli chodzi o produkcję energii odnawialnej w dużych instalacjach, zarówno z wiatru (farmy wiatrowe) jak i ze Słońca (elektrownie słoneczne termiczne i fotowoltaiczne) [26].



Tab. 2. Lista największych lądowych farm wiatrowych [27]

Nazwa farmy	Położenie	Moc [MW]
Alta (Oak Creek-Mojave)	USA	1 320
Jaisalmer Wind Park	Indie	1 064
Shepherds Flat Wind Farm	USA	845
Roscoe Wind Farm	USA	781,5
Horse Hollow Wind Energy Center	USA	735,5
Capricorn Ridge Wind Farm	USA	662,5
Fântânele-Cogealac Wind Farm	Rumunia	600
Fowler Ridge Wind Farm	USA	599,8
Sweetwater Wind Farm	USA	585,3
Buffalo Gap Wind Farm	USA	533,3
Dabancheng Wind Farm	Chiny	500
Meadow Lake Wind Farm	USA	500
Panther Creek Wind Farm	USA	458

Od 2013 r. Alta Wind Energy Center w USA jest największą farmą wiatrową na świecie (il. 10). Budowa trwała od 2010 r. Farma daje zysk w wysokości ponad miliarda dolarów i zatrudnia kilkaset osób. Pracują tam następujące turbiny:

- 100×1,5 MW (Alta I),
- 50×3 MW (Alta II),
- 50×3 MW (Alta III),
- 34×3 MW (Alta IV),
- 56×3 MW (Alta V),
- 50×3 MW (Alta VI),
- 56×3 MW (Pinyon Pines I),
- 50×3 MW (Alta VIII),
- 44×3 MW (Pinyon Pines II) [28].

W skład farmy wiatrowej Jaisalmer Wind Park (Indie) wchodzi wiele turbin wiatrowych – pracują tam zarówno „stare” turbiny z 2001 r. o mocy 350 kW, jak i najnowsze S9X o mocy 2,1 MW. Z kolei farma wiatrowa Shepherds Flat Wind Farm (USA) została oficjalnie oddana do użytku we wrześniu 2012 r. W skład farmy wchodzi 338 turbin wiatrowych GE2.5XL o mocy 2,5 MW (il. 11) [29].





Il. 10. The Alta Wind Energy Center [5]



Il. 11. Shepherds Flat Wind Farm (fot. Steve Wilson [5])



Roscoe Wind Farm (USA) ma powierzchnię 40,5 tys. ha. Zamontowano 627 turbin, które zostały dostarczone przez trzy firmy: Siemens, Mitsubishi i General Electric. Koszt przedsięwzięcia wyniósł ponad miliard dolarów, a produkowana energia wystarcza do pokrycia potrzeb energetycznych ponad 250 tys. gospodarstw domowych w Teksasie. Z kolei Horse Hollow Wind Energy Center (USA) posiada 291 turbin o mocy 1,5 MW oraz 139 turbin o mocy 2,3 MW [http://en.wikipedia.org/wiki/Horse_Hollow_Wind_Energy_Center]. Największa w Europie farma wiatrowa, Fântânele-Cogealac Wind Farm w Rumunii posiada 240 2,5-megawatowych turbin (il. 12) [30].



Il. 12. Fântânele-Cogealac Wind Farm (fot. Sandri Alexandra Buzatu [5]).

W Europie Fântânele-Cogealac Wind Farm wyprzedziła pod względem mocy dotychczas „liderującą” hiszpańską farmę The Maranchon Wind Farm (il. 13). Farma, nazywana czasem „Manranchon Complex”, składa się z 7 mniejszych parków wiatrowych o łącznej mocy 208 MW [31].

Warto wspomnieć, że farmy wiatrowe budowane są na całym świecie. Na ilustracji 14 przedstawiono największą afrykańską farmę Dahr Saadane (Maroko). Uruchomiona w czerwcu 2010 r. składa się ze 165 turbin, każda o mocy 850 kW, co daje łączną moc 140,25 MW. Farma wytwarza około 525 GWh energii rocznie, co pozwala na uniknięcie emisji CO₂ na poziomie 370 tys. Mg [32].





Il. 13. The Maranchon Wind Farm (fot. Daniel Beltrá, Greenpeace)



Il. 14. Farma Dahr Saadane (fot. Markel Redondo, Greenpeace)



5.6. Największe na świecie morskie farmy wiatrowe

Jak już wcześniej wspomniano, od kilku lat rozwija się morska aeroenergetyka. Zainteresowanie inwestorów jest ogromne, wobec czego należy się spodziewać, że w najbliższym czasie będzie ona odgrywać znaczącą rolę.

Pierwszą morską farmę wiatrową North Hole Offshore Wind Farm uruchomiono w 2003 r. u wybrzeży północnej Walii na Morzu Irlandzkim (il. 15). Trzydzieści turbin wiatrowych o łącznej mocy 60 MW ma wysokość 40 m. Farma o powierzchni 10 km² zlokalizowana jest 7,5 km od brzegu, pomiędzy miejscowościami Rhyl i Prestatyn. North Hole Offshore Wind Farm dostarcza energię elektryczną do 50 tys. gospodarstw domowych. Warto nadmienić, że farma cieszy się dużą popularnością zarówno wśród turystów, jak i mieszkańców. Sondaże wskazują, że $\frac{3}{4}$ mieszkańców popiera morskie elektrownie wiatrowe, a 5% jest przeciw [33, 34].



Il. 15. North Hole Offshore Wind Farm (fot. Greenpeace, Webmaster International)

Warto wspomnieć o The Thanet Wind Farm, wiatrowej farmie morskiej uruchomionej w 2010 r. Farma zajmuje powierzchnię 35 km², 100 turbin o mocy 3 MW posadowionych jest na głębokości 14–23 m. W 2011 r. farma wyprodukowała 824 GWh energii, co pozwoliło osiągnąć sprawność na poziomie 31,35%. Ilość produkowanej energii pokrywa potrzeby energetyczne ponad 200 tys. gospodarstw domowych [35].



W tabeli 3 wymieniono największe morskie farmy wiatrowe. Niemal wszystkie powstały w 2012 r. bądź 2013 r., wszystkie zaś pracują w Europie (przeważnie u wybrzeży Wielkiej Brytanii).

Tab. 3. Lista największych morskich farm wiatrowych [36]

Nazwa farmy	Rok otwarcia	Położenie	Model/e turbin	Moc [MW]
London Array	2013	Wielka Brytania	175 × Siemens SWT-3.6	630
Greater Gabbard Wind Farm	2012	Wielka Brytania	140 × Siemens SWT-3.6	504
Anholt	2013	Dania	111 × Siemens 3.6-120	400
BARD Offshore 1	2013	Niemcy	80 × BARD 5.0	400
Walney	2012	Wielka Brytania	102 × Siemens SWT-3.6	367
Thorntonbank	2013	Belgia	6 × 5MW REpower, 48 × 6.15MW REpower	325
Sheringham Shoal	2012	Wielka Brytania	88 × Siemens3.6-107	315
Thanet	2010	Wielka Brytania	100 × Vestas V90-3MW	300
Lincs	2013	Wielka Brytania	75 × 3.6MW	270
Horns Rev II	2009	Dania	91 × Siemens 2.3-93	209

Obecnie największą morską farmą wiatrową na świecie jest London Array o mocy 630 MW. Farma posiada 175 turbin, a wytworzony prąd zasila Londyn. Farma znajduje się około 20 km od wybrzeży Kent u ujścia Tamizy. Druga farma morska pod względem mocy, Greater Gabbard Wind Farm, ulokowana jest 23 km od wybrzeży Suffolk (Anglia). Pracuje tam 140 turbin SWT3.6-107 o łącznej mocy 504 MW [37, 38]. Z kolei duńska farma Anholt Offshore Wind Farm znajduje się w cieśninie Kattegat, pomiędzy wyspami Djursland i Anholt, 21 km od brzegu. Jej budowa rozpoczęła się w styczniu 2012 r., pierwszą turbinę połączono z duńskim systemem elektroenergetycznym we wrześniu 2012 r., a pełną moc farma osiągnęła w czerwcu 2013 r. Obecnie pracuje tam 111 turbin o mocy 3,6 MW Siemens Wind Power [39]. Nasi zachodni sąsiedzi natomiast zbudowali farmę BARD Offshore 1 na Morzu Północnym. Na farmie oddalonej 100 km od lądu pracuje 80 turbin BARD o mocy 5 MW (il. 16) [40].





Il. 16. BARD Offshore 1 [5]

Przyszłość aeroenergetyki należy prawdopodobnie do morskich farm wiatrowych. Posadowione w odpowiednich miejscach, są wydajniejsze niż lądowe farmy wiatrowe oraz w mniejszym stopniu oddziałują na środowisko i krajobraz. Już wkrótce farmy wiatrowe będą dorównywać mocą największym elektrowniom konwencjonalnym.

Literatura

- [1] J. Favier, *Wielkie odkrycia od Aleksandra do Magellana*, Oficyna Wydawnicza „Wolumen”, Warszawa 1996.
- [2] A. Piskozub, *Morze w dziejach cywilizacji*, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 1998.
- [3] <http://student.agh.edu.pl/~pozniak/historia.html> (wejście 04.02.2014).
- [4] M. Ruggero, *Krzysztof Kolumb*, Wyd. Świat Książki, Warszawa 2009.
- [5] Fotografia z zasobów Wikimedia Commons.



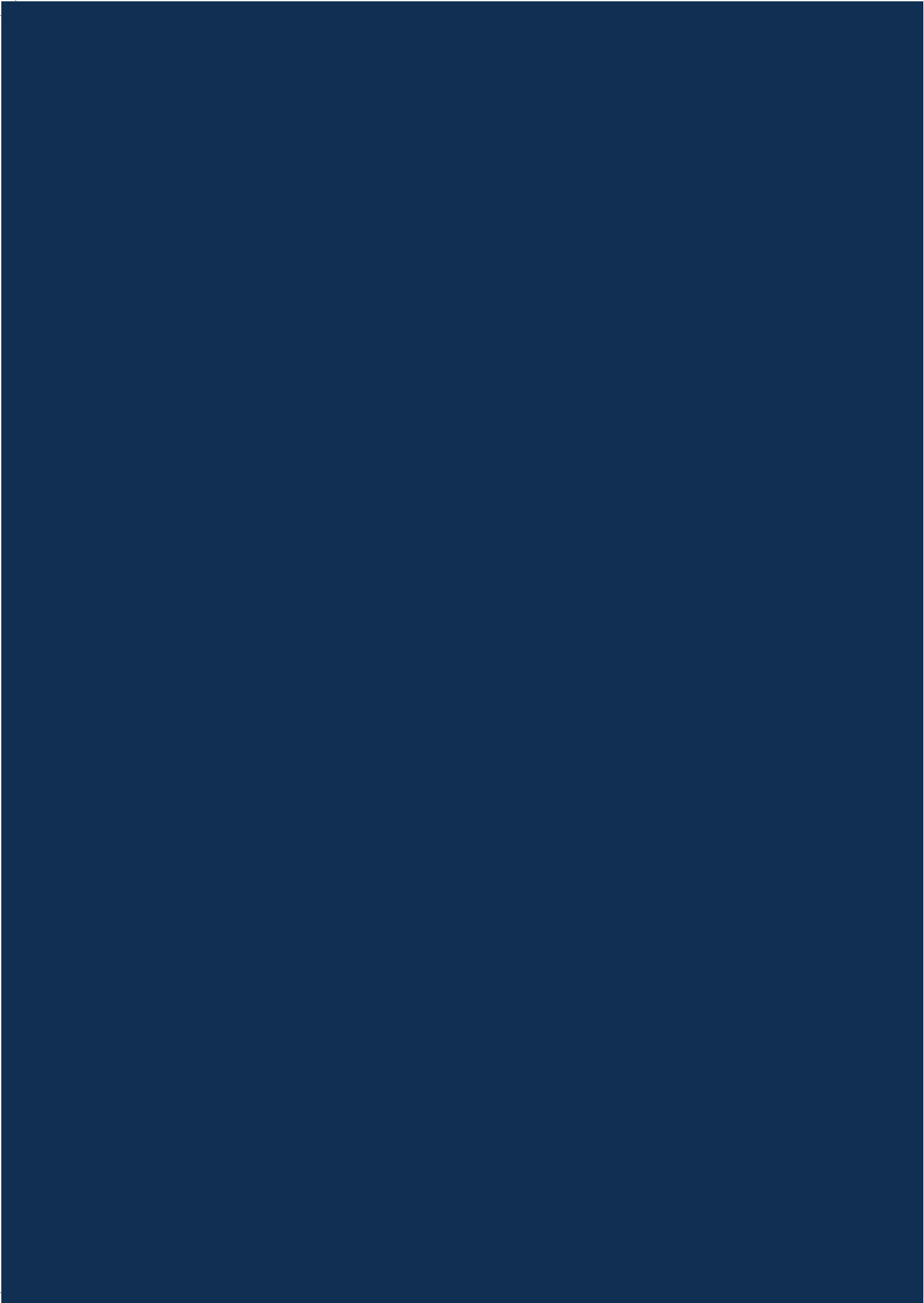
- [6] S. Zweig, *Magellan*, Wyd. Śląsk, Katowice 1984.
- [7] <http://www.polskieradio.pl/39/156/Artykul/733444,Dookola-swiata-wielkie-odkrycie-Ferdynanda-Magellana> (wejście 04.02.2014).
- [8] http://portalwiedzy.onet.pl/45452,,,,cook_james,haslo.html (wejście 04.02.2014).
- [9] L. Teliga, *Samotny rejs „Opty”*, Wyd. Morskie, Gdańsk 1976.
- [10] <http://www.programedukacjimorskiej.pl/abc-zeglarstwa/pem-subp-abc-article1> (wejście 05.02.2014).
- [11] http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodlu_en/files/rozwoj.htm (wejście 04.02.2014).
- [12] W. Sztuba i in., *Energetyka wiatrowa w Polsce*, TPA Horwath Raport, październik 2012.
- [13] The World Wind Energy Association, *2013-half-year Report*, WWEA Head Office, Bonn 2013.
- [14] The World Wind Energy Association, *2012 Annual Report*, WWEA Head Office, Bonn 2013.
- [15] B. T. Madsen et al., *Word Market Update 2012*, International Wind Energy Development. Forecast 2013–2017, Navigant Consulting, Inc., Boulder 2013.
- [16] <http://www.pwea.pl/pl/energetyka-wiatrowa/ewi-na-swiecie> (wejście 06.02.2014).
- [17] <http://www.ewea.org> (wejście 06.02.2014).
- [18] A. J. Wiczorek et al., *A review of the European offshore wind innovation system*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 26, 2013, s. 294–306,.
- [19] Md. R. Islam, Y. Guo, J. Zhu, *A review of offshore wind turbine nacelle: Technical challenges and research and development trends*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 33, 2014, s. 161–176.
- [20] M. Esteban, D. Leary, *Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy*, “Applied Energy” 1 (90), 2011, s. 128–136.
- [21] G. Wiśniewski (red.), *Morski wiatr kontra atom. Analiza porównawcza kosztów morskiej energetyki wiatrowej i energetyki jądrowej oraz potencjału tworzenia miejsc pracy*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2011.
- [22] Duński Krajowy Plan Działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych., http://ec.europa.eu/energy/renewables/transparency_platform/doc/national_renewable_energy_action_plan_denmark_en.pdf (wejście 12.02.2014).
- [23] M. MacDonald, *Costs of low-carbon generation technologies*, Committee for Climate Change, 1 maja 2011, Brighton, UK.
- [24] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz.U. z 2007 r., Nr 93, poz. 623.
- [25] <http://www.umass.edu/windenergy/about.history.alumni.php> (wejście 13.02.2014).
- [26] B. Igliński i in., *Technologie helioenergetyczne*, WN UMK, Toruń 2013.
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm (wejście 13.02.2014).
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Alta_Wind_Energy_Center (wejście 13.02.2014).
- [29] http://en.wikipedia.org/wiki/Jaisalmer_Wind_Park (wejście 13.02.14).



- [30] http://en.wikipedia.org/wiki/F%C3%A2nt%C3%A2nele-Cogalac_Wind_Farm (wejście 14.02.2014).
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Maranchon_Wind_Farm (wejście 14.02.2014).
- [32] http://www.saharawind.com/index.php?Itemid=55&id=38&option=com_content&task=view&lang=en (wejście 14.02.2014).
- [33] <http://www.greenpeace.org/international/en/news/features/uk-launches-first-of-fshore-win> (wejście 14.02.2014).
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/North_Hoyle_Offshore_Wind_Farm (wejście 15.02.2014).
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Thanet_Wind_Farm (wejście 15.02.2014).
- [36] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm (wejście 15.02.2014).
- [37] http://en.wikipedia.org/wiki/London_Array (wejście 15.02.2014).
- [38] <http://www.londonarray.com> (wejście 15.02.2014).
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Anholt_Offshore_Wind_Farm (wejście 15.02.2014).
- [40] <http://www.bard-offshore.de/> (wejście 18.02.2014).









6. Oddziaływanie elektrowni wiatrowych na środowisko

Do niedawna energia elektryczna pozyskiwana z siły wiatru była uważana za ekologicznie „czystą”. W ostatnich latach jednak, coraz więcej mówi się o tym, że niewłaściwie zlokalizowana siłownia/farma wiatrowa, jak każda duża inwestycja infrastrukturalna, może być źródłem negatywnych oddziaływań na człowieka, zwierzęta, środowisko i krajobraz. Dlatego niezwykle ważne jest, aby na etapie wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych zarówno deweloperzy (inwestorzy), jak i właściwe organy administracji państwowej i samorządowej, dokonywali rzetelnego prognozowania wpływu planowanych przedsięwzięć na otoczenie.

6.1. Wpływ elektrowni wiatrowych na człowieka

Bardzo bliskie sąsiedztwo turbin wiatrowych, a w szczególności emitowany przez nie hałas i infradźwięki wywołują zespół symptomów, który określa się czasami jako „syndrom turbin wiatrowych”. Dolegliwości pojawiają się wraz z uruchomieniem elektrowni i są to:

- bóle głowy,
- zaburzenia snu,
- zawroty głowy i zaburzenia równowagi,
- nudności,
- kłopoty z koncentracją i drażliwość.

Nie wszystkie osoby mieszkające w pobliżu turbin wiatrowych odczuwają powyższe symptomy, które wraz ze wzrostem odległości od elektrowni wiatrowej zanikają [1, 2].



Pracująca siłownia wiatrowa wytwarza hałas pochodzenia aerodynamicznego (wynikający z ruchu skrzydeł wirnika) oraz mechanicznego (powodowany przez pracę generatora i przekładni). W nowoczesnych typach elektrowni hałas pochodzenia mechanicznego został zredukowany praktycznie do zera (poprzez zmiany w konstrukcji urządzenia oraz wprowadzenie odpowiedniej izolacji akustycznej gondoli elektrowni wiatrowej), a jedyny problem stanowić może dźwięk wytwarzany przez poruszający się wirnik. Prowadzone są dalsze badania/prace nad ograniczeniem poziomu hałasu aerodynamicznego, obejmujące np. poprawę właściwości aerodynamicznych skrzydeł elektrowni. Producenci elektrowni wiatrowych dostarczają dla każdego typu urządzenia informacje o poziomie dźwięku emitowanego u źródła. Zwykle dla dużych elektrowni jest to poziom 98–106 dB, przy czym niekiedy oferuje się, na życzenie nabywcy, dodatkowe ograniczenie emisji dźwięku kosztem prędkości wirnika. W miarę oddalania się od źródła dźwięk słabnie i zwykle w odległości 300 m od elektrowni nie przekracza 50 dB [1, 2].

Przy projektowaniu rozmieszczenia elektrowni wiatrowych w terenie używa się specjalistycznego oprogramowania, które umożliwia nie tylko ich optymalną lokalizację w celu uzyskania maksymalnej produkcji energii, ale prognozuje także poziom hałasu w otoczeniu farmy wiatrowej. Jeśli obliczenia wskazują, że może zostać przekroczony dopuszczalny poziom dźwięku, możliwa jest zmiana lokalizacji do momentu uzyskania satysfakcjonujących rezultatów. Program umożliwia także sprawdzenie natężenia dźwięku w konkretnym punkcie, takim jak np. pobliski dom mieszkalny. Już w odległości 300 m od elektrowni wiatrowej hałas jest porównywalny z hałasem w pomieszczeniach biurowych [3].

Ogólnie elektrownie wiatrowe generują dźwięk mieszczący się w strefie dźwięków cichych. W bezpośrednim sąsiedztwie elektrowni wiatrowej możliwa jest normalna rozmowa bez podnoszenia głosu. Pewne problemy może stwarzać fakt, że elektrownie wiatrowe z reguły są lokalizowane na terenach pozamiejskich, gdzie naturalny poziom dźwięku jest bardzo niski. Wówczas jednostajny szum emitowany przez elektrownie może być odbierany przez mieszkańców jako uciążliwy. Należy sobie zdawać sprawę, że w warunkach naturalnych wiatr powoduje powstawanie dźwięków, np. szum drzew, dźwięk wywołany opływem przeszkód. Elektrownia wiatrowa rozpoczyna pracę przy pewnej określonej prędkości wiatru (zwykle 4–5 m/s), której towarzyszą już pewne naturalne efekty akustyczne (tło), wzmagające się w miarę wzrostu siły wiatru [4].

Katsaprakakis [5] badał, jak zmienia się natężenie dźwięku w zależności od odległości od siłowni wiatrowej (tab. 1). Jak widać, bardzo ważne jest, aby turbina wiatrowa jak najmniej hałasowała. Odległość niezbędna, aby poziom hałasu obniżył się do tego samego poziomu, jest 2–3-krotnie większa dla turbiny emitującej dźwięk 105 dB niż dla turbiny emitującej dźwięk 95 dB.



Tab. 1. Zmiana natężenia dźwięku w zależności od odległości od siłowni wiatrowej [5]

Emitowany dźwięk [dB]	Odległość [m] niezbędna, aby dźwięk wyniósł		
	45 dB	40 dB	35 dB
95	120	200	350
100	200	350	575
105	350	575	775

Oprócz hałasu w zakresie słyszalnym, turbiny wiatrowe generują infradźwięki, czyli fale w zakresie częstotliwości mniejszych od słyszalnych, oraz hałas niskoczęstotliwościowy (do 500 Hz) [6]. W zakresie infradźwięków dominują częstotliwości 1–5 Hz. Infradźwięki są falami bardzo długimi, rozprzestrzeniającymi się na wiele kilometrów. Na skutek rezonansu i małej skuteczności ich ekranowania są powodem znacznej uciążliwości w budynkach mieszkalnych położonych w bliskim sąsiedztwie elektrowni wiatrowych [6].

Elektrownia wiatrowa jako ruchoma konstrukcja wielkiej skali wprowadza do otoczenia pewne efekty optyczne. Są to głównie efekt stroboskopowy i efekt przemieszczającego się cienia. Efekt stroboskopowy powodowany jest odbijaniem się światła od poruszających się skrzydeł, co skutkuje powstawaniem krótkich błysków. Obecnie jednak efekt stroboskopowy nie jest uznawany za problem znaczący, gdyż został on praktycznie wyeliminowany przez zastosowanie matowych powłok i farb, które zapobiegają odbiciom światła [7]. Ponadto w literaturze medycznej nie stwierdzono negatywnego wpływu efektu stroboskopowego na zdrowie człowieka. Innym efektem są ruchome cienie (*shadow flickers*). Zjawisko migotania cieni zależy m.in. od liczby śmigieł turbiny oraz prędkości ich obrotów. Czasem pojawiają się hipotezy, że migotanie cieni może mieć negatywne skutki dla zdrowia, na przykład wywołać atak padaczki u ludzi chorych na epilepsję. Są to jednak przypuszczenia niepoparte badaniami naukowymi [8].

Warto zaznaczyć, że nawet w opracowaniach naukowych pojawiają się sprzeczne informacje na temat wpływu turbin wiatrowych na człowieka i środowisko. Na podstawie badań prowadzonych od 2004 r. na grupie 38 osób (od niemowląt do osób w wieku 75 lat) Pierpont [9] uznała, że turbiny wiatrowe są przyczyną występowania zespołu objawów, na który składają się: zaburzenie i pogorszenie jakości snu, ból głowy, szum w uszach, ciśnienie w uchu, zawroty głowy, nudności, pogorszenie ostrości widzenia, tachykardia, drażliwość, problemy z koncentracją.



cją i pamięcią oraz napady paniki, związane z uczuciem przemieszczania się lub drżenia wewnątrz ciała, które pojawia się zarówno w czasie snu, jak i na jawie. Publikacja Pierpont stała się przedmiotem krytyki środowisk technicznych i – postulowana w niej jednostka chorobowa oraz wywołujące ją przyczyny nie zostały potwierdzone naukowo [10]. Zwolennicy pozyskiwania energii z wiatru zarzucają Pierpont, że nie udowodniła w sposób wiarygodny związku przyczynowo-skutkowego pomiędzy generowanymi przez turbiny dźwiękami a oddziaływaniami zdrowotnymi na osoby żyjące w ich pobliżu. Jej praca nie uzyskała pozytywnej recenzji uznanego wydawnictwa naukowego, przyjęta do badań grupa 38 osób była zbyt mała, badane osoby zostały wybrane przez autorkę i nie przeprowadzono badań na grupie kontrolnej. Wnioskom wysuniętym przez Pierpont zarzucono, że są oparte na wadliwie przeprowadzonych badaniach i błędnej analizie, jej publikacja nie może być zatem wiarygodna [10].

Należy kontynuować badania nad wpływem turbin wiatrowych na człowieka oraz tak je konstruować i stawiać w terenie, aby ich oddziaływanie było jak najmniejsze.

6.2. Wpływ elektrowni wiatrowych na zwierzęta

Siłownie wiatrowe, a w szczególności duże farmy wiatrowe, jako duże budowle będące w ruchu, oddziałują na faunę, głównie latającą.

6.2.1. Wpływ elektrowni wiatrowych na ptaki

Problem śmiertelnych zderzeń ptaków z elektrowniami wiatrowymi został zauważony w latach 90. XX w. w USA, kiedy to na największej ówczesnie funkcjonującej farmie wiatrowej w Altmont Pass w Kalifornii odnotowano znaczną liczbę ptaków, zwłaszcza drapieżnych, które zginęły podczas zderzeń z siłowniami wiatrowymi. Farmy wiatrowe zagrażają nie tylko przelatującym obok nich ptakom [11], ale także nietoperzom, ponieważ łopaty wirnika tną powietrze z prędkością ponad 150 km/h.

Spora część tych kolizji zdarza się nocą i wynika z niezauważenia przez ptaka przeszkody (śmigła). Do zderzeń dochodzi jednak również w dzień, przy dobrej widoczności [12]. Czasem tłumaczy się to tym, że drapieżniki, goniąc ofiarę, wpadają na turbinę, ale pod uwagę trzeba wziąć również dwa mechanizmy:

- 1) rozmywanie obrazu – szybko poruszające się śmigła powodują zanikanie tego obrazu w miarę zbliżania się ptaka do przeszkody [13];
- 2) specyfika pola widzenia ptaków, u których obszar widzenia stereoskopowego przed dziobem jest bardzo wąski, a spore przestrzenie nad głową i pod



dziobem są polami ślepyimi [14]; dla wielu ptaków przestrzeń przed dziobem jest obszarem widzenia peryferyjnego, nieostrego, gdyż osie wzrokowe są skierowane na boki.

Jak już wspomniano, w literaturze tematu znajdziemy sprzeczne poglądy na temat wpływu turbin wiatrowych na otoczenie, w tym na ptaki: część badaczy uważa, że jest on negatywny, część zaś nie zgadza się z tą opinią.

De Lucas i współpracownicy [15] podczas 14-miesięcznych badań w pobliżu Cieśniny Gibraltarskiej stwierdzili śmierć tylko 2 ptaków: młodego sępa płowego oraz gadożera zwyczajnego. Z kolei Higgins i współpracownicy [16] prowadzili przez 2 lata obserwację farmy z 73 turbinami ustawionymi co 90–180 m. Stwierdzono, że w wyniku zderzeń z turbinami zginęło 11 ptaków, co daje śmiertelność na poziomie 0,075 ptaka/turbine/rok. Badania, które wykonał Band ze współpracownikami [17] wskazują, że nawet duże ptaki (np. błotniaki), które przelatują przez strefę rotatora, mają 85–95% szans, że nie zostaną uderzone łopatą śmigła.

Kolizje ptaków z siłowniami wiatrowymi są zjawiskiem powszechnym, notowanym dla około 90% kontrolowanych pod tym względem farm. Ich natężenie jest bardzo zróżnicowane – obok farm, gdzie śmiertelność ptaków podawana jest jako zerowa, istnieją farmy o bardzo wysokiej śmiertelności. Przykładowo Saidur i współpracownicy [16] stwierdzili, że śmiertelność ptaków w wyniku zderzenia z turbinami w USA jest dość wysoka (tab. 2).

Tab. 2. Straty w populacji ptaków w USA [17]

Region	Liczba farm	Łączna moc turbin	Straty [sztuk/turbine/rok]	Straty [sztuk/MW/rok]
Karolina Północna	4	397	1,2	1,7
Góry Skaliste	2	68	1,2	1,9
Środkowy Zachód	4	254	1,7	2,7
Wschód	2	68	46,3	32,0
Łącznie	12	787	3,4	4,6

Saidur i współpracownicy [16] porównali straty w populacji ptaków w USA (tab. 3). Najwięcej ptaków (piskląt) to ofiary kotów domowych oraz zderzeń z budynkami. Należy mocno podkreślić, że na podstawie licznych obserwacji przeprowadzonych dla działających farm wiatrowych oraz obliczonego na ich podstawie współczynnika śmiertelności ptaków wynika, że liczba zderzeń ptaków z wiatrakami jest znacznie mniejsza niż liczba zderzeń z samochodami czy liniami wysokiego napięcia [18].



Tab. 3. Przyczyny strat w populacji ptaków w USA [17]

Przyczyna	Liczba zabijanych ptaków [mln/rok]
Koty domowe	1000
Zderzenia z budynkami	100
Polowania	100
Zderzenia z pojazdami	60–80
Zderzenia z wieżami komunikacyjnymi	10–40
Zatrucia pestycydami	67
Zderzenia z liniami energetycznymi	0,01–174
Zderzenia z turbinami wiatrowymi	0,15

Ryzyko kolizji z siłownią wiatrową jest silnie uzależnione od gatunku ptaka. Obok gatunków, które bardzo rzadko były notowane (pomimo częstego i liczego występowania), istnieją gatunki nieproporcjonalnie często znajdowane jako ofiary zderzeń. Do tej grupy należą przede wszystkim ptaki szponiaste (drapieżne), a w szczególności bieliki, kanie rude, myszołowy zwyczajne oraz orły przednie. Wyraźnie mniejsze, choć wciąż bardzo wysokie ryzyko kolizji charakteryzuje też bociany białe, pustułki czy puchacze. Wśród wróblowatych duże prawdopodobieństwo zderzenia dotyczy skowronków polnych, potrzaszcy czy gąsiorków [19].

Kolizyjność jest zmienna w zależności od pory roku. Przyjmowane często a priori założenie, że najwyższe natężenie kolizji występuje w okresie migracji – kiedy przestrzeń powietrzną farmy pokonuje najwięcej ptaków – nie zawsze jest prawdziwe. Okres największego nasilenia zderzeń bywa też wyznaczany najliczniejszym w cyklu rocznym występowaniem gatunków najbardziej kolizyjnych. Na przykład: na farmie Smøla w Norwegii takim okresem była wiosna, kiedy występował wyraźny szczyt zderzeń bielików i pardw [20], natomiast na farmach Taerifa w Hiszpanii była to zima [21], a na farmach u wybrzeży Belgii miesiące letnie (lipiec–sierpień), czyli okres szczytowej aktywności mew [20].

Z badań wynika także, że ptaki niektórych gatunków, np. różnych gęsi, potrafią dostosować swoje trasy przelotów zarówno do pojedynczych elektrowni wiatrowych, jak i potężnych farm wiatrowych. Jeśli na drodze przelotu tych ptaków pojawiają się nowe turbiny (bądź inne elementy mogące stanowić potencjalne



zagrożenie), omijają je one szerokim łukiem, wykluczając możliwość kolizji lub znacznie zmniejszając możliwość jej wystąpienia. To jednak może wydłużać trasy ich migracji, zwiększając zużycie zapasów energii (tłuszczu). Z drugiej strony znane są także przypadki, że ptaki niektórych gatunków zakładały gniazda na gondolach elektrowni wiatrowych, co może wskazywać, że w ich przypadku zagrożenie zderzenia z łopatami wirnika turbiny wiatrowej jest niewielkie [19].

Bezpośrednia utrata siedlisk na terenach pod siłownię/farmę wiatrową jest z reguły ograniczona do powierzchni zajętych przez podstawę wieży i drogi serwisowe. Jest to obszar stosunkowo niewielki. Rozbudowa sieci lokalnych dróg, pomimo że są to z reguły drogi gruntowe, powoduje jednak sporo zmian w siedliskach ptaków – poczynając od spływów wód powierzchniowych i gruntowych, poprzez erozję, do zwiększonej penetracji przez ludzi i pojazdy [19, 22].

Rygorystyczne przepisy prawne obowiązujące w Polsce w zakresie np. dopuszczalnych poziomów hałasu powodują, że prawidłowo zaplanowana, przygotowana i zrealizowana inwestycja nie jest uciążliwa dla lokalnego ekosystemu, w tym dla człowieka. Wydane decyzje administracyjne z reguły nakładają również na inwestora obowiązki: zwykle monitoring ptaków, chiropterologiczny, często także pomiary hałasu w otoczeniu turbin. W przypadku stwierdzenia istotnego wpływu na środowisko właściciel farmy jest zobowiązany do podjęcia środków zaradczych [23].

6.2.2. Wpływ elektrowni wiatrowych na nietoperze

Elektrownie wiatrowe mogą stanowić istotne zagrożenie dla nietoperzy zarówno w skali lokalnej, jak i regionalnej [24]. Utrata kryjówek i miejsc żerowania oraz lokalnych tras przelotowych w trakcie budowy jest analogiczna do każdej innej inwestycji budowlanej (drogowej, mieszkaniowej czy przemysłowej). Negatywny wpływ elektrowni wiatrowych na nietoperze ujawnia się najsilniej na etapie eksploatacji. Do najważniejszych można zaliczyć: działanie odstrasżające oraz efekt bariery, prowadzące do opuszczenia żerowisk i zmianę tras przelotu.

Niewłaściwie zlokalizowane elektrownie wiatrowe mogą być przyczyną śmierci nietoperzy na skutek kolizji z wirnikami turbiny. Czasem nietoperze giną wskutek szoku ciśnieniowego (barotraumy) i pęknięcia pęcherzyków płucnych, dostając się w obszar obniżonego ciśnienia za obracającą się łopatą wirnika. W Kanadzie stwierdzono śmiertelność od 1,3 do 31,4 osobnika/turbinę/rok [25], w Saksonii średnio 1,8 osobnika/turbinę/rok, w Dolnej Saksonii i Szlezwiku-Holsztynie średnio 1,2 osobnika/turbinę/rok [26]. Wśród nietoperzy ginących na farmach europejskich dominują: borowiec wielki (33%), karlik większy (23%) oraz karlik mały (23%).



6.2.3. Wpływ morskich elektrowni wiatrowych na ryby

Związany z realizacją projektu morskiej farmy wiatrowej wpływ na środowisko może wystąpić na wszystkich etapach realizacji inwestycji, tj. w fazach: przygotowania, budowy, eksploatacji i likwidacji [26]. Na każdym z tych etapów zakres i skala oddziaływań jest inna, przy czym większość z nich związana jest z etapem budowy. Potencjalne działanie na ryby to:

- 1) zatykanie skrzel przez cząsteczki, które unoszą się w toni na skutek wzburzenia osadów dennych przez urządzenia stosowane w układaniu kabli;
- 2) oddalanie się gatunków wrażliwych, np. na hałas, z rejonu, w którym prowadzone są prace instalacyjne;
- 3) utrudnienie dostępu do bazy pokarmowej dla niektórych gatunków ryb, związane ze zniszczeniem/zaburzeniem siedlisk dennych;
- 4) ograniczenie widoczności, związane ze wzrostem koncentracji zawiesiny, które może stanowić utrudnienie w zdobywaniu pokarmu przez ryby drapieżne;
- 5) negatywny wpływ toksycznych substancji chemicznych, w przypadku ich ewentualnego wycieku ze statków lub urządzeń stosowanych w układaniu kabli;
- 6) negatywny wpływ na rybołówstwo – odstraszenie ryb, uszkodzenie narzędzi połowowych;
- 7) zaburzenia orientacji u niektórych gatunków ryb, spowodowane emisją pól elektromagnetycznych, których źródłem będą kable podmorskie [27].

6.2.4. Wpływ elektrowni wiatrowych na inne zwierzęta

W ostatnich latach bada się również wpływ siłowni wiatrowych na inne zwierzęta. Przykładowo Mikołajczyk i współpracownicy [28] badali wpływ elektrowni wiatrowej o mocy 2 MW na gęsi i świnie w miejscowości Rypałka (kujawsko-pomorskie) w 3 zagrodach oddalonych od siłowni wiatrowej o 50, 500 i 1000 m. W początkowym okresie doświadczenia zaobserwowano, że zwierzęta przestały jeść i pić. Po dwóch dobach zaczęły pobierać wodę, natomiast po trzech dobach – paszę. U gęsi zaobserwowano nietypowe zjawisko, jakim było gromadzenie się w skupisku, przerywane jedynie na czas pobierania pokarmu. W drugiej części okresu badań stan ten ustąpił. U prosiąt takiego zjawiska nie zaobserwowano. Badania krwi (testy: poziom kortyzolu, Gsh-px, CAT) wykazały, że w miarę zbliżania się ich miejsca bytowania do siłowni wiatrowej nasilały się tendencje do symptomów charakterystycznych dla stresu, a także zmniejszył się przyrost ich masy ciała. Analizując jakość mięsa uzyskanego w czasie badań, nie stwierdzono istotnej (pod względem statystycznym) różnicy między sztukami utrzymywanymi w różnych odległościach od siłowni wiatrowej [28].



6.3. Wpływ elektrowni wiatrowych na krajobraz i mikroklimat

Elektrownie wiatrowe jako urządzenia wysokie (do 150 m), o kolorze kontrastowym w stosunku do tła nieba oraz powierzchni ziemi z różnymi formami jej użytkowania, w dodatku poruszające się, wpływają na krajobraz. Farma wiatrowa, jako zespół kilku, a czasami kilkunastu bądź kilkudziesięciu elektrowni wiatrowych wraz z tzw. infrastrukturą towarzyszącą (stacją transformatorową, drogami dojazdowymi, masztem do pomiaru prędkości wiatru itp.), rozmieszczonych na terenie o znaczącej powierzchni, na ogół staje się elementem dominującym w krajobrazie danego regionu [29]. Negatywny wpływ farmy wiatrowej na otaczający ją krajobraz maleje wraz ze wzrostem odległości od inwestycji. Na tej podstawie wyróżniono następujące strefy tzw. wizualnego oddziaływania elektrowni wiatrowych:

1. Strefa I (w odległości do 2 km od farmy wiatrowej) – farma wiatrowa jest elementem dominującym w krajobrazie. Obrotowy ruch wirnika jest wyraźnie widoczny i dostrzegany przez człowieka.
2. Strefa II (w odległości od 1 do 4,5 km od farmy wiatrowej w warunkach dobrej widoczności) – elektrownie wiatrowe wyróżniają się w krajobrazie i łatwo je dostrzec, ale nie są elementem dominującym. Obrotowy ruch wirnika jest widoczny i przyciąga wzrok człowieka.
3. Strefa III (w odległości od 2 do 8 km od farmy wiatrowej) – elektrownie wiatrowe są widoczne, ale nie są „narzucającym się” elementem w krajobrazie. W warunkach dobrej widoczności można dostrzec obracający się wirnik, ale na tle swojego otoczenia same turbiny wydają się stosunkowo niewielkich rozmiarów.
4. Strefa IV (w odległości powyżej 7 km od farmy wiatrowej) – elektrownie wiatrowe wydają się niewielkich rozmiarów i nie wyróżniają się znacząco w otaczającym je krajobrazie. Obrotowy ruch wirnika z takiej odległości jest właściwie niedostrzegalny [29].

Większość przypadków, w których uważa się, że elektrownie wiatrowe w znaczący sposób zaszkodziły walorom krajobrazowym terenu, związanych jest z błędami lokalizacyjnymi popełnianymi w początkowej fazie rozwoju aeroenergetyki. Przypadki takie notowane są w wielu krajach, również w Polsce, a wynikają ze zbyt pochopnego wydawania pozwoleń na budowę farm wiatrowych, nie troszcząc się o zintegrowanie z lokalnym krajobrazem. Często efektem tego jest nagromadzenie na stosunkowo małym obszarze wielu elektrowni różnych typów i wysokości, rozmieszczonych w sposób nieregularny, co tworzy poczucie „bałaganu” przestrzennego. Obecnie we wszystkich krajach, w tym w Polsce, przykłada się coraz



większą wagę do zagadnień planowania przestrzennego. Opublikowano szereg prac na temat zagadnień doboru koloru elektrowni oraz możliwych sposobów ich rozmieszczenia w celu minimalizacji wpływu wizualnego. Także producenci wiatraków przykładają coraz więcej wagi do projektowania ich wyglądu i nadania im odpowiednich proporcji. Zaletą dużych elektrowni wiatrowych jest fakt, że są one rozmieszczone w większych odległościach od siebie, a ich wirniki obracają się wolniej, przez co stają się elementami mniej dominującymi w krajobrazie (nie przyciągają wzroku tak jak obiekty szybko wirujące). Obecnie na etapie projektowania farmy wiatrowej analizuje się lokalne uwarunkowania krajobrazowe, tak aby uniknąć wprowadzania zakłóceń na główne osie widokowe [3].

Elektrownie wiatrowe mogą wpływać na lokalny mikroklimat – większe skupiska wiatraków mogą być przyczyną zmniejszenia prędkości wiatru. Z powodu turbulencji wywoływanych przez wiatraki podnosi się temperatura powietrza. Wpływ bardzo dużych farm wiatrowych na mikroklimat można uznać za dość znaczący [30].

6.4. Czy warto rozwijać aeroenergetykę?

Jak już wspomniano, elektrownie wiatrowe mogą negatywnie wpływać na człowieka, zwierzęta, krajobraz i mikroklimat. Można więc zadać pytanie, czy należy rozwijać aeroenergetykę na świecie? Odpowiedź na pytanie jest twierdząca, ale pod kilkoma warunkami. Przede wszystkim inwestycja musi znajdować się w pewnej (bezpiecznej) odległości od terenów zamieszkałych przez ludzi. Lokalizację farmy trzeba tak wybrać, aby zminimalizować jej oddziaływanie przede wszystkim na ptaki i nietoperze. Stawiane turbiny wiatrowe powinny być nowoczesne, emitujące jak najmniejszy hałas. Ważne jest również właściwe wkomponowanie ich w krajobraz. Jednym ze sposobów zniwelowania oddziaływania turbiny wiatrowej na lokalną faunę jest odpowiednie łączenie inwestycji gospodarczych, czyli sytuowanie farm na terenach z już istniejącą infrastrukturą drogową czy przemysłową – wzdłuż autostrad, na obrzeżach dużych zakładów, na hałdach – jednak każdorazowo po sprawdzeniu wartości przyrodniczej terenu.

Należy rozwijać energetykę odnawialną, w tym aeroenergetykę, gdyż zasoby paliw konwencjonalnych są na wyczerpaniu, co już teraz wpływa na ich wyższą cenę. Już dziś wiele kopalń w Polsce boryka się z brakiem węgla, a w ciągu najbliższych 25–30 lat węgiel kamienny w Polsce po prostu się wyczerpie (il. 1) [31].

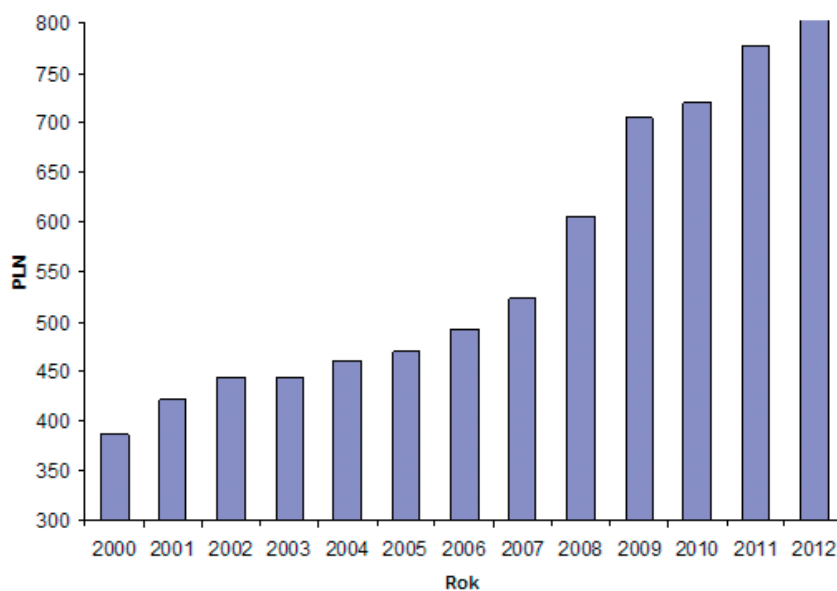
Ceny paliw konwencjonalnych od lat utrzymują się na wysokim poziomie. Na ilustracji 2 przedstawiono, jak cena 1 Mg węgla kamiennego, będącego głównym surowcem energetycznym w Polsce, zmieniała się w latach 2000–2012. Należy



podkreślić, że drogi węgiel to nie tylko drogie ogrzewanie naszych domów, niesie to ze sobą także wysoką cenę energii elektrycznej, a co za tym idzie wysokie ceny towarów i usług. Uwzględniając siłę nabywczą, w Polsce mamy jedne z najwyższych cen prądu elektrycznego na świecie.



Il. 1. Zasoby węgla w Polsce [31]



Il. 2. Cena węgla za 1 Mg w Polsce w latach 2000–2012
(opracowanie własne za GUS)



W 2013 r. import węgla do Polski wyniósł około 10,5 mln Mg. Najwięcej tego surowca trafiło na nasz rynek z Rosji i Czech, a także z Australii i USA. Mimo znaczących kosztów transportu, import węgla z USA czy Australii jest opłacalny, polski węgiel jest dużo droższy [32]. Wiele zakładów przemysłowych importuje węgiel z innych krajów, gdyż jest on 2–3 razy tańszy.

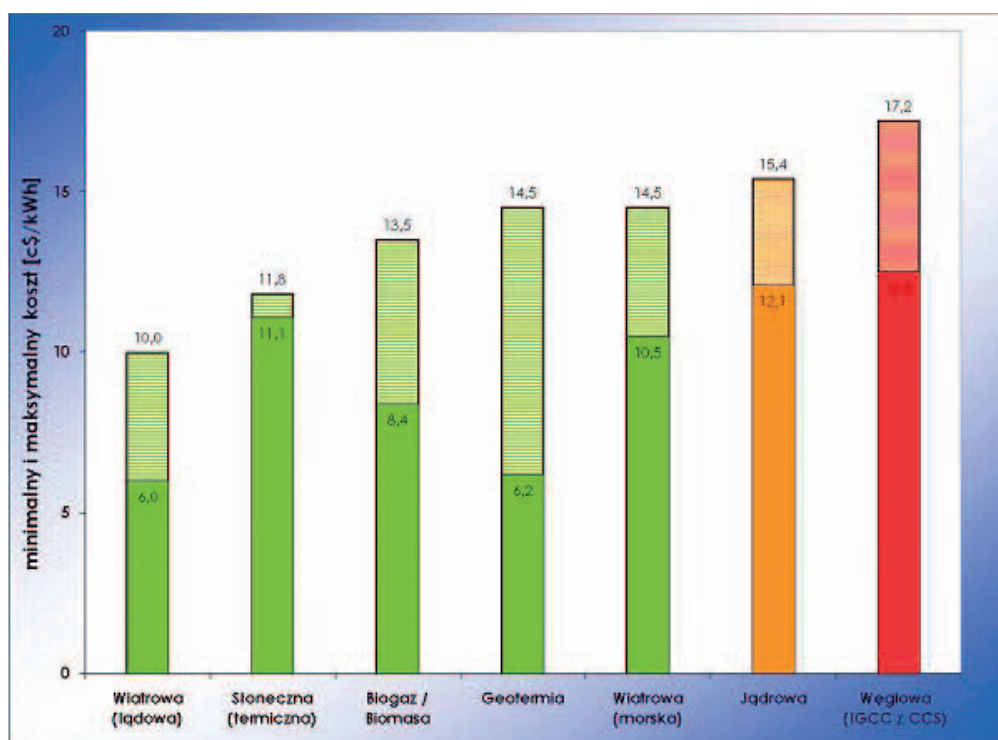
Mimo że cena węgla w Polsce jest i tak bardzo wysoka, to tak naprawdę jest ona dużo wyższa, gdyż nie uwzględnia pomocy państwa dla górnictwa i skutków pośrednich wydobycia, transportu i spalania węgla. Pomoc publiczna udzielona Kompanii Węglowej SA w latach 2003–2011 wyniosła 6,4 mld zł i 8-krotnie przewyższała skumulowany zysk netto spółki. Bez ciągłego zasilania finansowego z budżetu państwa spółka dawno by zbankrutowała. Począwszy od 2011 r. Rada Unii Europejskiej zaostrzyła kryteria przyznawania pomocy publicznej na mocy „rozporządzenia węglowego”. Nowy akt prawny przyjęty 10 grudnia 2010 r. przez Radę UE (w tym Polskę) oznacza, że pomoc publiczna może być udzielana wyłącznie na pokrycie kosztów zamykania kopalń. Co więcej, ostateczne zamknięcie nierentownych kopalń ma nastąpić do 31 grudnia 2018 r. [31].

W Programie działalności górnictwa węgla kamiennego w Polsce w latach 2007–2015 [33] czytamy: „Z uwagi na konieczność poniesienia wysokich nakładów na inwestycje zarówno w sektorze energetycznym, jak i w sektorze górnictwa węgla kamiennego, w najbliższych latach może nastąpić znaczący wzrost cen energii elektrycznej. Wzrost kosztów produkcji węgla kamiennego, a w konsekwencji cen energii elektrycznej, wynikać będzie również z dalszego zwiększania głębokości eksploatacji, jak również konieczności ograniczenia negatywnego oddziaływania działalności górniczej na środowisko”.

Dzięki temu, że wiatr jest „darmowy”, a elektrownia wiatrowa to dobrze funkcjonujący „zakład energetyczny”, koszty eksploatacyjne energetyki wiatrowej (lądowej i morskiej) są niższe niż w przypadku pozyskiwania energii z innych źródeł odnawialnych. Wysokie koszty paliw sprawiają, że energetyka konwencjonalna ma najwyższe koszty eksploatacyjne (il. 3) [34].

Wartościowanie korzyści ekonomicznych z tytułu ochrony środowiska polega na obliczeniu unikniętych kosztów zewnętrznych związanych z redukcją emisji zanieczyszczeń. Korzyści ekonomiczne dzięki mniejszej emisji to przede wszystkim poprawa stanu zdrowia ludności, zwiększenie produkcji, wzrost wartości ekonomicznych (np. wzrost wartości nieruchomości), mniejsze koszty remontów i modernizacji budynków, wzrost produkcji rolniczej i leśnej [31]. Popczyk [35] podaje, że koszt wytworzenia 300 TWh energii dla rynku końcowego wynosi 21 mld PLN, a po inkorporacji kosztów zewnętrznych 50 mld PLN. Przyjmując formułę interpolacji kosztów zewnętrznych do kosztów bezpośrednich wytwarzania energii, najwyższe koszty paliwa są w przypadku węgla brunatnego – 425 PLN/MWh.





Il. 3. Ocena kosztów produkcji energii z nowo budowanych, przyjaznych dla klimatu technologii wytwarzania energii elektrycznej w USA [34]

W tabeli 4 porównano energetykę konwencjonalną i odnawialną w kontekście kosztów zewnętrznych, akceptacji społecznej, zasobów i ich dostępności w każdym regionie.

Analizując tabelę 4, można stwierdzić, że energetyka oparta na węglu generuje największe koszty zewnętrzne. Budowa elektrowni (kotłowni) tego typu nie jest zbyt akceptowana społecznie, największe protesty w Polsce obserwuje się w przypadku energetyki opartej na węglu brunatnym i energetyce jądrowej. Obecnie mamy znaczące zasoby węgla, jednak za 100 lat, przy takim samym wydobyciu jak teraz, praktycznie skończą się pokłady węgla kamiennego i znacząco zmniejszą zasoby węgla brunatnego. Energetyka odnawialna ma zasoby niewyczerpane. Złóża węgla w Polsce skoncentrowane są głównie w południowo-zachodniej części Polski, do pozostałych regionów węgiel bądź energia muszą być dostarczane.

Analizy [3] wskazują, że dla przeciętnych warunków geograficznych, klimatycznych i geologicznych w UE, aeroenergetyka może średniorocznie dostarczyć 2 W/m^2 powierzchni ziemi, geoenergetyka $0,017 \text{ W/m}^2$, rośliny energetyczne zaś $0,5 \text{ W/m}^2$. W sytuacji szybkiego ubywania przestrzeni rolniczej w Polsce, ważną



Tab. 4. Porównanie energetyki konwencjonalnej i odnawialnej w kontekście kosztów zewnętrznych, akceptacji społecznej, zasobów i ich dostępności w każdym regionie (opracowanie własne)

Elektrownia	Koszty zewnętrzne	Akceptacja społeczna	Zasoby w Polsce		Dostępność w każdym regionie
			obecnie	za 100 lat	
Węglowa na węgiel kamienny	++	+/-	++	--	--
Węglowa na węgiel brunatny	++	--	++	+/-	--
Jądrowa	+/-	--	--	--	--
Gazowa	-	+/-	-	--	--
Wodna	-	+/-	+/-	+/-	+/-
Wiatrowa	-	+/-	+	+	+/-
Geotermalna	-	+/-	+	+	+/-
Biogazowa	-	+/-	++	++	++
Słoneczna	--	++	+	+	+

cechą aeroenergetyki jest możliwość wielofunkcyjnego (w tym oczywiście i rolniczego) wykorzystania obszarów, na których instalowane są elektrownie wiatrowe.

Praca górnika jest bardzo niebezpieczna. Z różnym natężeniem występują w górnictwie następujące zagrożenia: gazowe (wybuch metanu), pyłowe (wybuch pyłu węglowego), pożarowe, wodne, radiacyjne, sejsmiczne, tąpnięciami oraz zawałowe. W 2012 r. w Polsce wydarzyły się 2199 wypadki, a śmierć poniosły 22 osoby. Analizy stężenia pyłu węglowego w polskich kopalniach węgla wykazały, że na 90% stanowisk pracy pod ziemią przekroczone są dopuszczalne wartości, co prowadzi do chorób zawodowych (np. pylica) i przedwczesnych zgonów w tej grupie zawodowej.

Spalanie węgla jest w Polsce podstawowym źródłem zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego [30]. W 2010 r. było to 84,4% całkowitej emisji dwutlenku siarki, 38,8% tlenków azotu, 47,2% emisji pyłów. Energetyka jest odpowiedzialna za największą emisję metali ciężkich w Polsce: Cd – 70,2%, Hg – 36,5%, Pb – 38,8%, As – 49,7%. Metale ciężkie znacząco obniżają produkcję zwierzęcą i roślinną, wpływają również negatywnie na organizm człowieka, przede wszystkim na dzieci. Zwiększona zawartość metali ciężkich powoduje liczne choroby przewlekłe,



w tym autyzm i nowotwory [36]. Badania populacyjne dotyczące występowania astmy i chorób alergicznych u dzieci w województwie śląskim, prowadzone przez Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego w Sosnowcu, wykazały istotny statystycznie związek pomiędzy poziomem zanieczyszczeń pyłowych i gazowych powietrza oraz występowaniem objawów spastycznych oraz astmy u dzieci. Głównym problemem zanieczyszczenia rtęcią jest bioakumulacja i negatywne oddziaływanie metylortęci na ludzi, szczególnie na płody ludzkie. Rtęć przenika z krwi matki do krwi płodu i powoduje uszkodzenia neurologiczne, objawiające się w późniejszym okresie obniżonym współczynnikiem inteligencji. Przyjmuje się, że obniżenie ilorazu inteligencji społeczeństwa to koszt 8 tys. euro/kg Hg [37].

Wysoki poziom zanieczyszczenia powietrza w uprzemysłowionym rejonie Śląska wiąże się ze zwiększonym ryzykiem zachorowania na choroby nowotworowe. Do najbardziej rakotwórczych i mutagennych zanieczyszczeń powietrza należą wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, wytwarzane głównie przy spalaniu węgla. Badania uszkodzeń molekularnych i genetycznych w próbkach krwi mieszkańców Śląska wykazały, że narażenie na zanieczyszczenia powietrza wiąże się ze znaczącym wzrostem adduktów kancerogennych DNA w procesie wymiany chromatyd siostrzanych i z aberacjami chromosomów [38].

W Polsce najbardziej zanieczyszczonym miastem jest Kraków. Odpowiada za to tzw. „niska emisja”, przede wszystkim spalanie węgla i śmieci w piecach węglowych, którymi ogrzewa się mieszkania około 30 tys. gospodarstw domowych. Zagrożenie potęgują takie czynniki jak: bezwietrzna pogoda, brak opadów i niska temperatura. Najgorsza sytuacja jest oczywiście zimą. Przykładowo w grudniu 2012 r. na stacji pomiarowej w al. Krasińskiego średniodobowy poziom stężenia pyłu PM10 wyniósł $352 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (704% normy!), w Nowej Hucie zaś stężenie PM10 przekroczyło normę o ponad 800%. Gazy i pyły zawieszone, np. we mgle, osadzają się w błonach śluzowych i jamie ustnej, torując drogę wirusom. U osób z chorobami dróg oddechowych występuje nasilenie objawów astmy, kaszel i duszności. W Krakowie obserwuje się pandemię schorzeń układu oddechowego u najmłodszych. Dzieci mają coraz częściej uszkodzoną błonę śluzową wyściełającą drogi oddechowe, właśnie przez substancje toksyczne, takie jak gazy i pyły, a uszkodzona błona sprzyja namnażaniu wirusów i bakterii w organizmie [39].

Aby zapobiec zatrutowaniu mieszkańców Krakowa, władze opracowały kilkuletni program naprawczy. Jego celem będzie znaczące ograniczenie emisji trujących pyłów i gazów, które wnikając do płuc i układu krążenia, powodują ciężkie choroby – od astmy po zawał serca. Zakaz palenia węglem zacznie obowiązywać od 1 stycznia 2014 roku, jednak nie od razu mieszkańcy będą z tego rozliczani. Radni zaproponowali 5-letni okres przejściowy, w trakcie którego z Krakowa i większości miast Małopolski mają zniknąć piece węglowe. Zgodnie z projektem władze Kra-



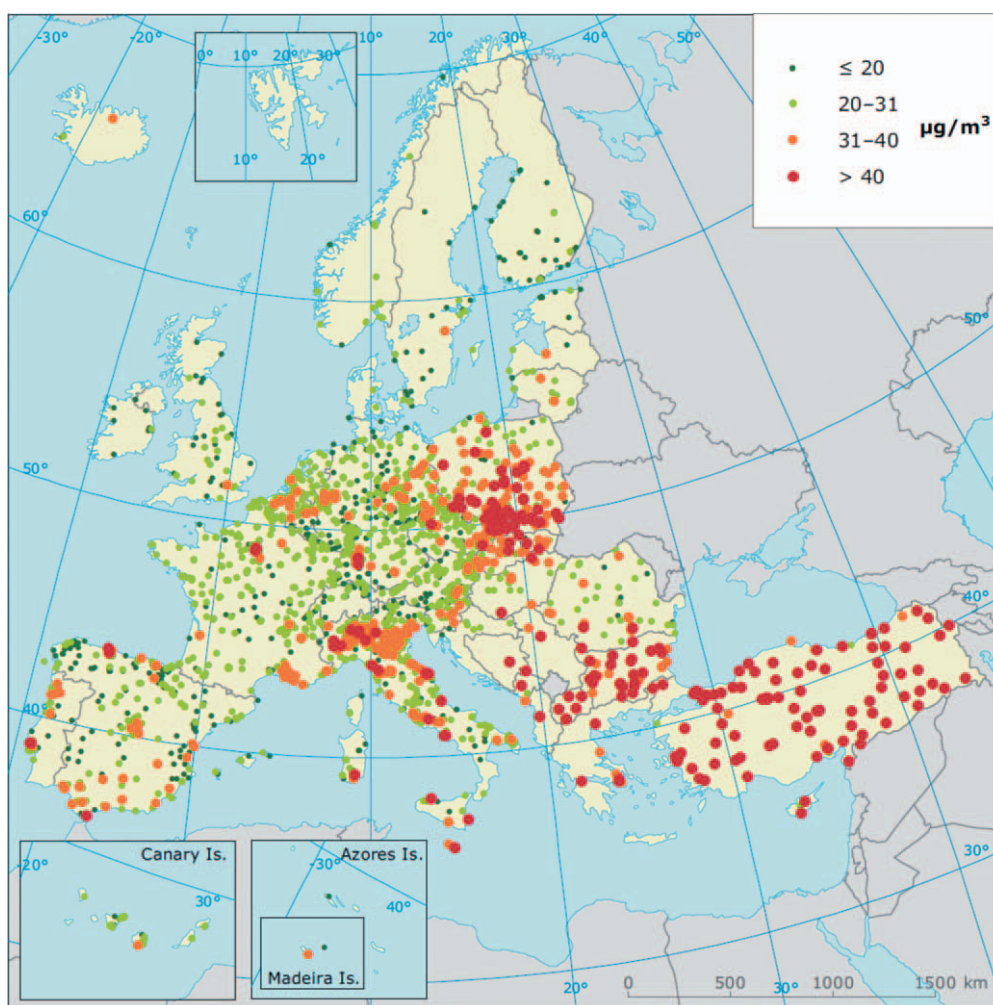
kowa mają refundować aż 90% kosztów wymiany pieca węglowego na ogrzewanie gazowe lub centralne ogrzewanie. Wysokość dopłat do rachunków za ogrzewanie będzie uzależniona od zamożności rodziny, a więc od poziomu jej dochodów [40].

Szczególny niepokój, z uwagi na poważne skutki dla zdrowia ludności, powinny budzić wysokie stężenia pyłu PM10 (il. 4) i PM2,5 (pyłu o średnicy ziaren mniejszej niż $2,5 \mu\text{m}$), który składa się z cząstek pochodzących zarówno z emisji pierwotnej, jak i z cząstek wtórnego aerozolu powstającego w atmosferze w procesach zachodzących z udziałem zanieczyszczeń gazowych. Co więcej, cząstki aerozolu wtórnego mogą pojawiać się w rejonach znacznie oddalonych od źródeł emisji gazowych prekursorów aerozolu [41]. Cząstki pyłu wnikają do układu oddechowego i krwionośnego ludzi, przyczyniając się do chorób płuc, układu krwionośnego, a także niektórych odmian nowotworów. Na obszarach o wysokich stężeniach PM2,5 stwierdzono znacznie zwiększoną zapadalność na astmę oskrzelową. Astma oskrzelowa przebiega na ogół napadowo, będąc z patofizjologicznego punktu widzenia przewlekłą chorobą zapalną, która często prowadzi do chorób układu krążenia i niewydolności serca. Ocenia się, że nadmierna ekspozycja na emisję PM2,5 w Polsce powoduje średnie skrócenie życia o 6 lat [31].

Przy założeniu pełnego wykorzystania potencjału rynkowego, redukcja emisji CO₂ do atmosfery dzięki aeroenergetyce wyniosłaby 33 mln Mg w 2020 r. z dalszym potencjałem wzrostu do 65 mln Mg w 2030 r. Udział energetyki wiatrowej w całkowitej redukcji CO₂ z sektora energetycznego w Polsce wzrósłby z około 0,7% w 2010 r. do 13,5% w 2020 r. i 32,4% w 2030 r. Uzyskana skala redukcji ma bardzo duże znaczenie z punktu widzenia wymogów w realizacji całego pakietu klimatycznego UE „3x20”, w tym także wypełnienia do 2020 r. przez Polskę dyrektywy o handlu emisjami (ETS). Przyjmując do szacunków uśrednioną cenę redukcji emisji CO₂ na poziomie 20 euro/Mg w 2020 r. i 30 euro/Mg w 2030 r. wkład aeroenergetyki w redukcję emisji można ocenić na 660 mln euro/rok w 2020 r. i 1950 mln euro/rok w 2030 r. [3].

Aeroenergetyka wypada jeszcze korzystniej przy uwzględnieniu pełnych kosztów zewnętrznych [3, 42]. W przypadku użycia do obliczeń umiarkowanie wysoko wycenionych kosztów klimatycznych (20 euro/Mg CO₂), obecnie płacona w Polsce cena „zielonego certyfikatu”, choć dość wysoka (rzędu 50–60 euro/MWh), nie pokrywa różnicy w kosztach zewnętrznych w przypadku zastępowania energią wiatru energią z węgla. Reasumując, nie wszystkie korzyści społeczne związane z energetyką wiatrową znajdują jeszcze odzwierciedlenie na rynku energii. W tabeli 5 przedstawiono koszty marginalne paliw kopalnych i OZE. Stanowią one przyrost kosztów całkowitych związanych z produkowaniem dodatkowej jednostki dobra. Dla typowych procesów gospodarczych koszty krańcowe początkowo maleją wraz ze wzrostem produkcji, aż do osiągnięcia minimum technologicznego. Dalsze





Il. 4. Roczna emisja PM10 [41]

zwiększanie produkcji ponad minimum technologiczne będzie pociągało za sobą coraz większe jednostkowe koszty kolejnych przyrostów produkcji i tym samym koszty krańcowe będą rosnąć.

Wydobycie węgla kamiennego odbywa się w Polsce metodą głębinową, przez pionowe szyby. Wszelkie operacje, jak transport pracowników, urobku i wentylacja, odbywają się w szybach i chodnikach. Dla ochrony powierzchni ziemi i wszelkich budynków kluczowe znaczenie ma sposób likwidacji pustek poeksploatacyjnych. Dokonuje się tego, pozostawiając filary ochronne pod najważniejszymi obiektami przemysłowymi, infrastrukturalnymi i osiedlami mieszkaniowymi, a także metodą podsadzania, czyli wypełniania wyrobisk wodą z piaskiem lub popiołem z elektrowni, zmieszany z wodami kopalnianymi. Innym sposobem jest zawał stropu,



Tab. 5. Koszty marginalne paliw kopalnych i OZE [euro/MWh] [3, 42]

Oddziaływanie	Węgiel brunatny	Ropa naftowa	Gaz ziemny	Biomasa	Energetyka jądrowa	Fotowoltaika	Energetyka wiatrowa
Wpływ na zdrowie ludzi	239,70	66,12	4,00	3,79	1,30	5,08	1,06
Wpływ na budowlę i materiały	0,75	0,20	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Wpływ na uprawy rolnicze	0,48	0,92	0,31	0,38	0,03	0,14	0,03
Razem bez efektów klimatycznych	240,93	67,24	4,32	4,18	1,34	5,24	1,09
Razem z efektami klimatycznymi rzędu 20 euro/Mg	266,36	85,86	14,43	5,13	2,01	8,00	1,65

bez podsadzania – obecnie powszechnie stosowany w polskim górnictwie, który szczególnie negatywnie oddziałuje na powierzchnię. Na powierzchni terenu powstają deformacje, które mogą mieć charakter ciągły i tworzyć rozległe niecki osiadań lub charakter nieciągły, w formie różnego rodzaju zapadlisk, szczelin i progów [31].

Deformacjami ciągłymi objęta jest praktycznie cała powierzchnia terenów górniczych, co prowadzi do znacznych obniżen terenu. Powodują one zmiany stosunków wodnych, podtopienia i zabagnienia. W rejonie Chorzowa, Bytomia, Siemianowic, Piekar Śląskich, Świętochłowic, Rudy Śląskiej czy Zabrze obniżenia terenu sięgają 30 metrów. Wpływa to negatywnie na uprawy rolne oraz na zdrowie zwierząt i ludzi. Na podtapianych terenach kilkuletnie dzieci chorują na reumatyzm, wzrosła też zapadalność na choroby górnego układu oddechowego [43]. Leczenie tych chorób generuje kolejne koszty.

Kopalnie odkrywkowe węgla brunatnego powodują dewastację gruntu, dodatkowo wypompowywana woda jest przyczyną opadania wód gruntowych i powierzchniowych. Warto wspomnieć, że pozyskiwanie węgla, w szczególności metodą odkrywkową, wywołuje protesty społeczne. Ludność wysiedlana i mająca swoje gospodarstwa w pobliżu powstających kopalni coraz częściej sprzeciwia się ich budowie (np. Rogóźno w woj. łódzkim).



Kolejne nakłady finansowe generuje rekultywacja i rewitalizacja terenów osiadań pogórnich. W Polsce rekultywacja ma często charakter pobieżny, do deniwelacji terenu wykorzystuje się bowiem odpady pogórnice i z elektrowni węglowych, tworząc w ten sposób nieformalne składowiska, które mogą niekorzystnie wpływać na chemizm wód powierzchniowych i podziemnych.

Nieodłącznym elementem terenów górniczych w Polsce są hałdy, czyli zwałowiska odpadów wydobywczych i przeróbczych. Przyjmując, że wydobyciu 1 Mg węgla kamiennego towarzyszy wydobycie średnio 250–300 kg odpadów powęglowych, można oszacować, że rocznie powstaje około 20 mln Mg tych odpadów. Zwałowiska pogórnice negatywnie wpływają na środowisko przyrodnicze. Przede wszystkim dotyczy to poważnego zagrożenia pożarowego, gdyż na hałdach często dochodzi do samozapłonu, wskutek obecności substancji węglowej i utleniania się piryty. Ponadto odcieki ze zwałowisk silnie zanieczyszczają wody gruntowe i podziemne [31].

Reasumując, Polska nie może z dnia na dzień odejść od energetyki węglowej. Uwzględniając jednak wcześniej opisane informacje, należy stopniowo zwiększać udział OZE w bilansie energetycznym kraju. Odnawialna energetyka rozproszona, to nie tylko korzyści środowiskowe, ale również finansowe dla odbiorców energii elektrycznej i ciepła. OZE to również miejsca pracy; pracy, która jest dużo bezpieczniejsza niż praca górników.

Literatura

- [1] Ch. Hanning, *Raport na temat zaburzenia snu wywołanego hałasem turbin wiatrowych*, Swinford 2009.
- [2] H. Wojciechowski, *Elektrownie wiatrowe – przyjazność dla środowiska*, „Zielona Planeta” 1 (100), 2012, s. 11–14.
- [3] G. Wiśniewski, K. Michałowska-Knap, S. Koć, *Energetyka wiatrowa – stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2012.
- [4] A. N. Salt, T. E. Hullar, *Responses of the era to low frequency sounds, infrasound and wind turbines*, „Hearing Research” 268, 2010, s. 12–21.
- [5] D. Al. Katsaprakakis, *A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the prefecture of Lasithi, Crete*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 16, 2012, s. 2850–2863.
- [6] http://www.pigeo.org.pl/pliki/aktualnosci_pl/26/Pe%C5%82ne%20Stanowisko%20PIGEO%20do%20publikacji%20Kancelarii%20Senatu.pdf (wejście 07.03.2004).
- [7] K. Michałowska-Knap, *Wpływ elektrowni wiatrowych na zdrowie człowieka*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2006.
- [8] <http://www.oddzialywaniawiatrakow.pl/upload/File/Migotanie%20cieni.pdf> (wejście 07.03.2004).



- [9] N. Pierpont, *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment*, Santa Fe 2009.
- [10] L. D. Knopper, Ch.A. Ollson, *Health effects and wind turbines: A review of the literature*, "Environmental Health" 10, 2011, s. 78.
- [11] P. Chylarecki, A. Pasławska, *Wytyczne w zakresie oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na ptaki*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Szczecin 2008.
- [12] A. Wuczyński, *Wpływ farm wiatrowych na ptaki. Rodzaje oddziaływań, ich znaczenie dla populacji ptasich i praktyka badań w Polsce*, „Notatki Ornitologiczne” 50, 2009, s. 206–227.
- [13] W. Hodos, *Minimalization of motion smear: reduction avian collisions with wind turbines*, National Renewable Energy Laboratory, Denver 2003.
- [14] G. R. Martin, *Understanding bird collision with man-made objects: a sensory ecology approach*, "Ibis" 153, 2011, s. 239–254.
- [15] M. De Lucas, G. F. E. Janss, M. Ferrer, *The effects of a wind farm on birds in a migration point: the Strait of Gibraltar*, "Biodiversity and Conservation" 13, 2004, s. 395–407.
- [16] K. F. Higgins, R. G. Osborn, D. E. Naugle, *Effect of wind turbines on birds and bats in southwestern Minnesota*, w: *Birds and wind farms. Risk Assessment and Mitigation*, Ed. Quercus, Madrit 2007.
- [17] R. Saidur et al., *Environmental impact of wind energy*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 15, 2011, s. 2423–2430.
- [18] A. L. Drewitt, R. H. W. Langston, *Assessing the impacts of wind farms on birds*, "British Ornithologists Union" 148, 2006, s. 29–42.
- [19] P. Chylarecki i in., *Wytyczne dotyczące oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na ptaki. Projekt*, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2011.
- [20] K. Bevanger et al., *Pre- and post-construction studies of conflicts between birds and wind turbines in coastal Norway (BirdWind)*, Report on findings 2007–2010, NINA Report 620, Trondheim 2010.
- [21] M. De Lucas et al., *Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance*, "Journal of Applied Ecology" 45, 2008, s. 1695–1703.
- [22] R. T. T. Forman et al., *Road Ecology: Science and Solutions*, Island Press, Washington 2003.
- [23] M. Stryjecki, K. Mielczuk, *Wytyczne w zakresie prognozowania oddziaływań na środowisko farm wiatrowych*, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2011.
- [24] A. Kepel, M. Ciechanowski, R. Jaros, *Wytyczne dotyczące oddziaływania elektrowni wiatrowych na nietoperze*, Projekt, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2011.
- [25] E. F. Baerwald et al., *A large-scale mitigation experiment to reduce bat fatalities at wind energy facilities*, "The Journal of Wildlife Management" 7 (73), 2009, s. 1077–1081.
- [26] J. Rydell et al., *Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration?*, "European Journal of Wildlife Research" 56, 2010, s. 823–827.



- [27] Fundacja na rzecz Energetyki Zrównoważonej, *Oddziaływania morskich farm wiatrowych na ryby i rybołówstwo – doświadczenia zagraniczne*, Materiały konferencji „Morska energetyka kołem zamachowym rozwoju przemysłu i regionów nadmorskich”, Słupsk, 21 stycznia 2013.
- [28] J. Mikołajczyk i in., *Wpływ siłowni wiatrowych na zachowanie się, wyniki produkcyjne oraz jakość mięsa świń i gęsi na przykładzie siłowni wiatrowej Rypałki, gmina Rypin, województwo kujawsko-pomorskie*, Bydgoszcz 2013.
- [29] <http://www.oddziaływaniawiatrakow.pl> (wejście 11.03.2004).
- [30] D. W. Keith *et al.*, *The influence of large-scale wind power on global climate*, “Proceedings of the National Academy of Sciences” 46 (101), 2004, s. 16115–16120.
- [31] M. Wilczyński, *Zmierzch węgla kamiennego w Polsce*, Fundacja Instytut na Rzecz Ekorozwoju, Warszawa 2013.
- [32] <http://www.portalmorski.pl/porty-i-logistyka/porty-terminale-polskie/36526-dobry-biznes-czyli-handel-weglem-z-importu> (wejście 12.03.2004).
- [33] Rada Ministrów, *Program działalności górnictwa węgla kamiennego w Polsce w latach 2007–2015*, tekst jednolity, Warszawa, grudzień 2011.
- [34] G. Wiśniewski i in., *Wizja rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce do 2020 r.*, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2009.
- [35] J. Popczyk, *Energetyka rozproszona: od dominacji energetyki w gospodarce do zrównoważonego rozwoju, od paliw kopalnych do energii odnawialnej i efektywności energetycznej*, Wyd. Polski Klub Ekologiczny Mazowiecki, Warszawa 2011.
- [36] A. Ociepa-Kubicka, E. Ociepa, *Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska” 15 (2), 2012, s. 169–180.
- [37] D. Panasiuk, A. Głodek, J. M. Pacyna, *Scenariusze emisji rtęci do powietrza, wód i gleby w Polsce do roku 2020*, „Proceedings of ECOpole” 6, 2012, s. 669–774.
- [38] A. Strupczewski, U. Radovic, *Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Polsce*, Biuletyn Miesięczny PSE, 14–29, styczeń 2006.
- [39] <http://krakow.gazeta.pl> (wejście 04.10.2013).
- [40] <http://www.twojapogoda.pl/wiadomosci/112876,zima-bedzie-zakaz-palenia-weglem?page=2>(wejście 04.10.2013).
- [41] Europejska Agencja Środowiska, *Air quality in Europe – 2012 report*, Kopenhaga 2012.
- [42] M. I. Blanco, D. Azqueta, *Can the environmental benefits of biomass support agriculture? – The case study of cereals for electricity and bioethanol production in Northern Spain*, “Energy Policy” 36, 2008, s. 357–366.
- [43] <http://www.youtube.com/watch?v=VnQVZgrHMdk> (wejście 12.03.2014).



Summary

Today with a great pleasure we hand over the monographic study *Aeroenergetic technologies*. We aimed to present a current state of wind-power engineering and the future prospects of its development. The present study constitutes a continuation of our previous papers: *Bioenergetic technologies* (2009), *Geoenergetic technologies* (2010) and *Helioenergetic technologies* (2013).

An enormous power of the wind had inspired our ancestors to use it for the economic purposes. Not many people realize that the great geographic discoveries all over the world were possible due to the energy of the wind which powered the sailing ships. A first description of a water-transporting windmill comes from India and had been written around 400 BCE, while 200 BCE in China people used windmills to supply their farm fields. In Poland, the earliest documents about an economic use of the wind energy come from the end of XIII century CE. The end of XIX century CE has brought a new chapter in the development of aeroenergetics, in which the windmills were used to produce an electric current. Nowadays we witness the aeroenergetics in its full growth in many areas around the world.

The wind turbines produce renewable energy almost free of charge, they do not contribute to the emission of the greenhouse gases, they can be installed on the land and on the sea. However, incorrect built and placed windmills are likely to affect the people's well-being and environment as a whole in very negative way. Therefore it seems very important to ensure that aeroenergetics will develop according to the principles of sustainable development.



Recenzent
Kazimierz Szymański
Barbara Dejewska

Opracowanie redakcyjne
Iwona Wakarecy

Projekt okładki
Krzysztof Skrzypczyk

Fotografie
Marcin Cichosz

Autor fotografii na okładce
Marcin Cichosz

©Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
Toruń 2014

ISBN 978-83-231-3277-6 (oprawa miękka)
ISBN 978-83-231-3278-3 (oprawa twarda)

Niniejsza monografia została sfinansowana przez Uniwersytet Mikołaja Kopernika
w formie stypendium przyznanego jej Autorowi.

Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
ul. Gagarina 5, 87-100 Toruń
Redakcja: tel. (56) 611 42 95, fax (56) 611 47 05
e-mail: wydawnictwo@umk.pl
Dystrybucja: tel./fax (56) 611 42 38
e-mail: books@umk.pl
www.wydawnictwoumk.pl

Wydanie I

Druk i oprawa:
Wydawnictwo Naukowe UMK

