



AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Czyste energie

wykład 9

Energetyka wiatrowa

dr inż. Janusz Teneta

**Wydział EAIiIB
Katedra Automatyki i Robotyki**

AGH Kraków 2019

Rozwój odnawialnych źródeł energii w Polsce (zainstalowana moc)

Rodzaj instalacji OZE	Moc zainstalowana [MW], wg stanu na 31.12.2018 r.*						
	2005 r.	2006 r.	2007 r.	2008 r.	2009 r.	2010 r.	2011 r.
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Instalacje wykorzystujące biogaz	31,972	36,760	45,699	54,615	70,888	82,884	103,487
Instalacje wykorzystujące biomasę	189,790	238,790	255,390	231,990	252,490	356,190	409,680
Instalacje wykorzystujące energię promieniowania słonecznego	-				0,001	0,033	1,125
Instalacje wykorzystujące energię wiatru	83,280	152,560	287,909	451,090	724,657	1 180,272	1 616,361
Instalacje wykorzystujące hydroenergię	852,495	934,031	934,779	940,576	945,210	937,044	951,390
Łącznie	1 157,537	1 362,141	1 523,777	1 678,271	1 993,246	2 556,423	3 082,043
	wzrost r/r	204,604	161,636	154,494	314,975	563,177	525,620

Rodzaj instalacji OZE	Moc zainstalowana [MW], wg stanu na 31.12.2018 r.*						
	2012 r.	2013 r.	2014 r.	2015 r.	2016 r.	2017 r.	2018 r.
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Instalacje wykorzystujące biogaz	131,247	162,241	188,549	212,497	233,967	235,373	237,618
Instalacje wykorzystujące biomasę	820,700	986,873	1 008,245	1 122,670	1 281,065	1 362,030	1 362,870
Instalacje wykorzystujące energię promieniowania słonecznego	1,290	1,901	21,004	71,031	99,098	103,896	146,995
Instalacje wykorzystujące energię wiatru	2 496,748	3 389,541	3 833,832	4 582,036	5 807,416	5 848,671	5 864,443
Instalacje wykorzystujące hydroenergię	966,103	970,128	977,007	981,799	993,995	988,377	981,504
Łącznie	4 416,088	5 510,684	6 028,637	6 970,033	8 415,541	8 538,347	8 593,430
	wzrost r/r	1 334,045	1 094,596	517,953	941,396	1 445,508	122,806

Źródło: Dane URE na koniec 2018

Rozwój odnawialnych źródeł energii w Polsce (produkcja energii)

Ilość energii elektrycznej wytworzonej z OZE w latach 2005 - 2018, potwierdzonej świadectwami pochodzenia, wydanymi do dnia 31.12.2018 r.*

Rodzaj instalacji OZE	Ilość [MWh]						
	Okres wytwarzania energii elektrycznej						
	2005 r.	2006 r.	2007 r.	2008 r.	2009 r.	2010 r.	2011 r.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Instalacje wykorzystujące biogaz	104 465,281	116 691,863	161 767,939	220882,924	295 311,766	363 595,743	430 537,322
Instalacje wykorzystujące biomasę	467 975,678	503 846,206	545 764,936	560967,435	601 088,244	635 634,844	1 101 188,962
Instalacje wykorzystujące energię promieniowania słonecznego	-	-	-	-	1,328	1,672	177,805
Instalacje wykorzystujące energię wiatru	135 291,628	257 037,412	472 116,429	806318,563	1 045 166,230	1 823 297,061	3 128 672,517
Instalacje wykorzystujące hydroenergię	2 175 559,099	2 029 635,604	2 252 659,312	2152943,187	2 375 778,804	2 922 051,638	2 316 833,384
Instalacje wykorzystujące technologię współspalania biomasy, biopłynów, biogazu lub biogazu rolniczego z innymi paliwami	877 009,321	1 314 336,612	1 797 217,058	2751954,127	4 287 815,430	5 243 251,417	5 999 582,057
Łącznie	3 760 301,007	4 221 547,697	5 229 525,674	6 493 066,236	8 605 161,802	10 987 832,375	12 976 992,047

Rodzaj instalacji OZE	Ilość [MWh]						
	Okres wytwarzania energii elektrycznej						
	2012 r.	2013 r.	2014 r.	2015 r.	2016 r.	2017 r.	2018 r.*
(1)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Instalacje wykorzystujące biogaz	530 524,345	665 143,194	803 435,552	875 773,032	1 005 558,925	1 032 724,096	782 734,634
Instalacje wykorzystujące biomasę	2 209 928,971	3 928 038,893	4 623 815,704	4 736 199,204	4 619 210,232	3 514 789,021	2 406 797,934
Instalacje wykorzystujące energię promieniowania słonecznego	1 177,532	1 418,771	4 514,874	43 289,925	82 749,488	84 436,477	76 270,786
Instalacje wykorzystujące energię wiatru	4 612 893,792	6 078 433,878	7 640 802,091	10 706 934,242	12 493 262,519	14 948 873,967	9 685 970,309
Instalacje wykorzystujące hydroenergię	2 031 724,612	2 439 500,536	2 181 462,160	1 829 456,571	779 467,360	790 752,220	456 007,351
Instalacje wykorzystujące technologię współspalania biomasy, biopłynów, biogazu lub biogazu rolniczego z innymi paliwami	7 088 695,428	3 785 104,165	4 462 167,696	4 260 440,561	1 194 468,274	1 000 565,525	448 567,879
Łącznie	16 474 944,680	16 897 639,437	19 716 198,077	22 452 093,535	20 174 716,798	21 372 141,306	13 856 348,893
Postanowienia o odmowie wydania świadectwa pochodzenia		68 595,208	15 309,471	9 195,808	14 046,619	23 245,567	2 506,449
Wnioski "w toku" na dzień 31.12.2018 r.**		33 772,635	4 001,243	302,252	213 144,069	43 323,655	885 741,970
w tym wnioski dot. wyłącznie jednostek wykorzystujących biomasę		0,000	1 516,452	0,000	192 194,754	35 811,931	344 639,906

Źródło: Dane URE na koniec 2018

Dobowe profile produkcji energii z turbin wiatrowych

Doba handlowa:
2019-06-02

Doba handlowa:
2019-02-01

LATO

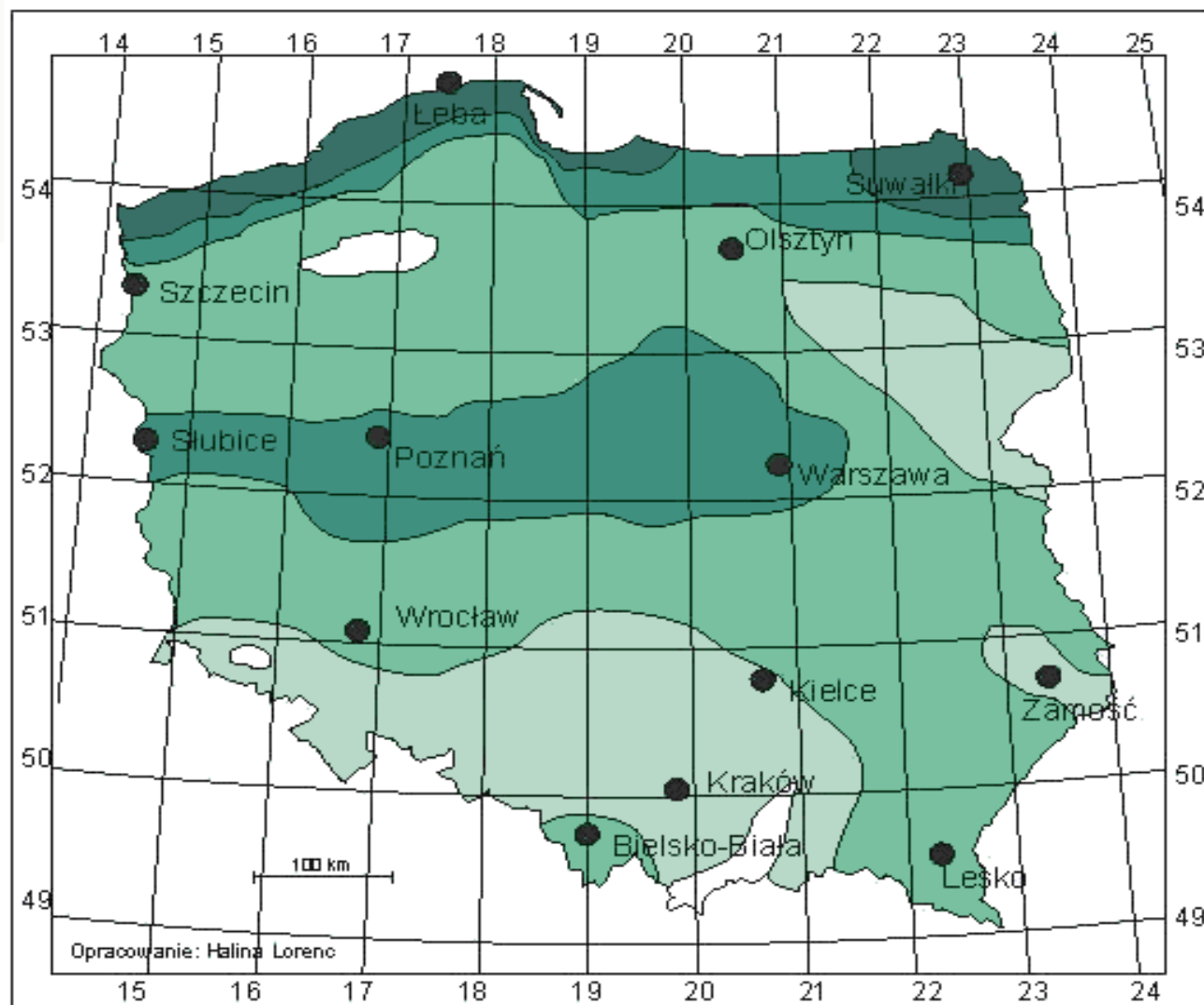
Godzina	Sumaryczna generacja źródeł wiatrowych
	[MWh]
1	574,763
2	494,841
3	467,089
4	434,990
5	370,851
6	342,654
7	235,300
8	114,221
9	79,858
10	69,108
11	81,333
12	121,684
13	196,606
14	244,683
15	222,196
16	249,195
17	200,459
18	131,197
19	122,398
20	164,712
21	384,930
22	824,765
23	1 219,040
24	1 417,817

Praktycznie
brak
generacji

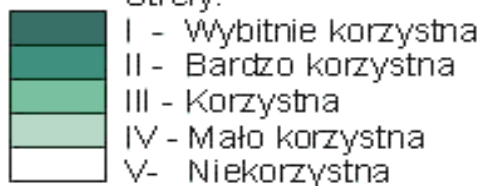
ZIMA

Godzina	Sumaryczna generacja źródeł wiatrowych
	[MWh]
1	607,615
2	644,638
3	693,437
4	759,141
5	886,377
6	976,718
7	1 120,952
8	1 311,701
9	1 402,244
10	1 392,553
11	1 269,953
12	1 291,417
13	1 391,630
14	1 542,141
15	1 745,368
16	1 902,279
17	2 223,703
18	2 487,666
19	2 526,979
20	2 627,254
21	2 586,654
22	2 567,393
23	2 535,243
24	2 565,367

Źródło: Dane Raporty dzienne PSE



Strefy:



Strefy energetyczne wiatru w Polsce. Mapa opracowana przez prof. H. Lorenc na podstawie danych pomiarowych z lat 1971 – 2000.

ELEKTROWNIE WIATROWE W POLSCE

Województwo	Ilość instalacji	Łączna moc [MW]
Zachodniopomorskie	99	1481.720
Wielkopolskie	224	697.880
Pomorskie	57	692.915
Kujawsko-pomorskie	299	595.910
Mazowieckie	101	385.825
Łódzkie	218	582.423
Warmińsko-mazurskie	43	354.265
Podlaskie	28	197.010
Lubuskie	14	192.000
Dolnośląskie	12	176.360
Podkarpackie	25	152.915
Lubelskie	12	138.900
Opolskie	11	138.150
Śląskie	29	33.575
Świętokrzyskie	21	22.140
Małopolskie	13	6.681
RAZEM	1206	5848.671

Źródło: URE, data aktualizacji danych: 04.06.2018

Charakterystyka energii wiatru.

Energia wiatru jest energią pochodzenia słonecznego. Powietrze jest ogrzewane przez promieniowanie, a także dzięki konwekcji i przewodzeniu od nierównomiernie nagrzewanych przez Słońce różnych powierzchni na Ziemi.

Powietrze nad powierzchnią nagrzaną przez Słońce unosi się do góry, co powoduje zasysanie chłodnego powietrza np. z nad dużej powierzchni zbiornika wody (ocean, morze, jezioro).

Wytworzone różnice temperatur i gęstości ogrzanych mas powietrza powodują przemieszczanie się ich zgodnie z naturalnymi warunkami ukształtowania powierzchni ziemi.



Krażenie powietrza nad lądem i zbiornikiem wodnym w ciągu dnia. W nocy kierunek wiatru jest odwrotny- wówczas to woda ogrzewa powietrze oddając ciepło zmagazynowane w ciągu dnia.

Ruch wirowy Ziemi (siła Coriolisa) oraz prądy morskie także mają wpływ na kierunki przemieszczania się mas powietrza.

Szacuje się, że około 1÷2% energii promieniowania słonecznego, które dociera do powierzchni Ziemi, jest zamieniane na energię kinetyczną wiatru.

Jest to równoważne mocy ok. 1700 TW.

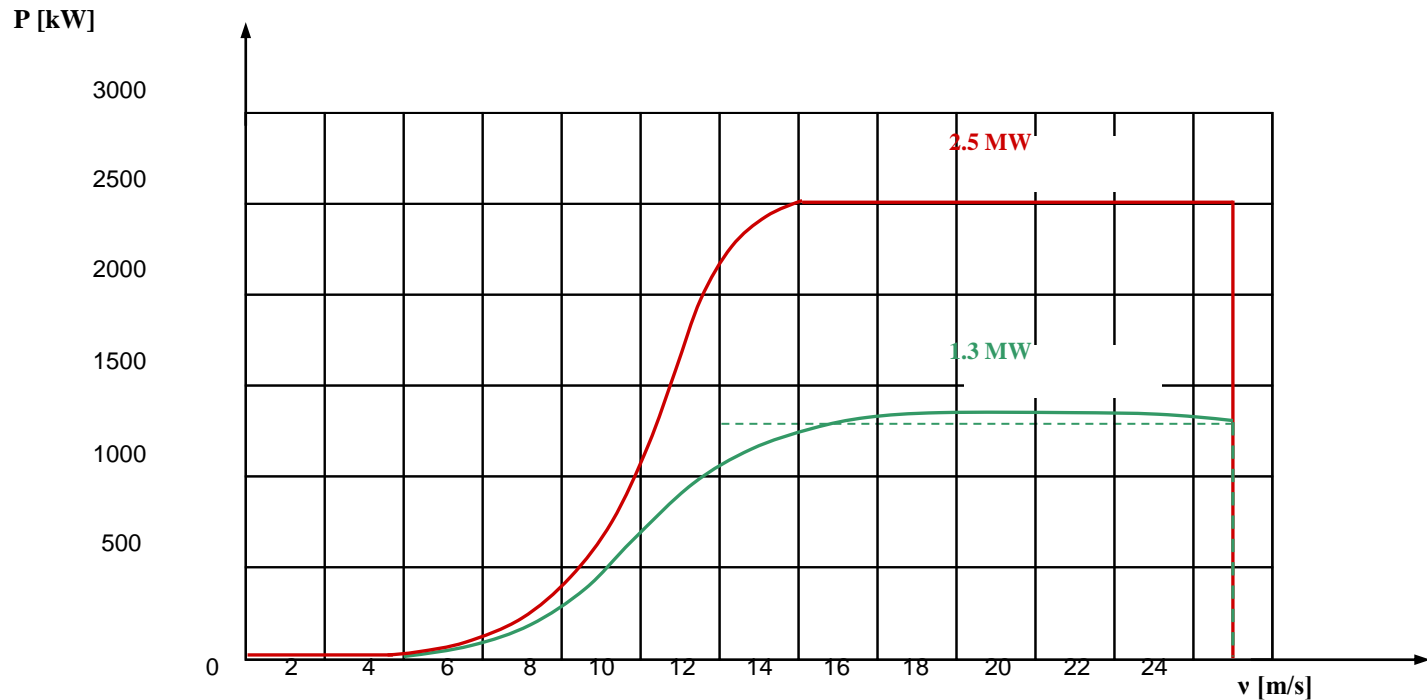
Miejsca odpowiednie do zainstalowania siłowni wiatrowych i wykorzystania energii wiatru mają potencjał energetyczny o mocy ok. 40 TW.

Opłacalność

Dolną granicą opłacalności eksploatacji małych turbin wiatrowych (5÷6 kW) jest prędkość wiatru 4 m/s, natomiast dla dużych elektrowni wiatrowych prędkość 5,5 m/s.

Górną granicą pracy dużych elektrowni jest prędkość 25÷30 m/s.

Charakterystyki pracy turbin wiatrowych



Przykładowe krzywe mocy dla siłowni wiatrowych;

Regulacja typu "stall" - 1.3MW (przecignięcie – odpowiednia geometria łopat)

Regulacja typu "pitch" - 2.5MW. (zmiana kąta natarcia łopat wirnika)

Metody regulacji prędkości obrotowej w turbinach wiatrowych

- Regulacja kątem ustawienia turbiny w kierunku wiatru
- Regulacja kątem natarcia łopatek (Active Pitch)
- Regulacja przez zmianę obciążenia
- Regulacja przez przeciągnięcie (stall)
- Regulacja lotkami łopatek wirnika
- Regulacja przez zmianę poślizgu generatora

Przykładowe parametry turbin wiatrowych

WEC	Rated power	Rotor diameter	Swept area	Hub height	Rotational speed	Cut-out wind speed
ENERCON E-44	900 kW	44 m	1,521 m ²	45 / 55 m	variable, 16 - 34.5 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-48	800 kW	48 m	1,810 m ²	50 / 60 / 65 / 76 m	variable, 16 - 31.5 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-53	800 kW	52.9 m	2,198 m ²	50 / 60 / 73 m	variable, 11 - 29.5 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-70	2,300 kW	71 m	3,959 m ²	57 / 64 / 75 / 85 / 98 / 114 m	variable, 6 - 21 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-82 E2	2,000 kW	82 m	5,281 m ²	78 / 84 / 85 / 98 / 108 / 138 m	variable, 6 - 18 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-82 E2	2,300 kW	82 m	5,281 m ²	78 / 84 / 85 / 98 / 108 / 138 m	variable, 6 - 18 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-82 E4	2,350 kW	82 m	5,281 m ²	59 / 69 / 78 / 84 m	variable, 6 - 18 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-82 E4	3,000 kW	82 m	5,281 m ²	69 / 78 / 84 m	variable, 6 - 18 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-92	2,350 kW	92 m	6,648 m ²	78 / 84 / 85 / 98 / 104 / 108 / 138 m	variable, 5 - 16 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-101	3,050 kW	101 m	8,012 m ²	99 / 124 / 135 / 149 m	variable, 4 - 14.5 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-101 E2	3,500 kW	101 m	8,012 m ²	74 m	variable, 4 - 14.5 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-115	3,000 kW	115.7 m	10,515.5 m ²	92 / 122 / 135 / 149 m	variable, 4 - 12.8 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-126 EP4	4,200 kW	127 m	12,668 m ²	135 m	variable, 3 - 11.6 rpm	28 - 34 m/s
ENERCON E-126	7,580 kW	127 m	12,668 m ²	135 m	variable, 5 - 12.1 rpm	28 - 34 m/s

Źródło: ENERCON Product overview 2015

Elektrownie wiatrowe są tak projektowane, aby produkowały energię elektryczną tak tanio jak to tylko możliwe.

Generalnie projektuje się je tak, aby oddawały maksymalną moc przy wietrze o prędkości 15m/s.

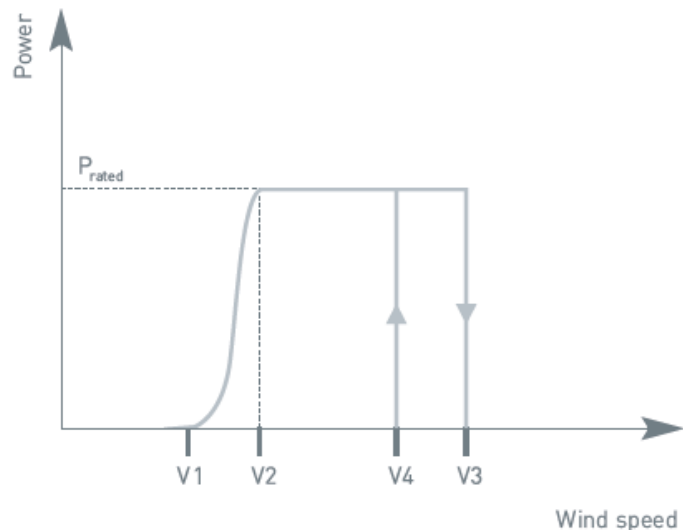
Nie opłaca się produkować elektrowni, które będą osiągać maksimum mocy przy silniejszych wiatrach, ponieważ występują one niezwykle rzadko.

Paradoksalnie większe prędkości wiatru dla zwykłej elektrowni są niekorzystne.

Konieczne jest wtedy wytracenie nadmiaru energii wiatru, aby chronić ją przed uszkodzeniem.

Metody wyłączania turbin przy zbyt silnym wietrze

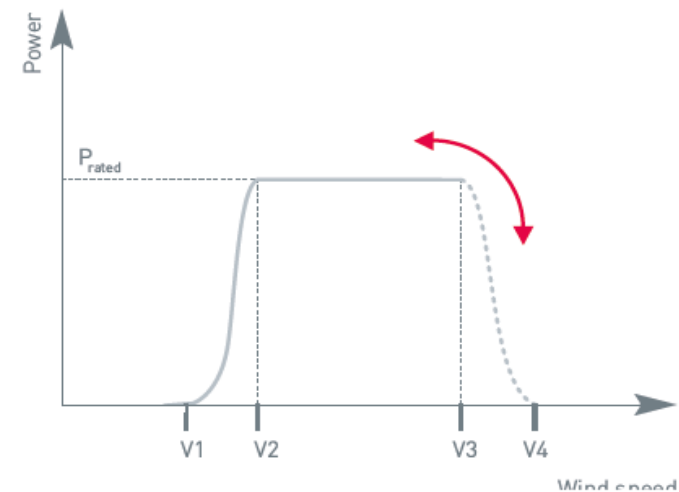
Power curve without ENERCON storm control



Wind turbine shuts down at preset maximum wind speed (V3).

- V1 = Cut-in wind speed
- V2 = Rated wind speed
- V4 = Cut-in wind speed after deactivated storm control
- V3 = Cut-out wind speed with deactivated storm control

Power curve with ENERCON storm control



Wind turbine reduces output starting at a determined wind speed (V3). A shutdown does not occur until a predetermined maximum wind speed (V4) is reached.

- V1 = Cut-in wind speed
- V2 = Rated wind speed
- V3 = Beginning of power reduction
- V4 = Cut-out wind speed with activated storm control

Cechy energii wiatru

Jedną z najistotniejszych cech energii wiatrowej jest jej duża zmienność, zarówno w przestrzeni (geograficzna) jak i w czasie.

Prędkość wiatru, a więc i energia jaką można z niego czerpać, ulega zmianom dziennym, miesięcznym i sezonowym.

Zarówno w cyklu dobowym jak i sezonowym (lato-zima) obserwuje się korzystną zbieżność między prędkością wiatru a zapotrzebowaniem na energię.

Ponieważ energia uzyskiwana z wiatru jest na ogół dostępna wówczas, gdy jest potrzebna, może częściowo wyprzeć z sieci energetycznej tradycyjne elektrownie. To w efekcie pozwoli na redukcję emisji zanieczyszczeń.

Jednak nieprzewidywalność generacji energii wiatrowej może powodować duże problemy dla sieci elektroenergetycznych (chwilowa nadprodukcja energii).

Cechy energii wiatru

Spadek temperatury od 15 do 0°C przy stałym ciśnieniu powoduje wzrost gęstości powietrza i tym samym wzrost energii kinetycznej wiatru o ok. 6%.

Natomiast wzrost temperatury powietrza od 15 do 30°C powoduje spadek mocy o ok. 5%. Przy stałej temperaturze wzrost ciśnienia, np. od 973 hPa (730 mmHg) do 1037 hPa (770 mmHg), spowoduje wzrost energii kinetycznej powietrza o ok. 6%.

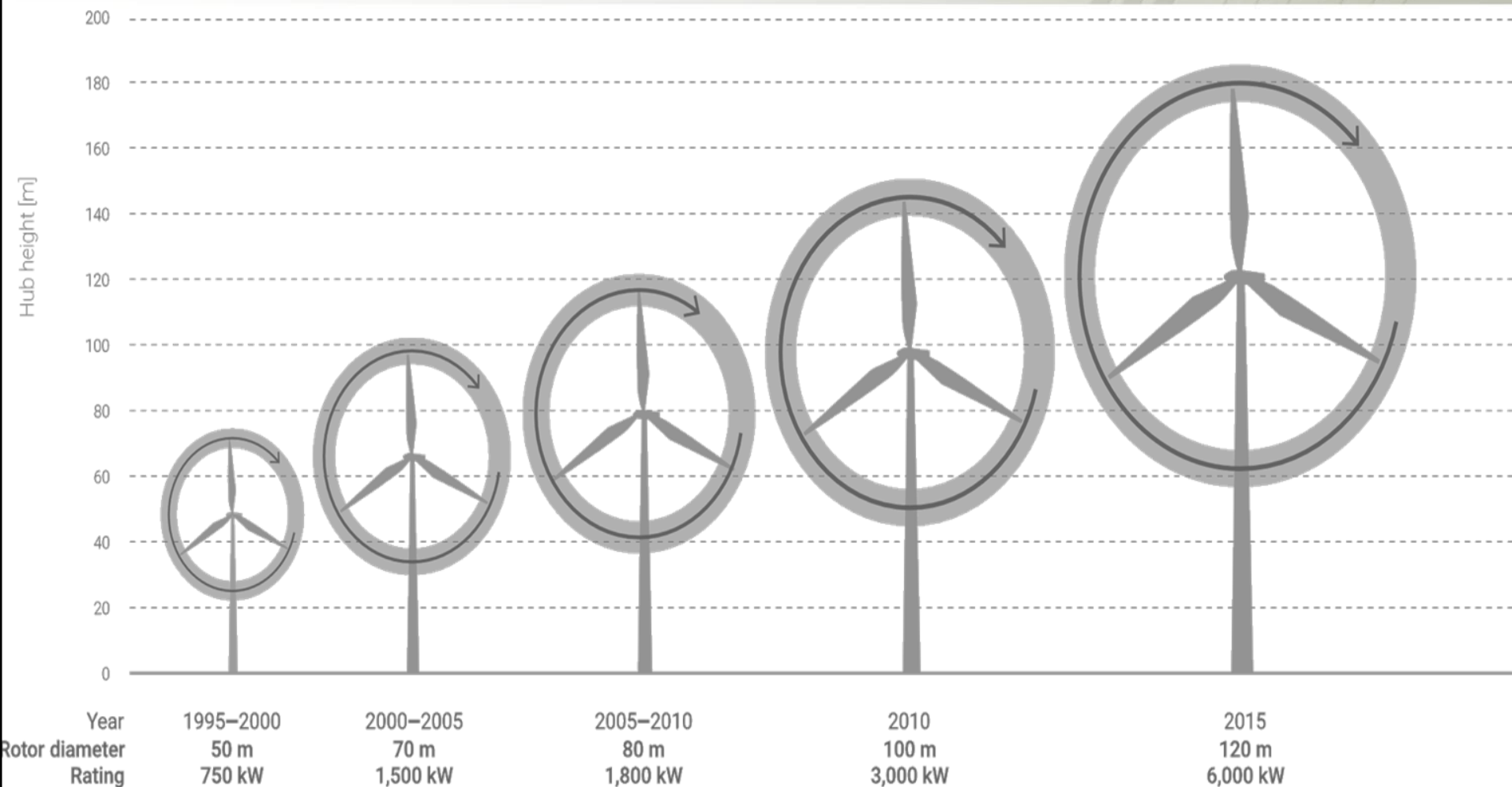
Zależności opisujące energię wiatru

Energia wiatru jest wprost proporcjonalna do prędkości wiatru w potęgze trzeciej, przy czym prędkość wiatru zmienia się wraz z wysokością, a dodatkowo zależy od ukształtowania terenu.

Przy powierzchni Ziemi prędkość wiatru równa się zeru, co jest spowodowane siłami tarcia. Siły te sprawiają, że tylko 1/4 energii kinetycznej wiatru przypada na wiatry wiejące na wysokości do 100 m, pozostałe 3/4 energii mają wiatry wiejące wyżej niż 100 m.

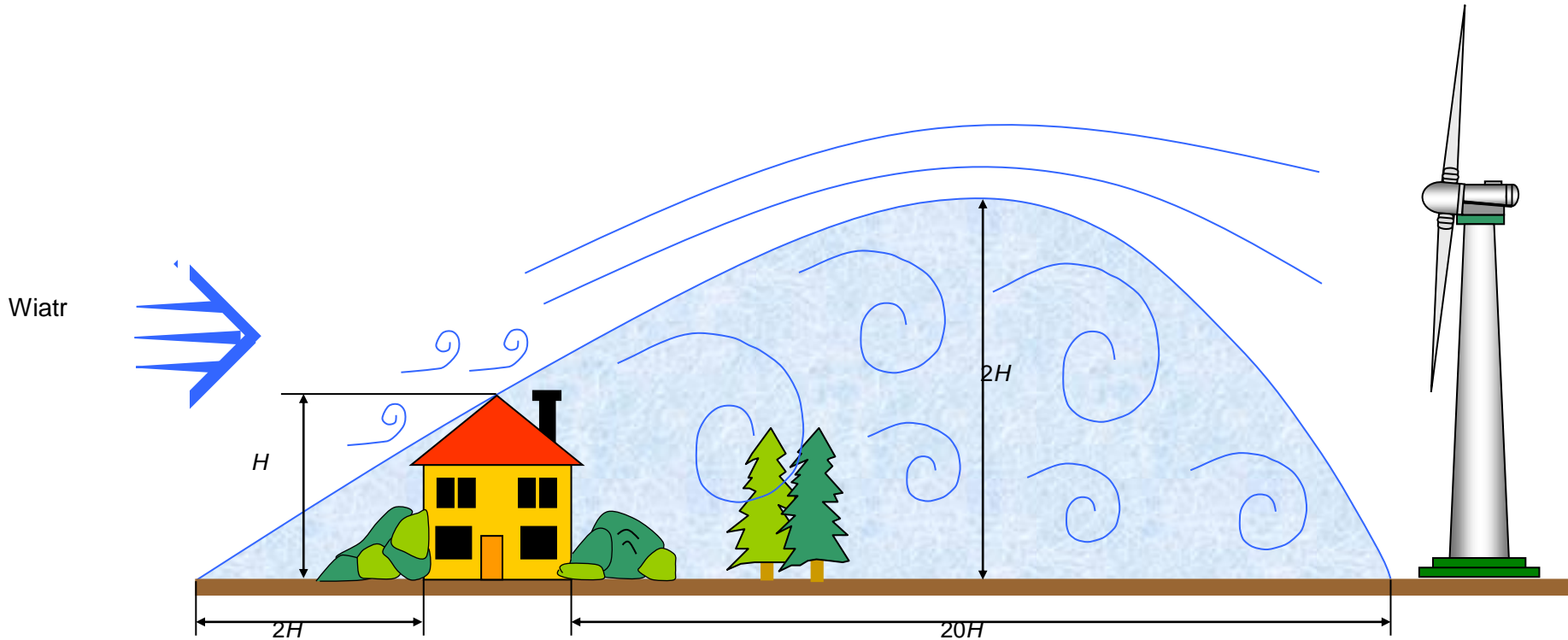
Jednak ze względów technicznych i ekonomicznych budowanie tak wysokich siłowni wiatrowych nie zawsze jest opłacalne.

Wysokość turbin wiatrowych



Źródło: National Renewable Energy Laboratory

Przeszkody terenowe



Rys. 70. Strefa zaburzeń przy opływie przeszkody.

Podstawową zasadą właściwego planowania jest zachowanie odpowiedniej odległości turbin względem siebie.

Według zaleceń producenta odległość ta powinna wynosić od 5 do 8 średnic wirnika turbiny, a więc w przypadku elektrowni 2 MW, V80 powinno to być 400÷640m.

Dystans mniejszy niż 400 metrów przyczyniłby się do wzajemnego pozbawiania się energii przez turbiny. Niezwykle istotną sprawą są dominujące kierunki wiatru w danym miejscu.

Turbiny powinny być wystawione na najczęściej i najsilniej wiejące wiatry. Poza tym muszą stać w taki sposób, aby możliwie najmniej nawzajem się zasłaniały. Elektrownie stojące w pierwszej linii względem dominujących kierunków wiatru mają zawsze największą efektywność.

Gdyby chciano odzyskać całą energię, jaką niesie wiatr, powietrze nie mogłoby opuścić wirnika. Nie uzyskałoby się wtedy jednak żadnej energii, gdyż powietrze nie mogłoby również wpaść w obszar wirnika.

Okazuje się, że najbardziej efektywna jest turbina, która spowalnia wiatr do $2/3$ jego początkowej prędkości.

Aby to zrozumieć należy sięgnąć do podstawowego prawa aerodynamiki turbin wiatrowych - prawa Betz'a.

How to build a WIND TURBINE

Axial flux alternator windmill plans
8 foot and 4 foot diameter machines

© Hugh Piggott -May 2003

It's a good idea to use metric units for aerodynamic calculations. The power (watts) in the wind blowing through the rotor is given by this formula:

$$\frac{1}{2} \times \text{air-density} \times \text{swept-area} \times \text{windspeed}^3$$

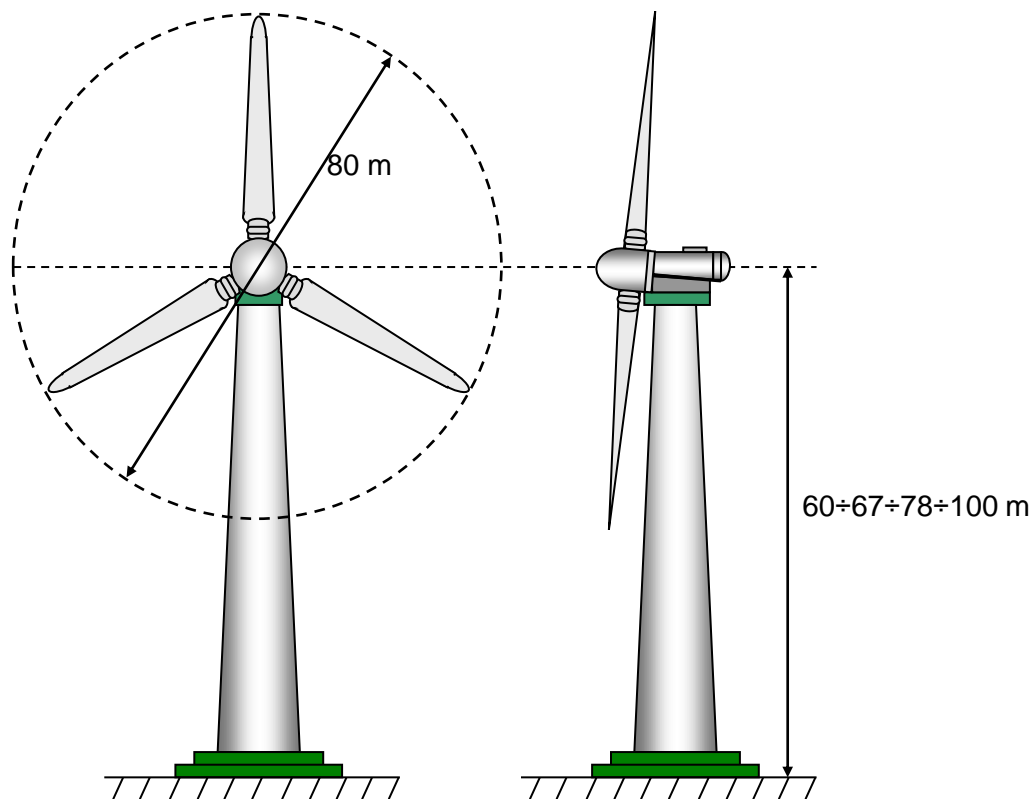
(where air density is about 1.2 kg/m³)

The blades can only convert at best half of the wind's total power into mechanical power. In practice only about 25 -35% is a more typical figure for homebuilt rotor blades. Here is a simpler rule of thumb:

$$\begin{aligned} \text{Blade power} &= 0.15 \times \text{Diameter}^2 \times \text{windspeed}^3 \\ &= 0.15 \times (2.4 \text{ metres})^2 \times (10 \text{ metres/second})^3 \\ &= 0.15 \times 6 \times 1000 = \underline{900 \text{ watts approx.}} \end{aligned}$$

(2.4m diameter rotor at 10 metres/sec or 22 mph)

Turbina o osi poziomej



Rys. 2.13. Rzut siłowni wiatrowej.



Efekt ugięcia łopat



Źródło: www.energiaeco.pl

Efekt ugięcia łopat



Źródło: www.energiaeco.pl

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Fundament 18,5 x 18,5 x 1,5 m

Źródło: www.energiaeco.pl

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Fundament
48 ton stali
zbrojeniowej

Źródło: www.energiaeco.pl

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Fundament
520 m³ betonu

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Wieża 76 m
170 ton
4 części

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Rotor
80 m średnicy

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Gondola z
przekładnią i
generatorem

Budowa farmy wiatrowej Cisowo



Montaż śmigła

Farma wiatrowa Cisowo widok z lotu ptaka



Źródło: www.energiaeco.pl



AGH

Skrzynia biegów

Za pomocą wału wolnoobrotowego (głównego), skrzyni biegów i wału szybkoobrotowego jest przekazywana moc z wirnika do generatora. Średnia prędkość wirnika wynosi 22 obr/min, a prędkości generatorów zawierają się w granicach 1000÷3000 obr/min. Dlatego też niezbędne jest zastosowanie odpowiedniej przekładni. Mając skrzynie biegów możemy wybrać między niską prędkością obrotową i wysokim momentem napędowym otrzymywanym od wirnika a wysoką prędkością obrotową i niskim momentem napędowym. Skrzynia biegów w turbinie pracuje przy jednym, stałym przełożeniu. Przykładowo dla elektrowni o mocy 600 kW jest to zazwyczaj przełożenie 1:50.



Rys. 28. Skrzynia biegów elektrowni wiatrowej.

Skrzynie biegów komplikują budowę elektrowni wiatrowej, zwiększają jej masę, utrudniają czynności serwisowe i naprawcze. Są to powody dla których, szczególnie w turbinach dużej mocy, coraz częściej stosuje się koncepcję z wolnoobrotowym generatorem synchronicznym. W rozwiązaniu tym o wartość częstotliwości wyjściowej dba układ energoelektroniczny.



Rys. 29. Siłownia wiatrowa bez przekładni głównej i charakterystyczna sylwetka gondoli.



Nietypowe rozwiązania konstrukcyjne

W energetyce wiatrowej oprócz najczęściej spotykanej turbiny o trzech aerodynamicznych łopatach stosują się też inne rozwiązania konstrukcyjne:

Elektrownie jedno i dwułopatowe



Rys. 38. Przykład trzech siłowni jednołopatowych o mocy 640 kW każda. (Wilhelmshafen, Niemcy)



Siłownie z wirnikiem jednołopatowym są bardzo rzadko spotykane. Wymagają one o wiele większej prędkości obrotowej, która pozwoliłaby uzyskać moc wyjściową porównywalną do elektrowni z trzema łopatami. Automatycznie stają się głośniejsze i mniej przyjazne dla oka. Trochę większą popularnością cieszą się siłownie z dwoma łopatami. Wymagają one mniejszych prędkości obrotowych w porównaniu z jednołopatowymi. Charakteryzują się też mniejszym hałasem. Dużymi zaletami tych rozwiązań są niskie koszty przedsięwzięcia oraz spadek masy wirnika.



AGH

Elektrownie wielołopatowe

Siłownie te sprawdzają się doskonale w układach zamkniętych, jako dodatkowe źródło prądu dla domu lub napęd pomp wodnych. Ich niewątpliwą zaletą jest rozruch już przy bardzo słabym wietrze (2 m/s), duży moment obrotowy oraz prostota konstrukcji. Łopaty nie wymagają specjalnych profili aerodynamicznych. Elektrownie te w porównaniu z elektrowniami o dwóch lub trzech śmigłach są bardzo tanie w eksploatacji i budowie.

Są one bardzo powszechne na rzadko zaludnionych terenach USA, gdzie znalazły zastosowanie jako małe elektrownie do pracy na sieć wydzieloną w nieoptymalnych warunkach (np. tereny nizinne, średnio korzystne warunki wietrzne).



Rys.40. Zdjęcia przedstawiają: po lewej wiatrak używany w Wimberley w Teksasie, a po prawej w Springsure w Australii. Oba wykorzystywane były do pompowania wody.



Elektrownie z wirnikiem typu down-wind

W elektrowniach "down-wind" wirnik znajduje się za masztem w stosunku do wiejącego wiatru. Rozwiązanie takie przy odpowiednim kształcie gondoli zapewnia samoczynne kierunkowanie się wirnika. Pozwala to uniknąć stosowania mechanizmu odchylenia wirnika, który jest wymagany w elektrowniach typu "up-wind" z wirnikiem umieszczonym przed masztem w stosunku do wiejącego wiatru (zdecydowana większość działających elektrowni). Struktura "down-wind" umożliwia także zastosowanie do budowy łopatek wirnika mniej sztywnego materiału, dzięki czemu przy silniejszych wiatrach przejmują część obciążeń od wieży.



Rys. 41. Siłownia typu down-wind o mocy 750 kW firmy Wind Turbine Company.



Rys. 42. Trójłopatowe siłownie typu "down-wind" o średnicy wirnika 15 m i mocy 50 kW firmy Atlantic Orient Company.

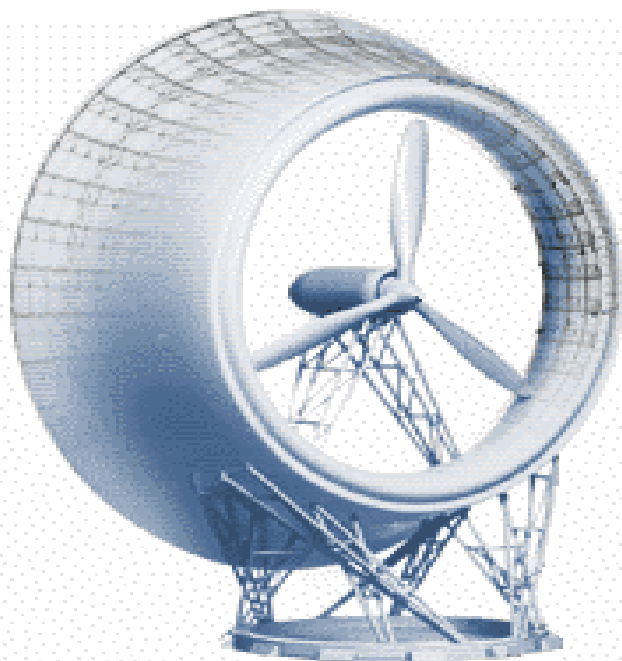
Elektrownie z wirnikiem typu down-wind

Rozwiązanie to stosuje się raczej przy małych siłowniach, gdzie nie ma elektronicznego systemu naprowadzania na kierunek wiatru. Jego podstawową wadą jest powstawanie pola silnych turbulencji tuż za wieżą co powoduje niekorzystne zjawiska wpływające na łopatkę wirnika.

Jednym z zagrożeń stosowania tej konstrukcji jest możliwość skręcania kabla służącego do przesłania mocy z generatora na dół.

Odkręcenie go bez mechanizmu odchylania wirnika jest niemożliwe.

Stosuje się wówczas rozwiązanie w postaci pierścieni ślizgowych, które przy większych mocach (a więc i większych prądach) jest bardzo niewygodne.



Rys. 43. Turbina firmy Vortec o średnicy wirnika 54 m i mocy 3,5 MW.

W turbinach z dyfuzorem wykorzystuje się fakt wynikający z prawa Bernoulliego. Dotyczy on zmiany prędkości przepływu gazu w rurze w miejscu gdzie następuje zmiana jej średnicy. W przewężeniu takiej rury lub tunelu wiatr przepływa szybciej niż poza nim. Automatycznie wirnik umieszczony w takim miejscu oddaje więcej energii niż wirnik bez otunelowania przy tych samych warunkach atmosferycznych. Zastosowanie dyfuzora umożliwia wyeliminowanie strat energii kinetycznej odśrodkowej strugi powietrza na śmigle. Szczelina w dyfuzorze która znajduje się za wirnikiem powoduje dodatkowo powstanie strefy podciśnienia powodując dodatkowo przyrost prędkości przepływu powietrza przez wirnik.

To wszystko pozwala znacznie zwiększyć sprawność przetwarzania energii wiatru na energię elektryczną, przy jednoczesnym obniżeniu granicy minimalnej prędkości wiatru, od której stosowanie turbiny wiatrowej staje się opłacalne. Turbiny z dyfuzorem mogą pracować już od prędkości wiatru $v > 2$ m/s, czyli praktycznie na całym obszarze Polski.



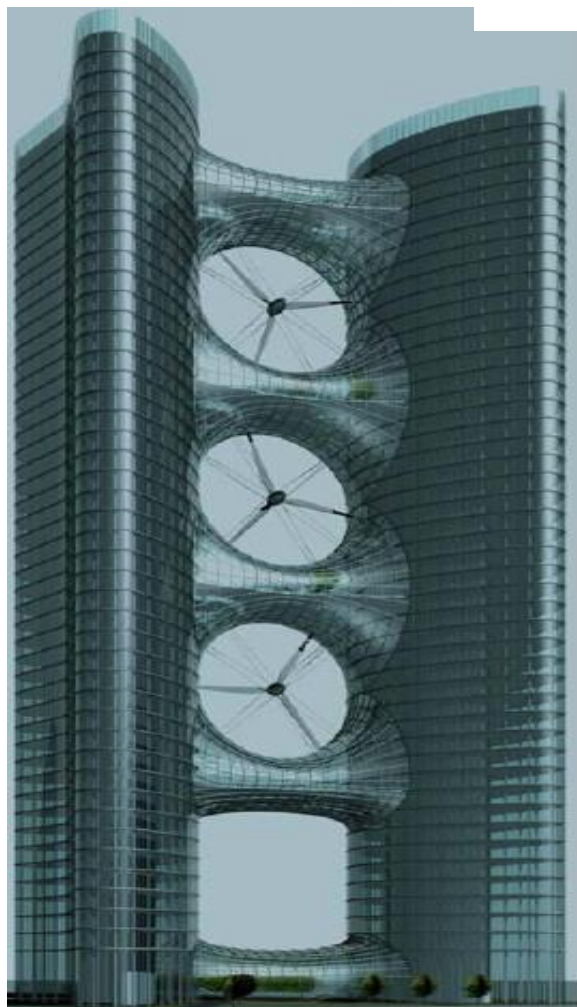
Rys. 45. Siłownia firmy Vortec z szczeliną w dyfuzorze.

Opłacalność stosowania tego rozwiązania może być osiągnięta przy niższych wieżach lub przy mniejszych średnicach wirnika, co ma wpływ na obniżenie nakładów inwestycyjnych. Przedstawiona turbina firmy Vortec (rys.2.43.) ma bardzo wysoki współczynnik wytworzonej energii do powierzchni określanej przez wirnik ok. $1,5$ kW/m². Prędkość obrotowa wirnika wynosi 27 obr/min przy przekładni 45:1.



Rys. 44. Turbiny firmy Vortec o średnicy wirnika 66 m i mocy 5 MW.

Przy produkcji dyfuzorów wykorzystuje się laminat z włókna szklanego lub węglowego oraz żywice epoksydową. Są to materiały o dłuższej wytrzymałości mechanicznej, odporności korozyjnej i małym ciężarze.



Rys. 46. Projekt wykorzystania budynku jako dyfuzora.

Funkcję dyfuzora może też spełniać przelotowy otwór lub kanał w budynku, ścianie lub parkanie. Wykorzystuje się tutaj koncentrację energii i spiętrzenia wiatru, powodujące wzrost różnicy ciśnień od strony nawietrznej i zawietrznej. Na rys.46 widać dwa 43 piętrowe biurowce w Bahrajnie połączone trzema siłowniami o średnicy 30 m i mocy 225kW. Budynek pełni funkcję dyfuzora.

Rys 47 również przedstawia koncepcje wykorzystania architektury dwóch bliźniaczych budynków jako dyfuzora.

Pomiędzy nimi znajdują się zintegrowane z budynkami trzy turbiny o średnicy 35 m i mocy 250 kW.

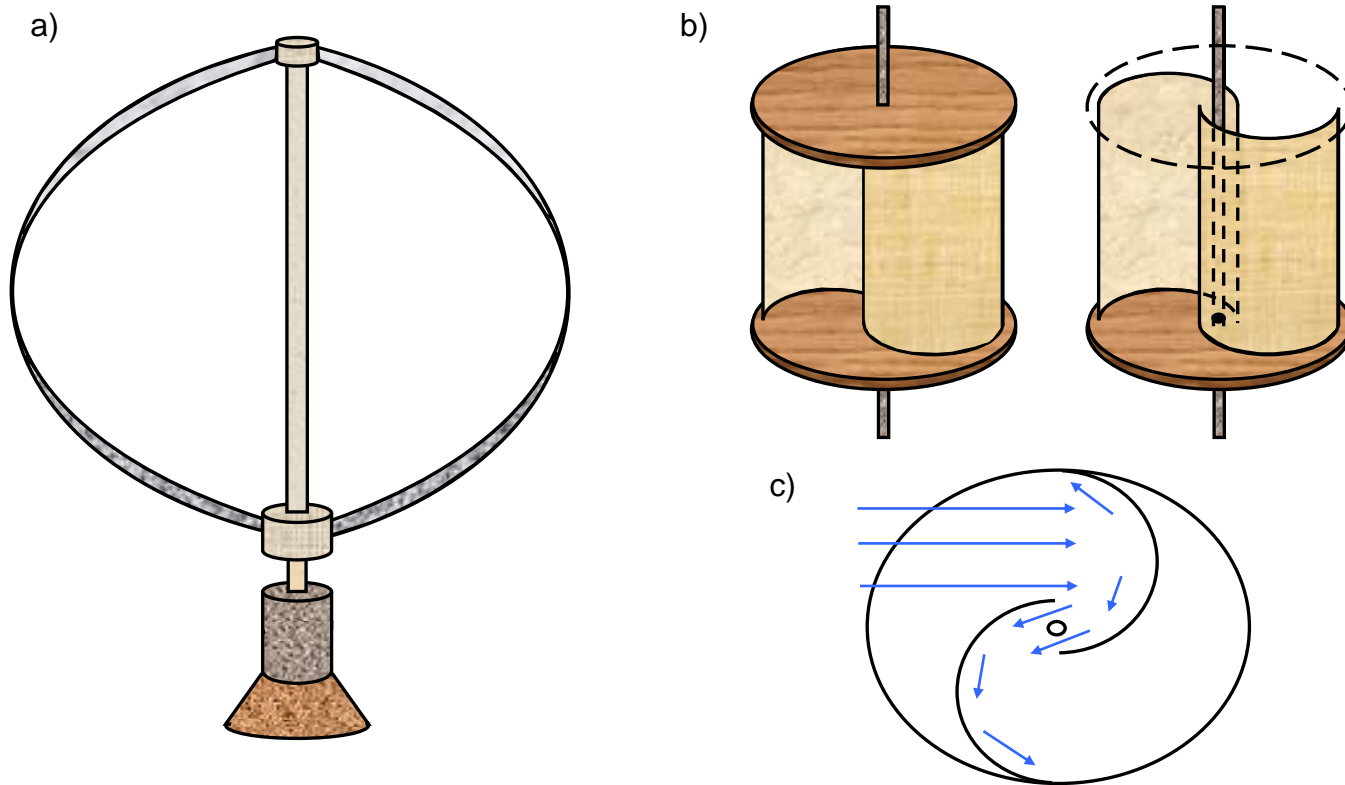


Rys. 47. Trzy turbiny o średnicy 30 m i mocy 225 kW w jednym z biurowców w Bahrajnie.

Elektrownie wiatrowe o pionowej osi obrotu

Dotychczas opisywane elektrownie wiatrowe, były siłowniami o poziomej osi obrotu (Horizontal Axis Wind Turbines, HAWT). Istnieją też siłownie o pionowej osi obrotu (Vertical Axis Wind Turbines, VAWT). Wśród konstrukcji typu VAWT można wyróżnić dwie podstawowe:

***z wirnikiem Darrieus'a,
z wirnikiem Savoniusa.***



Rys. 48. : a) wirnik Darrieus'a ; b) wirnik Savoniusa ; c) działanie wirnika Savoniusa.

Wirniki Darrieus'a mają zazwyczaj dwie lub trzy łopaty, wygięte w kształt litery C. Siłownie te mają prawie zerowy moment rozruchowy i potrzebują do rozruchu jakiegoś zewnętrznego napędu. Najczęściej funkcję tę pełnią silniki elektryczne, ale są też rozwiązania, w których wirnik Darrieusa'a integruje się z pomocniczym wirnikiem Savoniusa

Wirnik Savoniusa charakteryzują się prostotą konstrukcji i stosunkowo dużym momentem startowym umożliwiającym pracę przy bardzo słabych wiatrach (1.5 m/s). Niestety cechuje je też niska sprawność (gorsza niż wirnika Darrieus'a), pociągająca za sobą duże wymiary dla uzyskania określonej mocy. Im wyższy stosunek wysokości do średnicy tym bardziej rośnie sprawność.



. Przykład konstrukcji łączonej, główny wirnik typu Darrieusa, natomiast pomocniczy Savoniusa.



Elektrownia w Cap Chat w Kanadzie o wysokości 100 m i mocy 4 MW.



Przykłady Siłowni z wirnikiem Savoniusa.

Badania wykazały że optymalny wirnik Savoniusa to taki, który ma jedynie 2 łopaty obrócone względem siebie o 90°.

Srednica otworu (przerwy pomiędzy płatami) powinna zawierać się w granicach 0.1÷0.15 średnicy jednego płata.

Powierzchnie ograniczające łopaty od góry i dołu powinny mieć ok. 5÷10% większą średnicę od samych łopat - zapobiega to ucieczce wiatru bokami. Jednym ze sposobów zwiększenia efektywności jest brak pionowej osi w wolnej przestrzeni pomiędzy łopatami, co powoduje jednak zmniejszenie sztywności konstrukcji.

Odpowiednie wykonanie tej siłowni pozwala na przetrwanie wiatrów do ok.60 m/s, przy praktycznie bezgłośnej pracy samego wirnika.

Modyfikacje turbin Darrieusa i Savoniusa

Z połączenia korzystnych cech konstrukcyjnych i aerodynamicznych turbin Darrieus'a i Savoniusa, przy jednoczesnym wyeliminowaniu ich ujemnych cech, otrzymano szereg turbin zmodyfikowanych.

Turbina TURBY



Rys.52. Zdjęcie turbiny Turby.

Turbina jest modyfikacją turbiny Darrieus'a i przeznaczona jest do pracy na dachu budynku. Ukośne ustawienie łopatek umożliwia wykorzystanie energii wiatru wiejącego zarówno poziomo, jak i pod różnymi kątami (rys.52). W wyniku spiętrzającego efektu budynku o wysokości 20 m, 5 m nad jego dachem panują warunki wiatrowe podobne do tych panujących w terenie niezabudowanym na wysokości 10 m. Dla obszarów o średniej prędkości wiatru 4,3 m/s turbina Turby o mocy 2,5 kW jest w stanie wytworzyć rocznie ok. 1800 kW·h energii elektrycznej. Produkowana przez firmę TU Delft (Holandia) ma średnicę 2 m, jest umieszczona na wieży o wysokości 5÷7,5 m, waży ok. 90 kg. Jej elementy kontrolne i regulacyjne są sprzęgnięte z generatorem.

Turbina EHD

W konstrukcji EHD zwiększono stosunek wysokości do średnicy turbiny, ale bez ukosowania łopatek. Turbina taka, opracowana w Sandia National Laboratories w USA, o stosunku wysokości do średnicy 2,8 i średnicy 17 m daje moc 300 kW.

Rysunek 53 przedstawia testową turbinę firmy CIDEON Engineering, o mocy 1 kW, pracującą z powodzeniem w Wolfsburgu w Niemczech.



Rys .53. .Siłownia z turbiną EHD firmy CIDEON Engineering o mocy 1 kW.



Turbina Wind Rotor

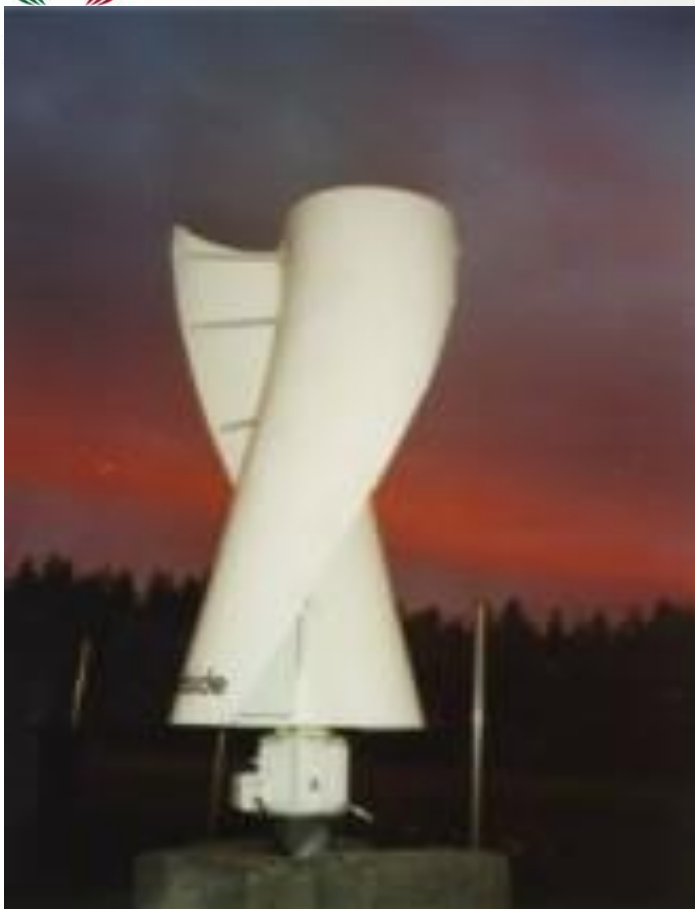


Rys. 58. Siłowni w Townsville o mocy 6 kW.

W turbinie tej modyfikacja polegała na zmianie liczby i szerokości łopat. Ma ona tylko dwie łopaty i są one szersze niż w turbinie H-Darrieusa, ale węższe niż w turbinie Savoniusa. Najmniejsze turbiny Wind Rotor firmy Ropatec AG mają moc 0,75 kW, powierzchnię łopat 2,25 m² i ważą 120 kg. Pracują w zakresie prędkości wiatru 3÷56 m/s. Największe natomiast mają moc 6 kW, powierzchnię łopat 2×725 m² i wagę 500 kg. Na rysunku 58 przedstawiona jest siłownia w Townsville w Australii utworzona z bliźniaczych turbin. Podwójna turbina ma wysokość 4,5 m i szerokość rotora 3,3 m. Umieszczona jest na 4 metrowej wieży. Jej moc max. to 6 kW.



Turbina świdrowa (śrubowa)



Rys. 59. Siłownia firmy WINDSIDE model WS-2B. (moc nom. 200W)

Turbina świdrowa jest modyfikacją turbiny Savoniusa, która polegała na śrubowym skręceniu łopat (rys. 64). Turbina ta pracuje już przy prędkości wiatru 1 m/s i nie ma praktycznie górnej granicy prędkości wiatru przy której nie mogła by pracować (jest w stanie przetrwać także sztormy). Dodatkową jej zaletą jest stabilna i cicha praca, brak konieczności stosowania masztów, a także łatwy montaż i demontaż.

Siłownie tego typu o powierzchni 2 m², osiągają moc 50 W przy prędkości wiatru 6 m/s. Całkowita masa takiej siłowni wiatrowej wynosi 200 kg. Napęd z wirnika przenoszony jest bezpośrednio na prądnicę, nie stosuje się tutaj przekładni zębatych. Dzięki temu siłownie te są stosunkowo lekkie i niedrogie, co pozwala instalować je na już użytkowanych obiektach, budynkach, wieżach itp. Rozwiązanie to znajduje najczęściej zastosowanie jako niezależne źródło energii elektrycznej dla zamkniętego systemu – np. zasilanie campingu, czy domku w górach.



Rys. 60. Zastosowania turbiny świdrowej.

Producentem takich nietypowych rozwiązań jest firma WINDSIDE. Produkuje ona mini elektrownie wiatrowe o świderkowym kształcie.

Parametry najmniejszej z nich (model WS-0,15C) są następujące: średnica 0,334 m, wysokość 0,850 m, moc 0,06 kW, powierzchnia 0,15 m² i masa 30 kg. Natomiast największej (model WS-4A/B): średnica 1 m, wysokość 4 m, moc 1,2 kW, powierzchnia 4 m² i masa 1000 kg). Na rysunku 60 przedstawione są zastosowania turbiny świdrowej. Na zdjęciu po lewej jest wykorzystana do zasilania boi morskiej, natomiast zdjęcie po prawej przedstawia instalacje na łodzi.

Turbina Darrieusa o osi poziomej

Turbina ta, produkcji firmy Wind Wandler, podobnie jak turbina Turby jest przeznaczona do pracy na dachu spadzistym o kącie wierzchołkowym 30-66° (rys. 2.61). Prototyp, uruchomiony w styczniu 2004 r., ma średnicę 1 m, długość 1,39 m, całkowitą wysokość 1,28 m i waży ok. 45 kg. Przy prędkości wiatru 24 m/s osiągnął moc 3,5 kW.



Rys. 61. Turbina Darrieusa o osi poziomej produkcji firmy Wind Wandler.



Rys. 62. Przykład zastosowania turbiny firmy Wind Wandler.

Turbina wiatrowa na kalenicy budynku mieszkalnego



Tabela produkcji energii elektrycznej przez turbinę RB 1 (kąt nachylenia dachu - 30°, wysokość montażu - 8m, wysokość dachu - 1m):

Turbina RB1	Długość turbiny	Moc kW	Produkcja KWh	Produkcja KWh Warszawa/Gdańsk	Produkcja KWh Łeba	Produkcja KWh Ustka 5.9 m/s
			3.5 m/s	4.4 m/s	5.3 m/s	
1 (5 wimików)	6.5m	2,7 kW	2,664 kWh	3,462 kWh	4,977 kWh	5,295 kWh
2 (10 wimików)	13m	5,4 kW	5,328 kWh	6,924 kWh	9,954 kWh	10,590 kWh

Wykres wykorzystania wiatru w turbinie Ridgeblade:

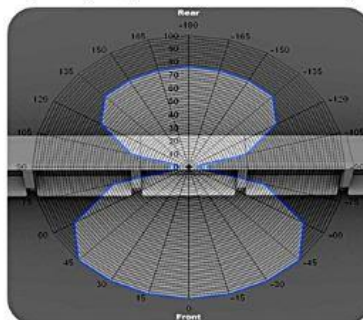


Tabela produkcji energii elektrycznej przez turbinę RB 2 (kąt nachylenia dachu - 15°, wysokość montażu - 8m, wysokość dachu - 1m):

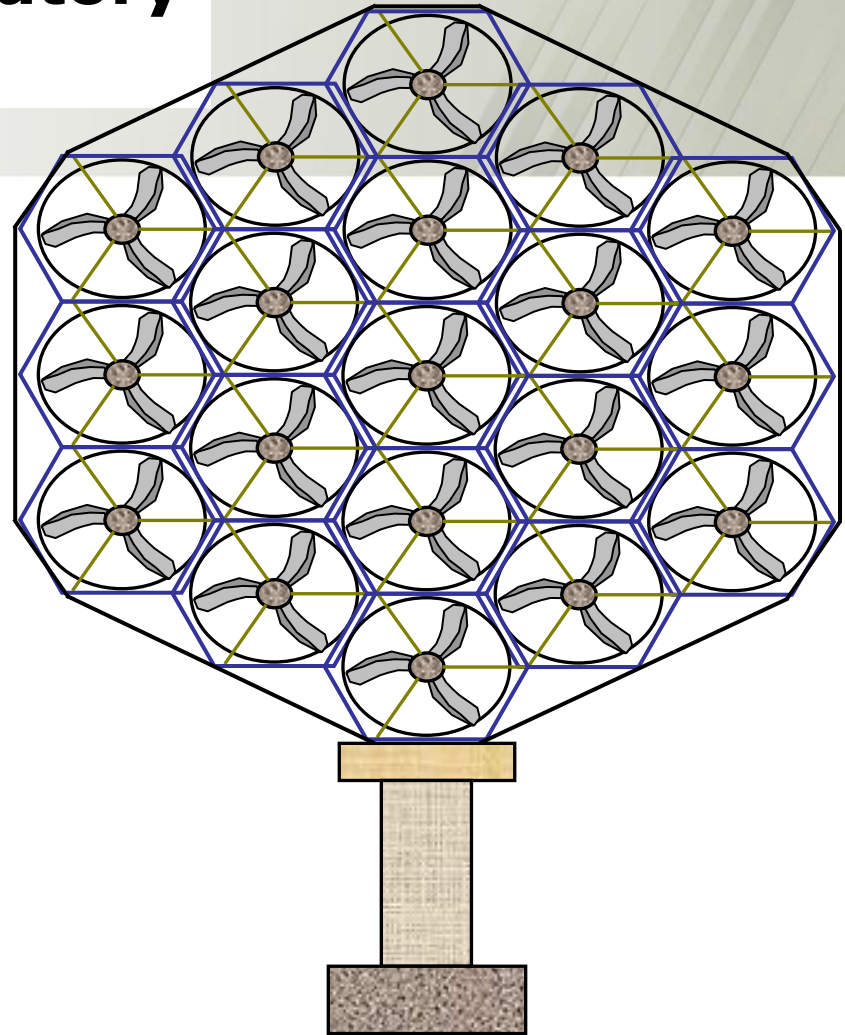
Turbina RB2	Długość turbiny	Moc kW	Produkcja KWh	Produkcja KWh Warszawa/Gdańsk	Produkcja KWh Łeba	Produkcja KWh Ustka 5.9 m/s
			3.5 m/s	4.4m/s	5.3m/s	5.9 m/s
1 (10 wimików)	13m	5,4 kW	6,258 kWh	7,248 kWh	11,608 kWh	12,440 kWh
2 (20 wimików)	26m	10.8 kW	12,516 kWh	14,496 kWh	23,216 kWh	24,880 kWh
5 (50 wimików)	65m	27 kW	31,290 kWh	32,240 kWh	58,040 kWh	62,200 kWh
10 (100 wimików)	130m	54 kW	62,580 kWh	72,480 kWh	116 08 MWh	124 4 MWh
13 (500 wimików)	169m	70.2 kW	81,354 kWh	94,224 kWh	150 904 MWh	161 72 MW



źródło: <http://www.wiatraki.murat.pl/>

Multiaerogeneratory

Konceptcja multiaerogeneratora polega na przytwierdzeniu 7, 19 lub 37 turbin wiatrowych do jednej, obrotowo zamocowanej konstrukcji nośnej (rys. 63). Rozwiązanie takie pozwala wyeliminować efekt odśrodkowych strug powietrza od śmigieł, za wyjątkiem skrajnych turbin, dla których odśrodkowe strugi powietrza występują na krawędziach zewnętrznych multiaerogeneratora. Powoduje to lepsze wykorzystanie energii kinetycznej wiatru przy mniejszej jego prędkości. Instalacja tego typu rozpoczyna pracę już przy wietrze 2,5 m/s.



Rys. 63. Eksperymentalna konstrukcja multiaerogeneratora.

Okazuje się, że koszt budowy, w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanej energii elektrycznej, jest niższy niż tradycyjnych jednoosiowych turbin wiatrowych.



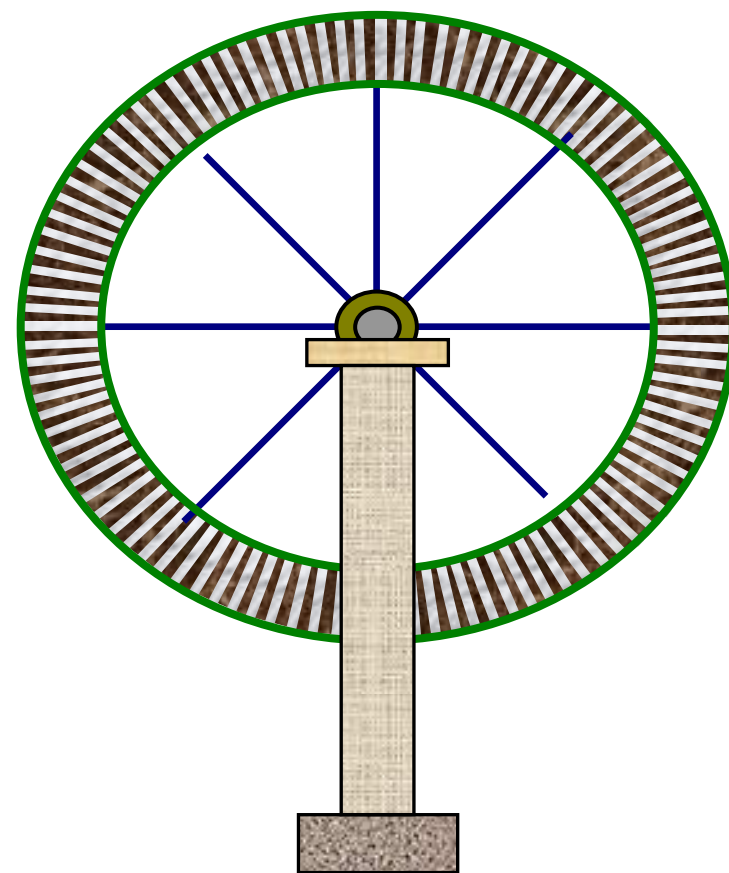
Turbina pierścieniowa

W turbinie pierścieniowej odsunięcie łopat od osi obrotu umożliwiło zwiększenie momentu obrotowego.

Turbina ta może pracować już od prędkości wiatru $1,5 \div 2,0$ m/s, nie wymaga silnika rozruchowego i w porównaniu z tradycyjnymi turbinami o osi poziomej może uzyskać zdecydowanie większe moce.

Polska konstrukcja turbiny pierścieniowej powstała w Rębielicach Królewskich k. Popowa. Jej dane techniczne są następujące:

- średnica zewnętrzna 32 m,
- średnica wewnętrzna 10,5 m, wysokość masztu 32,5 m,
- wysokość całkowita 53 m,
- szerokość dolnej podstawy i szerokość górnej podstawy 228 trapezowych łopatek wynoszą odpowiednio 10,5, 0,1 i 0,02 m,
- ciężar turbiny 36 Mg,
- ciężar całkowity 250 Mg,
- przekładnia pasowa 1:10,
- liczba obrotów na prądnicy 70 obr./min,
- poziom hałasu 15÷20 dB,
- moc nominalna 2,0 MW przy prędkości wiatru 10 m/s,
- dopuszczalna maksymalna prędkość wiatru wynosi 60 m/s.



Rys. 65. Eksperymentalna konstrukcja turbiny pierścieniowej.

Koszty budowy prototypu wyniosły ok. 2 mln PLN (rok 2003). Konstruktor zapewnia, że przy prędkości wiatru 2 m/s, gdy tradycyjne turbiny jeszcze nie pracują, turbina pierścieniowa osiąga już moc 35÷45 kW. Natomiast jej wydajność przy prędkości wiatru 4 m/s jest ok. 150 razy, a przy 10 m/s ok. 5 razy wyższa niż moce tradycyjnych turbin śmigłowych o osi poziomej.

Rys. 66. Turbina pierścieniowa w Rębelicach Królewskich.



Turbina pierścieniowa w Rębielicach Królewskich - dzisiaj



Źródło: mapakultury.pl

Turbina Piskorza

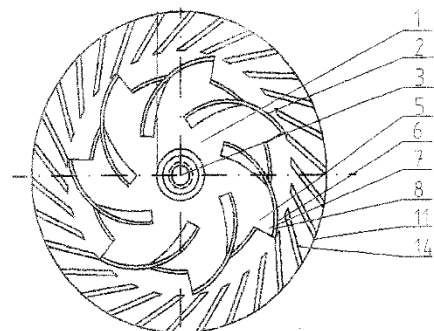


Fig. 1

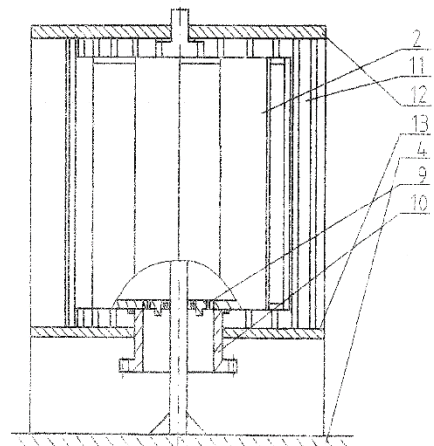


Fig. 2

Rzecznik patentowy
Anna Biel

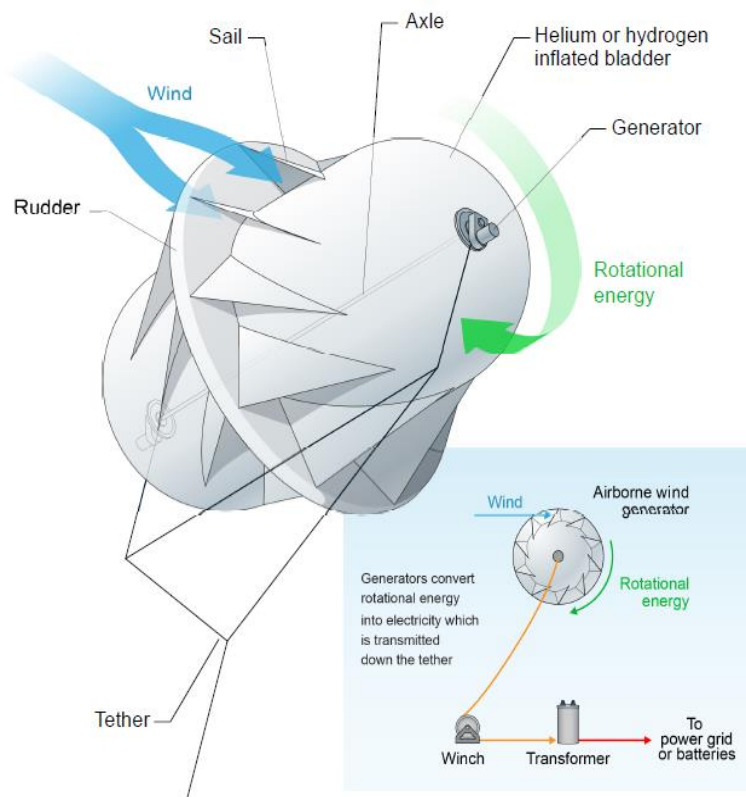


Kodeń

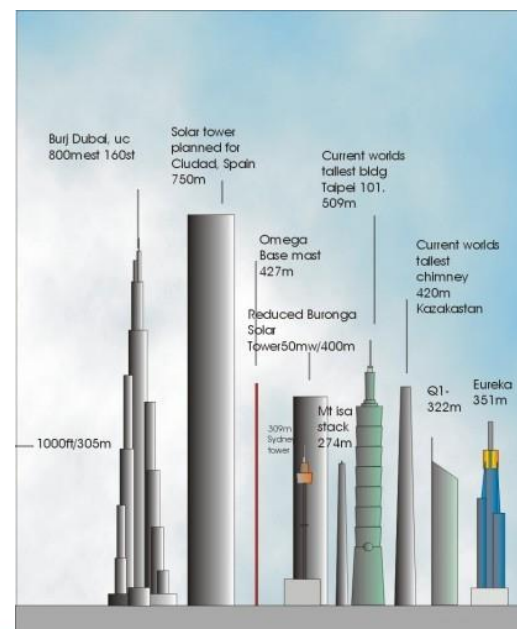
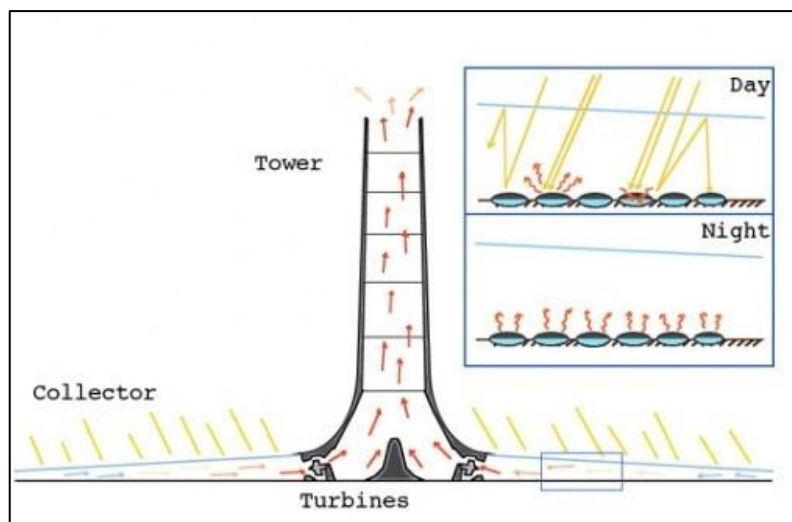
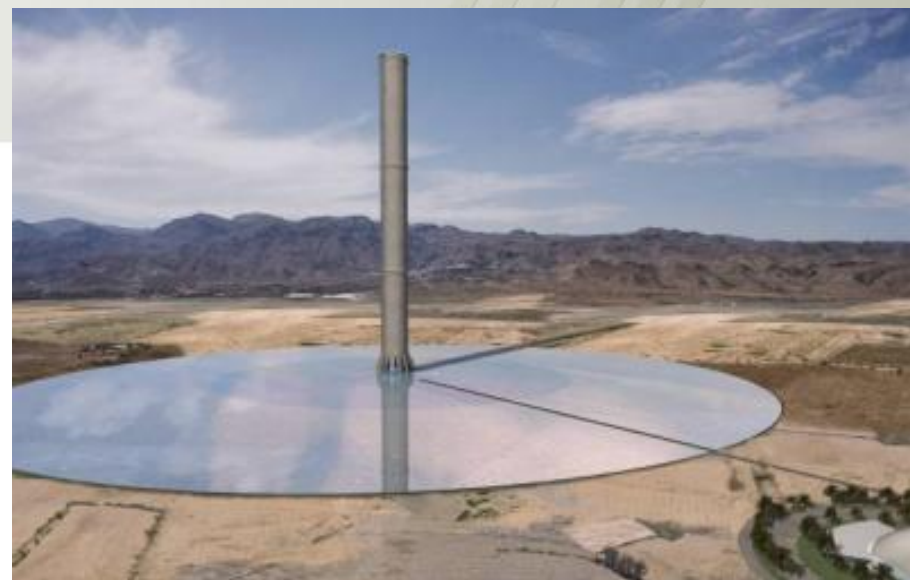
1 segment 15-20kW

Źródło: patent EP2508751A1, forsal.pl (PAP/EPA)

Turbiny balonowe



Słoneczne wieże wiatrowe



Źródło: http://www.climatetechwiki.org/technology/solar_towers



Dziękuję za uwagę !!!

