



Energia wiatrowa

Obliczenia (ok. 60 minut)

Przedmiot

Fizyka

Związek z podstawą programową

szkoła ponadpodstawowa: VII, XI

Opis zadania

Kiedy porównamy karty dotyczące samochodów na napęd elektryczny i diesla, wydaje się, że te elektryczne są bardziej przyjazne dla klimatu. Jednak w rzeczywistości zależy to od tego, z jakiego źródła pochodzi napędzająca je energia, co z kolei zależy od danego kraju. Energię elektryczną można generować na przykład z energii wodnej, jądrowej, wiatrowej lub ze spalania paliw kopalnych, takich jak węgiel lub gaz ziemny (kopalny).

Według organizacji [Wind Europe](#) energia wiatrowa pokrywa ok. 17% europejskiego zapotrzebowania na elektryczność, a w niektórych krajach nawet więcej. Technologia wiatrowa rozwija się coraz bardziej i prawdopodobnie będzie odgrywać coraz ważniejszą rolę w przyszłym koszyku energetycznym.

W tym zadaniu sprawdzimy, jak działa energia wiatrowa oraz krótko zastanowimy się nad korzyściami i wadami korzystania z tego typu energii.

Fundamentalną zasadą w technologii wiatrowej jest **prawo Betza**. Stwierdza ono, że maksymalna moc, jaką teoretycznie można uzyskać w turbinie wiatrowej, wynosi 16/27 (lub około 59%) energii powietrza przepływającego przez turbinę wiatrową:

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3}{2}$$

P to maksymalna moc [w W], jaką może uzyskać turbina wiatrowa, ρ [rho; kg/m³] to gęstość powietrza, r [m] to promień wirnika wiatrowego (czyli długość łopat wirnika), a v [m/s] to prędkość wiatru na wysokości wirnika.

Prędkość wiatru, v , zmienia się na różnych wysokościach nad ziemią. Wartości podawane w prognozach pogody często odnoszą się do prędkości wiatru na wysokości 10 metrów, jednak turbiny wiatrowe są znacznie wyższe. Przybliżona wartość wiatru na wysokości h metrów nad ziemią wynika z zależności:

$$v = v(h) = v(10) \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0,16}$$

gdzie $v(10)$ to prędkość wiatru na wysokości 10 metrów nad poziomem gruntu.

- a) Za pomocą analizy jednostek sprawdź, czy lewa i prawa strona prawa Betza mają te same jednostki.
- b) Korzystając z powyższego wzoru, oblicz prędkość wiatru na wysokości 50 metrów. Przyjmij, że $v(10) = 15$, czyli prędkość wiatru na wysokości 10 metrów wynosi 15 m/s.
- c) Oblicz maksymalną teoretyczną moc wyjściową turbiny wiatrowej. Znajdź niezbędne do obliczeń wartości lub przyjmij rozsądne założenia. Możesz zdecydować, czy obliczasz moc dla małej, średniej czy dużej turbiny. Upewnij się, że wynik został wyrażony we właściwej jednostce!
- d) Oszacuj liczbę turbin wiatrowych potrzebnych do uzyskania mocy wytwarzanej przez elektrownię jądrową. Znajdź potrzebne do obliczeń wartości lub przyjmij rozsądne założenia.
- e) Typowa średniej wielkości turbina wiatrowa generuje około 5,1 GWh rocznie. Jak to się ma do wartości obliczonej przez ciebie w punkcie c)? W przypadku różnic zastanów się nad możliwymi przyczynami i oblicz, ile turbin wiatrowych byłoby potrzebnych do uzyskania mocy wytwarzanej przez elektrownię jądrową, gdyby każda turbina wytwarzała rocznie 5,1 GWh.
- f) W Polsce trwa dyskusja nad potrzebą odejścia od spalania węgla i inwestowania w inne sposoby wytwarzania energii. Zastanów się nad poniższymi pytaniami i spróbuj na nie odpowiedzieć w jak największych szczegółach. Jakie są zalety i wady energii jądrowej i wiatrowej? Dlaczego całkowite zastąpienie energii z paliw kopalnych energią wiatrową jest wyzwaniem?

Propozycja odpowiedzi

a) Analiza jednostkowa zmiennych w prawie Betza:

- P oznacza moc, która jest mierzona w watach (W).
- ρ oznacza gęstość powietrza mierzoną w kilogramach na metr sześcienny (kg/m^3).
- r oznacza promień mierzony w metrach (m). Promień to odległość od środka wirnika turbiny wiatrowej do krawędzi łopaty wirnika.
- v oznacza prędkość wiatru mierzoną w metrach na sekundę (m/s).

Lewa strona prawa Betza wyrażona jest w jednostkach W (wat). Z obliczeń wynika, że gdy na wysokości 10 metrów wiatr wieje z prędkością 15 m/s, prędkość wiatru na wysokości 50 metrów wynosi nieco ponad 19 m/s.

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^3} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Wynika to z faktu, że dżul jest *jednostką pochodną układu SI*, którą można również wyrazić jako: $\text{J} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$. Zatem lewa i prawa strona mają te same jednostki, ponieważ $\text{W} = \text{J}/\text{s}$.

b)
$$v(50) = 15 \cdot \left(\frac{50}{10}\right)^{0,16} \approx 19,4 \text{ m/s}$$

Z obliczeń wynika, że prędkość wiatru na wysokości 50 metrów wynosi nieco ponad 19 m/s, podczas gdy na wysokości 10 metrów wiatr wieje z prędkością 15 m/s.

c) Zazwyczaj średniej wielkości turbiny wiatrowe przeznaczone do użytku komercyjnego mają łopaty wirnika o promieniu od 20 do 60 metrów. Najpotężniejsze turbiny wiatrowe używane na większych farmach wiatrowych mogą mieć łopaty wirnika o promieniu ponad 100 metrów. Załóżmy, że nasza turbina ma wysokość (h) 150 metrów, promień (r) 50 metrów, a $v(10)=15$ m/s.

Najpierw obliczamy prędkość wiatru na wysokości 150 metrów:

$$v(150) = 15 \cdot \left(\frac{150}{10}\right)^{0,16} \approx 23,1 \text{ m/s}$$

Następnie liczymy teoretyczną maksymalną moc przy użyciu prawa Betza. Gęstość powietrza wynosi około $1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{1,2 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 23,1^3}{2} \approx 34,4 \text{ MW}$$

d) Produkcja energii z elektrowni jądrowej zależy od kilku czynników, m.in. od typu reaktora, jego mocy, czasu pracy i wydajności. Na potrzeby tego zadania zakładamy, że elektrownia jądrowa produkuje 7 TWh rocznie (co odpowiada 7000 GWh rocznie) - jest to typowa wartość dla większej elektrowni jądrowej.

Teoretyczna maksymalna produkcja energii elektrycznej (E) turbiny wiatrowej w ciągu jednego roku jest obliczana poprzez pomnożenie teoretycznej maksymalnej mocy (P) przez czas (t) w godzinach rocznie:

$$E = P \cdot t = 34,4 \text{ MW} \cdot 24 \text{ godzin/dzień} \cdot 365 \text{ dni /rok} \approx 301 \text{ GWh/rok}$$

Następnie należy obliczyć liczbę turbin potrzebnych do uzyskania mocy wytwarzanej przez elektrownię jądrową:

$$\text{Liczba turbin wiatrowych} = \frac{7000 \text{ GWh/rok}}{301 \text{ GWh/rok}} \approx 23$$

Z obliczeń wynika, że do uzyskania mocy wytwarzanej przez elektrownię jądrową generującą 7 TWh rocznie potrzebne są 23 turbiny wiatrowe.

e) Obliczona wartość (301 GWh/rok) jest znacznie większa niż średnia wartość dla prawdziwej turbiny wiatrowej (5,1 GWh/rok). Po części wynika to z faktu, że wiatr nie zawsze wieje z prędkością niezbędną do osiągnięcia szczytowej wydajności, a po części z tego, że pominęliśmy wszystkie straty wynikające z tarcia.

Przy założeniu, że każda turbina wiatrowa produkuje rocznie 5,1 GWh, liczbę turbin potrzebnych do uzyskania mocy wytwarzanej przez elektrownię jądrową oblicza się w następujący sposób:

$$\text{Liczba turbin wiatrowych} = \frac{7\,000 \text{ GWh/rok}}{5,1 \text{ GWh/rok}} \approx 1372$$

f) Zarówno energia jądrowa, jak i wiatrowa mają swoje wady i zalety. Energia pochodząca z wiatru jest czysta, ale jej wydajność zmienia się w zależności od warunków wiatrowych, więc zapewnienie jej stałej dostawy jest wyzwaniem. Aby uniknąć strat wynikających z konwersji, niezbędne jest jej magazynowanie lub natychmiastowe wykorzystanie w oparciu o precyzyjnie określone zapotrzebowanie. Z kolei energia jądrowa jest przyjazna dla środowiska, ale budowa elektrowni jest kosztowna i wywołuje obawy w zakresie bezpieczeństwa i utylizacji odpadów.

Całkowite zastąpienie energii ze spalania paliw kopalnych energią wiatrową jest wyzwaniem. Ze względu na zmienność wiatru, aby zapewnić stabilność energetyczną, konieczne jest uzupełnianie energii wiatrowej z innych źródeł. Wrodzona nieprzewidywalność wiatru komplikuje także zarządzanie siecią. Energia jądrowa zapewnia stabilne, nieprzerwane dostawy energii. Przejście na energię wiatrową wymaga modernizacji infrastruktury i inwestycji w technologię magazynowania energii.

Oczekiwany efekt edukacyjny

Pogłębienie wiedzy na temat technologii energii wiatrowej, zastosowanie analizy jednostek do analizy zależności fizycznych, takich jak prawo Betza, przeliczanie jednostek i obliczanie prędkości wiatru w zależności od wysokości. Powyższe ma na celu pogłębienie rozumienia, jak działa energia wiatrowa, oraz jej praktycznych zastosowań fizycznych. Pytanie końcowe jest zadaniem otwartym, które ma dać uczniom i uczennicom okazję do dyskusji w oparciu o wykonane samodzielnie obliczenia oraz inne istotne fakty.

Zadanie można ułatwić poprzez podanie klasie wszystkich potrzebnych do obliczeń wartości.