

6 Energia słoneczna i biopaliwa

Szacujemy, jak nasze zużycie energii ma się do realnej wielkości zrównoważonej produkcji. W tym celu porównujemy obydwie wielkości przedstawione za pomocą słupków. W ostatnich trzech rozdziałach okazało się, że jeżdżenie samochodem oraz podróżowanie samolotami zużywa więcej energii niż, realnie rzecz biorąc, może jej dostarczyć energetyka wiatrowa na lądzie w Wielkiej Brytanii. Czy energia słoneczna jest w stanie tak wpłynąć na wysokość słupka produkcji, by stał się on większy od słupka zużycia?

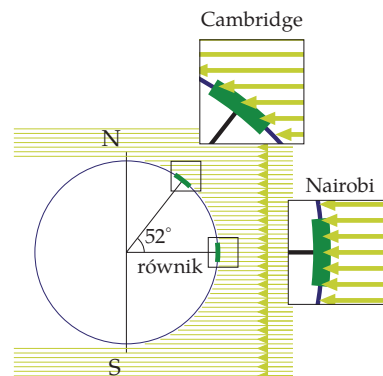
Moc promieniowania słonecznego w południe bezchmurnego dnia wynosi 1000 W/m^2 . Oznacza to 1000 W/m^2 powierzchni skierowanej w stronę słońca, nie zaś m^2 powierzchni ziemi. By otrzymać moc na jeden m^2 powierzchni ziemi w Wielkiej Brytanii, musimy wprowadzić kilka poprawek. Musimy bowiem uwzględnić kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię ziemi, który to kąt wpływa na zmniejszenie intensywności promieniowania słońca w południe do około 60% jego wartości na równiku (rys. 6.1). Tracimy również dlatego, że południe nie trwa wiecznie. W czasie bezchmurnego dnia w marcu lub wrześniu stosunek *średniej* intensywności promieniowania w porównaniu do intensywności w południe wynosi około 32%. Na koniec zaś dodajmy zachmurzenie – przez nie również tracimy moc; w typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 34% czasu słońce nie jest przesłonięte chmurami.

Całkowity efekt działania tych trzech czynników oraz dodatkowe komplikacje związane ze zmianami pór roku powodują, że średnia moc promieniowania słonecznego na metr kwadratowy skierowanego na południe dachu w Wielkiej Brytanii wynosi zaledwie 110 W/m^2 , zaś średnia moc promieniowania słonecznego na płaskiej powierzchni ziemi to 100 W/m^2 .

Możemy przekształcić tę moc promieniowania słonecznego w moc użytkową na cztery sposoby:

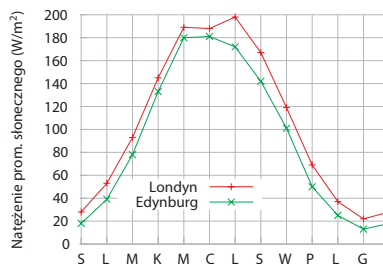
1. Panele fototermiczne (tzw. solary): używając promieni słonecznych do bezpośredniego ogrzewania budynków lub wody.
2. Panele fotowoltaiczne: wytwarzając prąd elektryczny.
3. Biomasa: wykorzystując drzewa, bakterie, algi, kukurydzę, soję lub oleje roślinne do wytwarzania paliw, związków chemicznych lub jako materiałów budowlanych.
4. Pożywienie: to samo co w przypadku biomasy, za wyjątkiem tego, że rośliny są wykorzystywane jako jedzenie dla ludzi i zwierząt.

(W jednym z następnych rozdziałów przyjrzymy się bliżej kilku innym technologiom wykorzystującym energię słoneczną i nadającym się do użycia w warunkach pustynnych). Wykonajmy na wstępie kilka szybkich oszacowań maksymalnych rzeczywistych mocy, których każde z tych rozwiązań mogłoby dostarczyć. Pominiemy ich koszty finansowe oraz wydatek energetyczny związany z ich wytwarzaniem oraz utrzymaniem instalacji energetycznych.

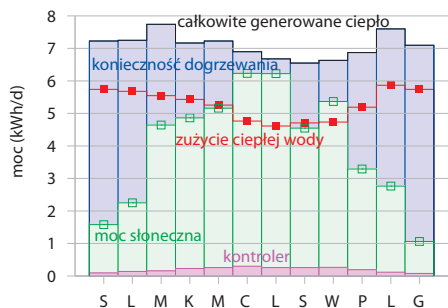


Rys. 6.1. Promieniowanie słoneczne ogrzewające ziemię w południe wiosennego lub jesiennego dnia.

Natężenie promieniowania na jednostkę powierzchni w Cambridge (52°N) wynosi 60% natężenia promieniowania na równiku.



Rys. 6.2. Średnie natężenie promieniowania słonecznego w Londynie i Edynburgu jako funkcja czasu w kolejnych miesiącach roku. Średnie natężenie na jednostkę powierzchni ziemi wynosi 100 W/m^2 .



Panele fototermiczne

Najprostszą technologią wykorzystującą energię słoneczną jest panel ogrzewający wodę. Wyobraźmy sobie, że pokrywamy wszystkie powierzchnie dachów, skierowane na południe, takimi panelami fototermicznymi. Oznaczałoby to około 10 m² paneli na osobę przy założeniu, że panele te zamieniają moc promieniowania słonecznego (110 W/m²) w gorącą wodę z efektywnością 50% (rys. 6.3).

Jeśli zatem pomnożymy

$$50\% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

to okaże się, że ogrzewanie za pomocą słońca może dostarczyć **13 kWh dziennie na osobę**.

Polska leży na tej samej szerokości geograficznej co Wielka Brytania, więc pod tym względem intensywność promieniowania słonecznego jest identyczna. Jednak warunki pogodowe są u nas lepsze – o ile w typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 34% czasu słońce nie jest przesłonięte przez chmury, to dla Polski jest to 41%, co daje o 20% większe nasłonecznienie.

Obliczona wartość mocy możliwej do pozyskania za pomocą umieszczonych na dachach paneli fototermicznych wyniesie dla Polski 16 kWh dziennie na osobę.

Na rysunku 6.4 zakolorowałem obszar produkcji energii przez panele fototermiczne na biało, by zaznaczyć, że dotyczy on produkcji energii o niskiej jakości – gorąca woda nie jest tak cenna, jak wysokiej jakości energia elektryczna, którą mogą produkować turbiny wiatrowe. Ciepła nie można oddać do sieci energetycznej – jeśli go nie wykorzystasz, po prostu zmarnuje się. Powinniśmy mieć na uwadze, że duża część tego zaabsorbowanego ciepła będzie się znajdowała w nieodpowiednim miejscu. W miastach, gdzie żyje wiele ludzi, na jedną osobę przypada znacznie mniejsza powierzchnia dachu niż wynikałoby to ze średniej krajowej. Co więcej, energia ta byłaby dostarczana nierównomiernie w ciągu roku.

Panele fotowoltaiczne

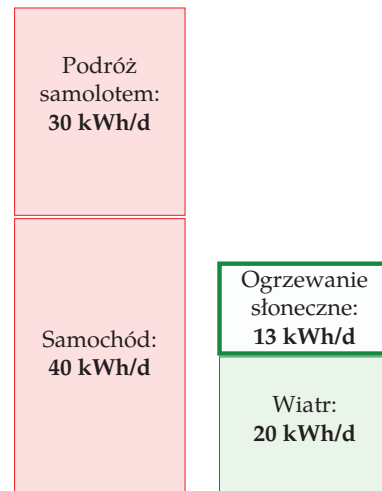
Panele fotowoltaiczne (PV) zamieniają światło słoneczne w energię elektryczną. Wydajność przeciętnego panelu wynosi około 10%, zaś bardziej kosztownego – 20%. (Podstawowe prawa fizyki ograniczają wydajność systemów fotowoltaicznych, w najlepszym wypadku do 60%, przy idealnie koncentru-

Rys. 6.3. Moc generowana przez 3 m² panelu ogrzewającego wodę (kolor zielony) oraz dodatkowe ciepło (kolor niebieski) potrzebne do ogrzania wody w eksperymentalnym domu należącym do Viridian Solar (na zdjęciu widać dom z tym samym modelem paneli na dachu). Średnia moc dostarczana przez 3 m² panelu wynosiła 3,8 kWh/dobę.

W eksperymencie prowadzono przeciętne zużycie gorącej wody przez europejskie gospodarstwo domowe – 100 litrów gorącej (60 °C) wody dziennie.

Sięgająca 1,5–2 kWh/dobę luka pomiędzy całkowitym wygenerowanym ciepłem (czarna linia na górze) oraz użytą gorącą wodą (czerwona linia), jest spowodowana stratami ciepła. Linia fioletowa pokazuje moc elektryczną niezbędną do zasilania systemu paneli.

Średnia moc na jednostkę powierzchni wynosi dla tych paneli słonecznych 52 W/m².



Rys. 6.4. Panele słoneczne: rząd paneli grzewczych o powierzchni 10 m² może dostarczyć (średnio) około 13 kWh energii cieplnej dziennie.

jących energię lustrach i soczewkach oraz do 45% bez koncentracji. Masowa produkcja paneli o efektywności większej niż 30% byłaby wybitnym osiągnięciem). Średnia moc dostarczana przez skierowane na południe panele fotowoltaiczne o 20-procentowej efektywności w Wielkiej Brytanii wynosiłaby:

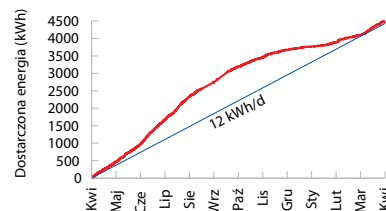
$$20\% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2$$

Rys. 6.5. przedstawia dane uzupełniające otrzymany przez nas wynik. Dajmy każdej osobie po 10 m² drogich paneli fotowoltaicznych (o 20-procentowej efektywności) i pokryjmy całą dostępną powierzchnię dachów skierowanych na południe. To dostarczyłoby

5 kWh dziennie na osobę

Ponieważ nasłonecznienie w Polsce jest o 20% większe, więc u nas możliwa do pozyskania z ogniw słonecznych moc wyniesie **6 kWh dziennie na osobę**.

Ponieważ powierzchnia wszystkich skierowanych na południe dachów wynosi 10 m² na osobę, jasne jest, że nie mamy wystarczająco dużo powierzchni na zainstalowanie zarówno paneli fotowoltaicznych, jak i paneli fototermicznych. Musimy więc wybrać, co wolimy – prąd z paneli fotowoltaicznych czy gorącą wodę z paneli fototermicznych? Tak czy inaczej, dorzucę obydwu do słupka produkcji. Co więcej, obecny koszt zainstalowania paneli fotowoltaicznych wynosi cztery razy tyle, ile zainstalowanie paneli fototermicznych, chociaż dostarczają one zaledwie połowę energii, aczkolwiek o wysokiej jakości (energia elektryczna). Doradzam więc rodzinom myślącym o korzystaniu z energii słonecznej zainwestowanie najpierw w panele fototermiczne. Najmądrzejszym rozwiązaniem, przynajmniej w słonecznych krajach, jest stworzenie powiązanych ze sobą obydwu systemów, które z jednej instalacji dostarczają zarówno elektryczność, jak i gorącą wodę. Pionierem takiego podejścia jest firma Heliodynamics, która zredukowała całkowity koszt produkowanych przez siebie



Fot. 6.5. Panele fotowoltaiczne. Dane pochodzą z roku 2006 dla systemu o powierzchni 25 m², znajdującego się w Cambridgeshire. Moc szczytowa dostarczana przez system wynosi około 4 kW. Średnia roczna moc wynosi 12 kWh dziennie, czyli **20 W na metr kwadratowy panelu**.



Fot. 6.6. Dwóch słonecznych wojowników cieszących się swoim systemem fotowoltaicznym, który zasila ich samochody elektryczne oraz dom. Układ 120 paneli (moc 300 W, każdy o rozmiarze, 2,2 m²) ma powierzchnię 268 m²; moc szczytowa (pokrywająca straty przy konwersji prądu stałego na zmienny) wynosi 30,5 kW, zaś średnia moc – w Kalifornii, niedaleko Santa Cruz – wynosi 5 kW (**19 W/m²**).

Zdjęcie udostępnione dzięki uprzejmości Kennetha Adelmanna
www.solarwarrior.com

systemów poprzez otoczenie wysokiej jakości małych elementów fotowoltaicznych, złożonych z arsenku galu, rzędami wolno poruszających się płaskich luster. Lustra te skupiają światło słoneczne na elementach fotowoltaicznych, które dostarczają zarówno gorącą wodę, jak i elektryczność. Ciepła woda jest wytwarzana przez pompowanie wody pod spodem elementów fotowoltaicznych.

Dotychczasowe wnioski: pokrycie skierowanej na południe części dachu panelami fotowoltaicznymi może dostarczyć Ci sporej części zużywanej przez Ciebie elektryczności. Jednakże dachy nie są na tyle duże, by zaspokoić nasze całkowite zużycie energii. By wyciągnąć więcej z fotowoltaiki, musimy zejść na ziemię. Słoneczni wojownicy z rysunku 6.6 wskazują nam drogę.

Fantastyka: farmy słoneczne

Jeśli nastąpi przełom w technologii słonecznej i koszty paneli fotowoltaicznych zmniejszą się do wystarczającego, byśmy mogli umieścić je we wszystkich wsiach, to jaka mogłaby być ich maksymalna rzeczywista produkcja energii? Cóż, gdybyśmy pokryli 5% Wielkiej Brytanii panelami o 10-procentowej wydajności, otrzymalibyśmy:

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ na osobę} \approx 50 \text{ kWh/dzień/osobę.}$$

Na każdego Polaka przypada, co prawda, dwa razy więcej powierzchni niż na Brytyjczyka, jednak ponieważ głównym czynnikiem ograniczającym jest tu koszt, przyjmijmy, że również wyłożymy panelami słonecznymi 200 m² na osobę. Pamiętając, że nasłonecznienie w Polsce jest o 20% większe niż w Wielkiej Brytanii, uzyskamy w ten sposób:

$$10\% \times 120 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ na osobę} \approx 60 \text{ kWh/dzień/osobę.}$$

Przy okazji założyłem, że panele słoneczne będą miały zaledwie 10-procentową wydajność. Wydaje mi się bowiem, że będą one mogły być produkowane na masową skalę jedynie wtedy, gdy staną się bardzo tanie. I to właśnie panele o niskiej wydajności stanowią pierwsze. Gęstość mocy (moc na jednostkę powierzchni) takiej farmy słonecznej wynosiłaby:

$$10\% \times 120 \text{ W/m}^2 = 12 \text{ W/m}^2$$

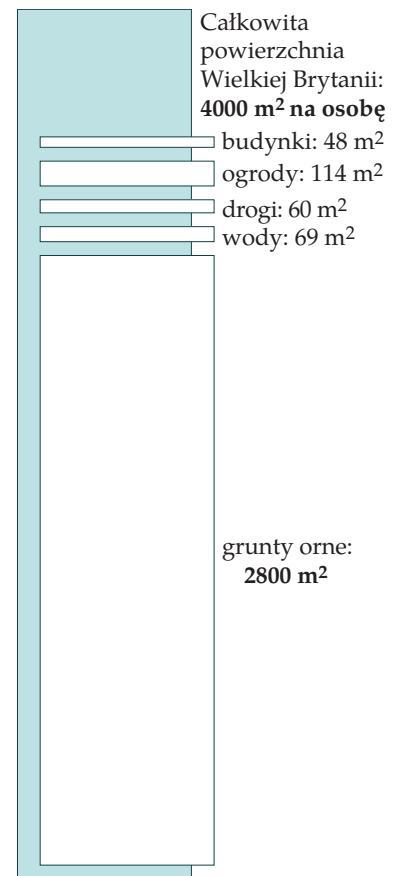
Otrzymana gęstość mocy jest dwa razy większa od otrzymywanej w Parku Słonecznym w Bawarii (rys. 6.7).

Czy taki zalew paneli słonecznych mógłby współistnieć z armią wiatraków, które wyobraziliśmy sobie w rozdziale 4? Tak, bez problemu. Wiatraki rzucają niewiele cienia, zaś panele słoneczne, zainstalowane na poziomie gruntu, nie wywierają większego wpływu na wiatr. Na ile zuchwały jest ten plan? Moc z elektrowni słonecznych potrzebna do dostarczenia tych 50 kWh dziennie na osobę w Wielkiej Brytanii to więcej niż 100-krotna moc dostarczana przez wszystkie panele słoneczne zainstalowane obecnie na świecie. Czy powinienem więc umieścić farmę PV w moim słupku zrównoważonej produkcji? Wciąż się waham. Na początku tej książki wspominałem, że chcę zbadać, co prawa fizyki mówią o granicach dotyczących zrównoważonej energii, zakładając, że pieniądze nie mają znaczenia. Na tej podstawie powinienem przeć naprzód, industrializując wieś i wrzucając farmy PV na słupek. Z drugiej strony, chciałbym



Fot. 6.7. Farma słoneczna z ogniwami fotowoltaicznymi: Park Słoneczny w Mühlhausen w Bawarii o mocy szczytowej wynoszącej 6,3 MW. Średnia moc na jednostkę powierzchni jest szacowana na około 5W/m².

Fot. SunPower



Rys. 6.8. Powierzchnie różnych rodzajów terenu na osobę w Wielkiej Brytanii

pomóc ludziom zrozumieć, co powinniśmy robić pomiędzy dniem dzisiejszym a rokiem 2050. A dzisiaj cena elektryczności z farm słonecznych byłaby cztery razy wyższa od rynkowej. Z tego powodu czuję się trochę nieodpowiedzialnie, umieszczając to oszacowanie w słupku zrównoważonej produkcji na rysunku 6.9. Wyłożenie 5% powierzchni Wielkiej Brytanii panelami słonecznymi wydaje się z wielu względów nierealne. Jeżeli na poważnie przyjrzymy się realizacji takiego celu, to znacznie lepiej byłoby zainwestować w panele w dwa razy bardziej słonecznym kraju i przesłać część energii z powrotem za pomocą linii energetycznych. Powróćmy do tego pomysłu w rozdziale 25.

Mity

Wyprodukowanie panelu słonecznego wymaga zużycia większej ilości energii niż jest on w stanie dostarczyć w trakcie swojego późniejszego działania.

Falsz. Współczynnik zwrotu energii określa stosunek energii dostarczonej przez system w ciągu cyklu jego życia do energii zużytej na wytworzenie systemu. W naszym przypadku stosunek energii pozyskanej do energii zainwestowanej – (ang. *Energy Returned On Energy Invested*, skrótowo EROEI) – dotyczący montowanego na dachu i podłączonego do sieci systemu słonecznego w Europie Północnej, dla systemu o długości życia 20 lat, wynosi 4 (Richards i Watt, 2007), zaś dla miejsc bardziej słonecznych (takich jak na przykład Australia) – nawet ponad 7. Współczynnik zwrotu energii większy niż jeden oznacza, że taki system to Dobra Rzecz, korzystna energetycznie. Turbiny wiatrowe o długości życia równej 20 lat posiadają współczynnik zwrotu energii równy nawet 80.

Czy panele fotowoltaiczne nie powinny stawać się coraz bardziej wydajne wraz z rozwojem technologii?

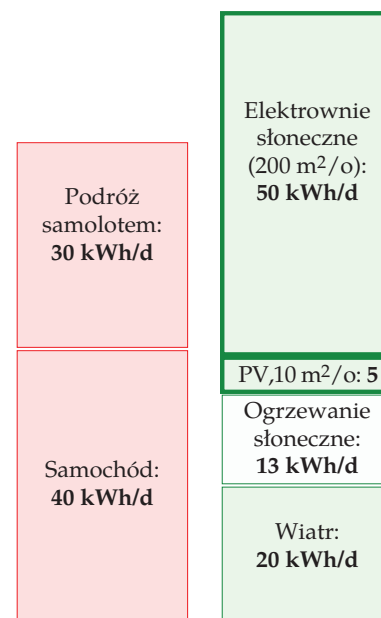
Jestem pewien, że panele fotowoltaiczne będą stawały się *coraz tańsze*. Jestem także pewien, że ich *wytwarzanie* będzie wymagało zużycia coraz mniejszej ilości energii, tak więc ich współczynnik zwrotu energii również się zwiększy. Jednakże oszacowania zawarte w tym rozdziale nie biorą pod uwagę kosztu paneli ani wydatku energetycznego związanego z ich wytworzeniem. Rozdział ten dotyczy przede wszystkim maksymalnej możliwej do dostarczenia mocy. Już teraz panele fotowoltaiczne, ze swoją 20-procentową wydajnością, są bliskie limitu teoretycznego ich wydajności (patrz: przypisy na końcu rozdziału). Byłbym zaskoczony, gdyby konieczna stała się znacząca aktualizacja w górę zawartych w tym rozdziale oszacowań efektywności montowanych na dachach paneli fotowoltaicznych.

Biomasa z energii słonecznej

I nagle, no wiesz, możesz znaleźć się w biznesie energetycznym tylko dlatego, że jesteś w stanie uprawiać trawę na ranczu! A potem zbierać ją i zamieniać w energię. Oto, co może niedługo nastąpić.

George W. Bush, luty 2006

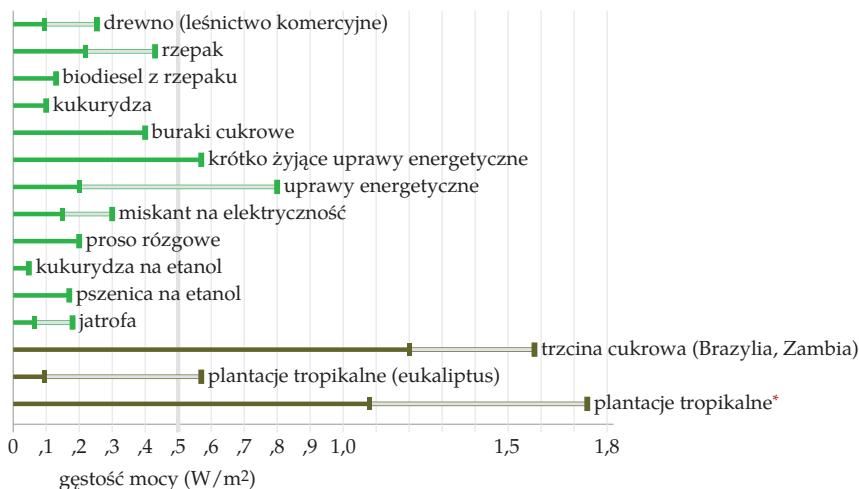
Wszystkie dostępne rozwiązania bioenergetyczne opierają się na koncepcji uprawiania roślin, a następnie robienia z nimi czegoś. Jak wiele energii można w ten sposób potencjalnie uzyskać? Istnieją cztery główne sposoby pozyskiwania energii z zasilanych słońcem systemów biologicznych:



Rys. 6.9. Panele fotowoltaiczne: układ paneli słonecznych o powierzchni 10 m², zamontowany na południowej stronie dachu, którego efektywność wynosi 20%, może dostarczyć około 5 kWh energii elektrycznej dziennie. Gdyby 5% kraju było pokryte panelami słonecznymi o 10-procentowej efektywności (200 m² paneli na osobę), to dostarczałyby one 50 kWh/dziennie na osobę.

1. Możemy uprawiać wyselekcjonowane rośliny i spalać je w elektrowni, która produkuje prąd elektryczny lub ciepło, lub jedno i drugie. Można to określić jako *substytucję węgla*.
2. Możemy uprawiać specjalnie dobrane rośliny (na przykład rzepak, trzcinę cukrową lub kukurydzę), zamienić je w etanol lub biodiesel i pompować do samochodów, pociągów, samolotów lub wszędzie tam, gdzie okażą się przydatne. Możemy również hodować genetycznie modyfikowane bakterie, cyanobakterie lub algi, które w sposób bezpośredni produkują wodór, etanol, butanol czy nawet prąd elektryczny. Takie rozwiązania nazwalibyśmy *substytucją ropy*.
3. Możemy wykorzystać produkty uboczne pochodzące z innych rodzajów działalności rolnej i spalać je w elektrowni. Produktami ubocznymi mogą być zarówno słoma (odpad z produkcji chrupek kukurydzianych), jak i kurze odchody (odpad z produkcji McNuggets). Spalanie produktów ubocznych jest również *substytucją węgla*, jednak przy użyciu zwykłych roślin, a nie roślin wysokoenergetycznych. Elektrownia spalająca odpady z produkcji rolnej nie dostarczy tak dużej mocy na jednostkę powierzchni uprawnej, jak zoptymalizowana uprawa biomasy, ale jej zaletą będzie to, że nie wymusi przejmowania terenów uprawnych przez uprawy energetyczne. Spalanie metanu z wysypiska śmieci to podobny sposób pozyskiwania energii, jednak jest on zrównoważony jedynie wtedy, gdy mamy zrównoważone źródło odpadów dla wysypiska (większość metanu z tego źródła pochodzi z odpadów spożywczych; przeciętny Brytyjczyk wyrzuca ok. 300 g jedzenia dziennie). Spalanie odpadów z gospodarstw domowych jest kolejną, odrobinę mniej okrężną, drogą pozyskiwania energii z biomasy.
4. Możemy uprawiać rośliny i karmić nimi bezpośrednio ludzi i zwierzęta, także potrzebujących energii.

We wszystkich tych procesach pierwszym „krokiem energetycznym” jest cząsteczka chemiczna, czyli węglowodan w roślinie zielonej. Możemy więc



Fot. 6.10. Trawa z rodzaju *Miscanthus* zaszczycona towarzystwem dr Emily Heaton, która ma 163 cm wzrostu. W Wielkiej Brytanii *Miscanthus* osiąga moc na jednostkę powierzchni 0,75 W/m². Zdjęcie dostarczone przez Uniwersytet w Illinois.

Rys. 6.11. Produkcja mocy na jednostkę powierzchni osiągnięta przy użyciu różnych roślin. Aby poznać źródła danych, zwróć uwagę na końcu rozdziału. Przedstawione gęstości mocy różnią się od siebie w zależności od stopnia nawadniania oraz nawożenia. Przedziały są zaznaczone dla niektórych upraw – na przykład drewno ma przedział 0,095–0,254 W/m². Trzy ostatnie gęstości mocy dotyczą upraw w warunkach tropikalnych. Ostatnia gęstość mocy (uprawy tropikalne*) zakłada modyfikacje genetyczne, nawożenie oraz nawadnianie. W tekście użyłem 0,5 W/m² jako wartości podsumowującej najbardziej wydajne energetycznie uprawy w północno-zachodniej Europie.

oszacować moc możliwą do uzyskania w każdym z procesów lub we wszystkich razem poprzez oszacowanie, jak wiele mocy można pozyskać na tym etapie. Wszystkie następne kroki, obejmujące traktory, zwierzęta, środki chemiczne, składowiska odpadów czy też elektrownie, mogą powodować jedynie utratę energii. A zatem na pierwszym etapie moc jest większa od mocy pochodzącej ze wszystkich opartych na roślinach rozwiązań energetycznych.

Oszacujmy zatem wielkość mocy na tym pierwszym etapie (w rozdziale D zagłębimy się w szczegóły, szacując maksymalny wynik każdego procesu). Średnia moc słońca dostępna w Wielkiej Brytanii wynosi 100 W/m^2 . Najbardziej wydajne rośliny w Europie mają zaledwie 2-procentową efektywność w procesie zamiany energii słonecznej w węglowodany, co wskazuje, że uprawy roślin mogą dostarczyć 2 W/m^2 . Jednak ich efektywność spada przy większym natężeniu światła i najlepsze rzeczywiste rezultaty z upraw energetycznych w Europie są raczej bliższe $0,5 \text{ W/m}^2$. Pokryjmy teraz 75% kraju roślinami wysokiej jakości energetycznej. Oznacza to 3000 m^2 na osobę przeznaczone na bioenergię. Tyle zajmują dzisiaj tereny rolnicze w Wielkiej Brytanii.

Uzup. red.: W przypadku etanolu uzyskiwanego z kukurydzy (będącego np. głównym biopaliwem w USA) zysk energetyczny wynosi $0,2 \text{ W/m}^2$. Niestety produkcja etanolu wymaga znaczącego wkładu energetycznego z paliw kopalnych, wynoszącego... również $0,2 \text{ W/m}^2$, co czyni całe przedsięwzięcie energetycznie nieopłacalnym. Jedynym sposobem na wyciągnięcie korzyści energetycznych z takiego procesu jest wykorzystanie wszystkich produktów ubocznych. Shapouri et al. szacują, że produkcja etanolu z kukurydzy ma współczynnik energetyczny równy 1,24, co oznacza, że produkcja mocy netto wynosi $0,048 \text{ W/m}^2$.

Dlatego też maksymalna dostępna moc, z pominięciem wszystkich dodatkowych kosztów sadzenia, zbierania i przetwarzania roślin, wynosi:

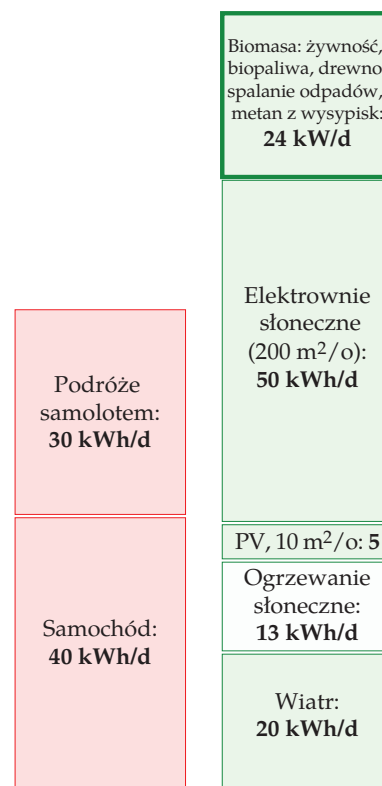
$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ na osobę} = 36 \text{ kWh/d na osobę}$$

To nie za wiele, jeśli weźmiemy pod uwagę niesłychanie szczodre założenia, które przyjęliśmy, by osiągnąć wysoki wynik. Jeśli chcielibyście otrzymać biopaliwa do samochodów lub samolotów z roślin, to pozostałe ogniwa łańcucha – od pola uprawnego przez stację paliwową do świecy zapłonowej – wiążą się ze stratą energii. Optymizmem byłoby zakładać, że całkowite straty związane z procesem przetwarzania mogłyby wynieść zaledwie 33%. Nawet w dobrym kotle podczas spalania suchego drewna przez komin ucieka 20% ciepła. Rzeczywisty potencjał biomasy i biopaliw z pewnością nie może być większy niż **24 kWh/d na osobę**. I nie zapominajmy o tym, że część roślin chcemy przecież przeznaczyć na pożywienie dla nas i naszych zwierząt.

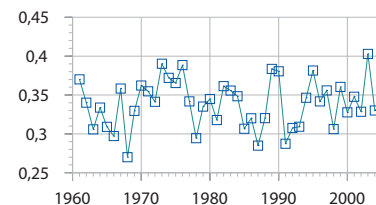
W Polsce użytki rolne zajmują blisko 60% powierzchni kraju, co daje 4500 m^2 na osobę. Z jednej strony nasz klimat jest trochę bardziej słoneczny, lecz z drugiej mamy ostrzejsze zimy, mniejsze opady i gleby słabszej jakości. W naszych szacunkach założymy, że podobnie jak w Wielkiej Brytanii możemy uzyskać $0,5 \text{ W/m}^2$. Otrzymujemy więc:

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 4500 \text{ m}^2 \text{ na osobę} = 54 \text{ kWh/d na osobę.}$$

Przyjmując za Davidem MacKayem straty energii równe 33%, otrzymujemy wynik **36 kWh/d na osobę**, czyli trochę lepszy niż w Wielkiej Brytanii.



Rys. 6.12. Biomasa z uwzględnieniem wszystkich rodzajów biopaliw, spalania odpadów oraz żywności: 24 kWh/d na osobę

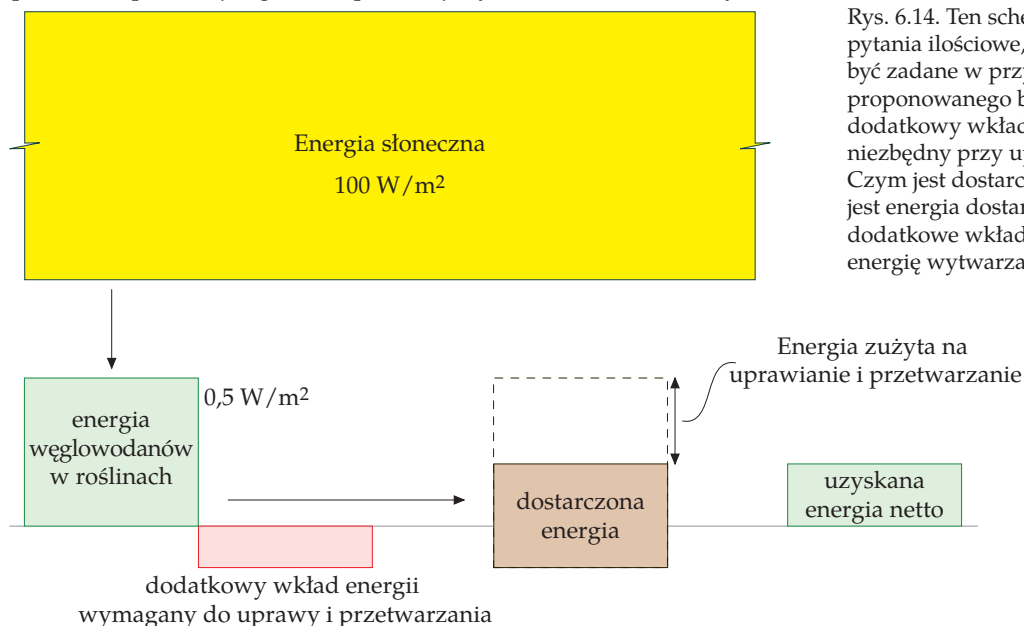


Rys. 6.13. Nasłonecznienie w Cambridge: liczba godzin w roku, w czasie których świeci słońce, wyrażona jako część całkowitej liczby godzin dziennych.

Czy inżynieria genetyczna mogłaby wyprodukować rośliny, które zamieniają energię słoneczną w chemiczną z większą wydajnością? Niewykluczone. Nie znalazłem jednak żadnej publikacji naukowej przewidującej, że rośliny w Europie mogłyby osiągnąć moc produkcyjną, która na czysto wyniosłaby więcej niż 1 W/m^2 .

Dorzucę 24 kWh/d na osobę do zielonego słupka, z zastrzeżeniem, że według mnie liczba ta jest zawyżona. Wydaje mi się, że rzeczywista maksymalna moc, którą możemy uzyskać z biomasy, byłaby mniejsza ze względu na straty w procesie uprawiania i przetwarzania.

Według mnie wniosek jest prosty: *biopaliwa nie mają sensu*, a przynajmniej nie w krajach takich jak Wielka Brytania i nie jako zamiennik dla całości paliw używanych w transporcie. Nawet jeśli na chwilę zapomnimy o głównych wadach biopaliw – ich produkcja ogranicza produkcję żywności, zaś dodatkowy wkład



Rys. 6.14. Ten schemat pokazuje pytania ilościowe, które powinny być zadane w przypadku każdego proponowanego biopaliwa. Jaki jest dodatkowy wkład energetyczny, niezbędny przy uprawie i obróbce? Czym jest dostarczona energia? Jaka jest energia dostarczona netto? Często dodatkowe wkłady i straty niwelują energię wytwarzaną przez rośliny.

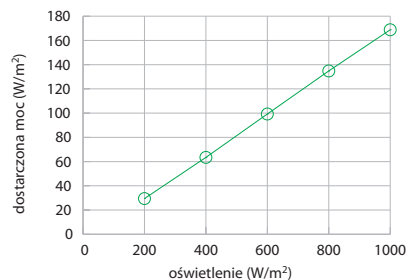
energetyczny niezbędny do ich uprawy i przetwarzania często niweluje większość wyprodukowanej energii (rys. 6.14) – to biopaliwa produkowane z roślin w europejskim kraju, takim jak Wielka Brytania, mogą dostarczyć tak niewiele mocy, że według mnie właściwie nie warto o nich mówić.

Polska ma wysoki potencjał rozwoju energii z biomasy, chociaż pomysł, żeby pod uprawy energetyczne zająć całość dostępnych obszarów uprawnych, zapominając o produkcji żywności i eliminując istniejące ekosystemy pól, łąk i pastwisk, wydaje się mało realistyczny.

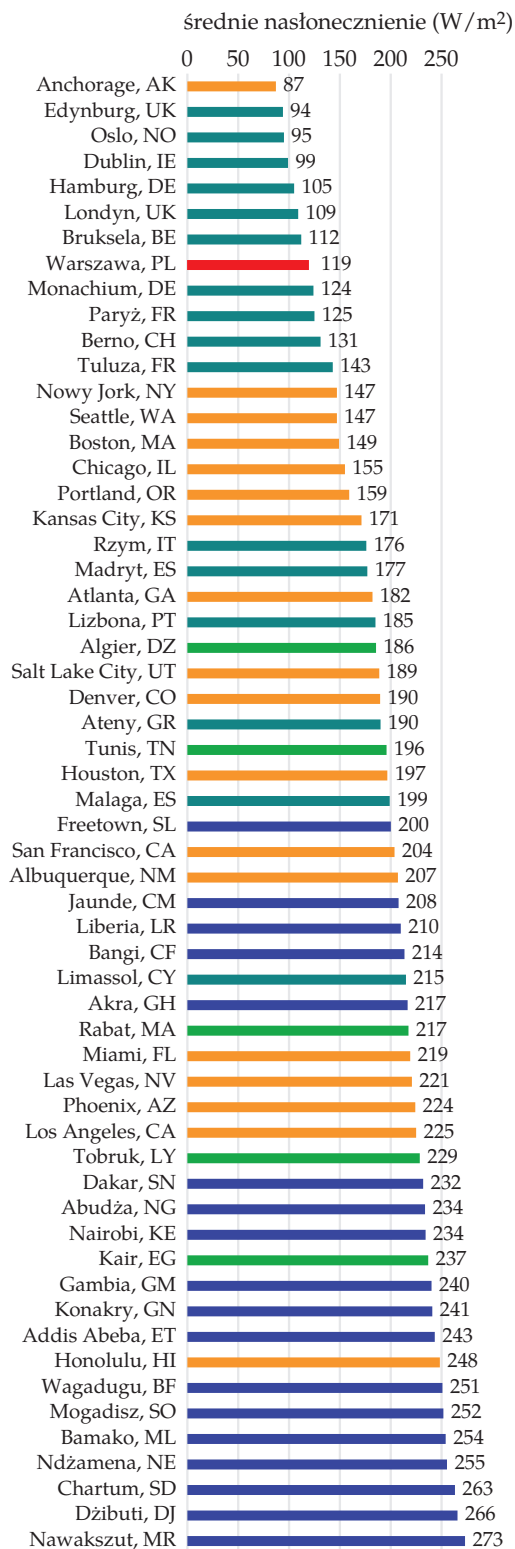
Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

47 **Musimy bowiem uwzględnić kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię ziemi...** – Szerokość geograficzna Cambridge to $\theta = 52^\circ$; intensywność światła słonecznego w południe jest pomnożona przez $\cos \theta \approx 0,6$. Dokładny współczynnik zależy od pory roku i waha się pomiędzy $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ i $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.

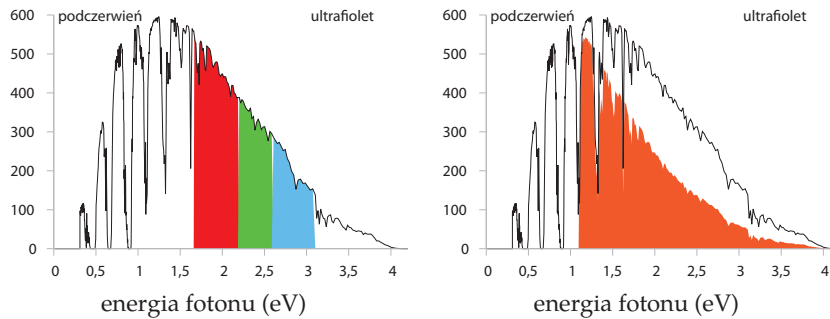


Rys. 6.15. Moc wyprodukowana przez moduł Sanyo HIP-210NKHE1 jako funkcja intensywności oświetlenia (w temperaturze 25°C przy założeniu, że dostarczane napięcie wynosi 40 V). Źródło: www.sanyo-solar.eu



Rys. 6.16. Średnia moc światła słonecznego padającego na płaską powierzchnię w wybranych miejscach w Europie, Ameryce Północnej i Afryce





47 W typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 1/3 czasu słońce nie jest przesłonięte przez chmury. – Szkocki górzysty region Highlands cechuje 1100 godzin światła słonecznego rocznie – nasłonecznienie równe 25%. Najlepsze obszary w Szkocji otrzymują 1 400 godzin rocznie – 32%. Cambridge: 1 500 ± 130 godzin rocznie – 34%. Południowe wybrzeże Anglii (najbardziej słoneczna część Wielkiej Brytanii): 1 700 godzin rocznie – 39%. [2rql0c]. Dane dla Cambridge pochodzą z [2szckw]. Spójrz także na rys. 6.16.

– ... średnia moc promieniowania słonecznego na metr kwadratowy skierowanego na południe dachu w Wielkiej Brytanii wynosi zaledwie 110 W/m², zaś średnia moc promieniowania słonecznego na płaskiej powierzchni ziemi to 100 W/m² – Źródło: NASA „Surface meteorology and Solar Energy” [5hrx1s]. Jesteście zaskoczeni tym, że pomiędzy pochylonym dachem zwróconym na południe a płaskim dachem jest tak niewielka różnica? Mnie to zdziwiło. Realnie różnica wynosi zaledwie 10%. [6z9epq].

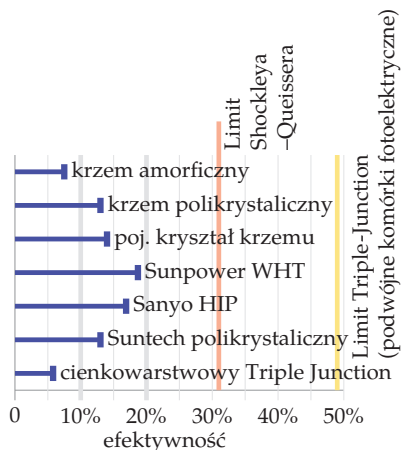
48 ... oznaczałoby to około 10 m² paneli na osobę. – Oszacowałem powierzchnię dachów skierowanych na południe na osobę, używając do tego powierzchni ziemi pokrytej budynkami na osobę (48 m² w Anglii – tabela I.6), pomnożonej przez ¼, by otrzymać część dachów skierowaną na południe i zwiększając powierzchnię o 40%, uwzględniając nachylenie dachu. To daje nam 16 m² na osobę. Panele mają zazwyczaj kształt niestawnych prostokątów, przez co nie da się nimi przykryć całej powierzchni dachu i zazwyczaj jego część pozostanie niezabudowana; stąd 10 m² paneli.

– Średnia moc dostarczana przez panele fotowoltaiczne... – Istnieje szeroko rozpowszechniony mit, zgodnie z którym panele słoneczne produkują prawie tyle samo energii w dni pochmurne, jak i w dni słoneczne. To oczywiście nie jest prawdą. W jasny, acz pochmurny dzień panele fotowoltaiczne oraz rośliny nadal produkują energię, ale w znacznie mniejszej ilości – produkcja fotowoltaiczna spada prawie 10-krotnie, gdy słońce schowa się za chmurą (ponieważ natężenie padającego światła spada 10-krotnie). Jak pokazuje rys. 6.15, moc dostarczona przez panele fotowoltaiczne jest niemal wprost proporcjonalna do intensywności światła słonecznego, przynajmniej w temperaturze 25 °C. By jeszcze bardziej skomplikować sprawę dodam, że dostarczana moc zależy również od temperatury – bardziej rozgrzane panele dostarczają mniej mocy (zazwyczaj jest to strata 0,38% na każdy 1°C). Kiedy jednak sprawdzisz dane pochodzące z istniejących paneli (na przykład na stronie www.solarwarrior.com), możesz potwierdzić główną myśl: moc dostarczana przez panele w dni pochmurne jest znacznie mniejsza niż w dni słoneczne. Ta sprawa jest często tuszowana przez osoby promujące panele słoneczne, gdy omawiają zależność paneli od światła słonecznego. Mówią, że „panele są bardziej wydajne w dni pochmurne”, co może i jest prawdą, jednak nie ma nic wspólnego z wytwarzaną mocą, która w dni pochmurne jest znacznie mniejsza.

– Wydajność przeciętnego panelu wynosi około 10%, zaś bardziej kosztownego – 20% – patrz: rys. 6.18; źródła: Turkenburg (2000), Sunpower, www.sunpowercorp.com, Sanyo, www.sanyo-solar.eu, Suntech.

– Masowa produkcja paneli o efektywności większej niż 30% byłaby wybitnym osiągnięciem... – To cytat z pracy Hopfielda i Golluba (1978), którzy odnosili się do

Rys. 6.17. Część objaśnienia Shockleya i Queissera dotyczącego limitu 31% sprawności prostych paneli fotowoltaicznych. Po lewej: widmo światła słonecznego w południe. Oś pionowa pokazuje gęstość energetyczną w W/m² na elektronowolt (eV) przedziału widmowego. Widmo widzialne oznaczono kolorami. Po prawej: energia wychwycona przez moduł fotowoltaiczny z jednym pasmem wzbronionym na poziomie 1,1 eV jest oznaczona w czerwonym obszarze. Fotony o energii niższej od energia pasma wzbronionego zostają utracone; tracona jest również część energii fotonów o energii wyższej od poziomu pasma wzbronionego, na przykład tracona jest połowa energii każdego fotonu o energii 2,2 eV. Przyczyną kolejnych strat jest nieuniknione promieniowanie z rekombinacji ładunków w materiale fotowoltaicznym.



Rys. 6.18. Sprawność modułów fotowoltaicznych dostępnych obecnie na rynku. W książce zakładam, że dachowe moduły mają sprawność rzędu 20%, a moduły naziemne – 10%. W miejscach o średniej gęstości energetycznej światła słonecznego rzędu 100 W/m², panele o sprawności 20% dostarczają 20 W/m².

paneli niewyposażonych w lustra lub soczewki koncentrujące promieniowanie. Maksymalna teoretyczna sprawność, zwana *limitem Shockleya-Queissera*, dla standardowego ogniwa z jednym złączem P-N (ang. *single-junction*) bez koncentratora wynosi 31% – najwyżej tyle energii słonecznej może zostać przekształcone w elektryczność (Shockley i Queisser, 1961). Przyczyna? Wydajność zależy od energii, tzw. przerwy energetycznej (pasma wzbronionego) w materiale, z którego zrobione jest ogniwo. Światło słoneczne zawiera fotony o różnej energii, fotony o energii *poniżej* pasma wzbronionego w ogóle nie zostają wykorzystane, fotony o energii powyżej tego pasma zostają wychwycone, ale nadmiar energii (w stosunku do energii pasma wzbronionego) zostaje utracony. Koncentratory (lustra lub soczewki) ograniczają koszt w przeliczeniu na wat mocy z systemów fotowoltaicznych i jednocześnie zwiększają ich wydajność. Limit Shockleya-Queissera dla paneli słonecznych z koncentratorem wynosi 41%. Jedynym sposobem, by przeskoczyć limit Shockleya-Queissera, jest produkcja wyrafinowanych systemów fotowoltaicznych, które dzielą światło na różne długości fali i przetwarzają każdy zakres fal przy użyciu oddzielnych pasm wzbronionych. To ogniwo o wielu złączach P-N (ang.: *multiple-junction*). Najnowsze ogniwa o wielu złączach P-N z koncentracją optyczną mają mieć sprawność rzędu 40%. [21f716], www.spectrolab.com. W lipcu 2007 Uniwersytet Delaware ogłosił, że uzyskał sprawność rzędu 42,8% przy 20-krotnej koncentracji [6hobq2], [2lsx6t]. W sierpniu 2008 NREL ogłosiło uzyskanie 40,8% sprawności przy 326-krotnej koncentracji [62ccou]. Co ciekawe, oba te wyniki okrzyknięto rekordem świata w sprawności. Jakie ogniwa o wielu złączach P-N są dostępne na rynku? Uni-solar sprzedaje cienkowarstwowe panele o wielu złączach P-N, o mocy szczytowej 58 W i powierzchni 1 m². Oznacza to sprawność przy pełnym nasłonecznieniu rzędu zaledwie 5,8%.

49 **Rys. 6.5. Dane dotyczące paneli fotowoltaicznych.** – Dane oraz zdjęcie zamieszczone dzięki uprzejmości Jonathan Kimmitta.

– **Heliodynamics** – www.hdsolar.com; patrz fot. 6.19. Podobny system jest produkowany przez Arontis www.arontis.se.

50 **Park Słoneczny w Mühlhausen w Bawarii.** – Szacuje się, że ta 25-hektarowa farma będzie produkować średnio 0,7 MW energii (17 000 kWh dziennie). Nowojorska stacja metra Stillwell Avenue ma wbudowane w sklepienie cienkowarstwowe ogniwa fotowoltaiczne z silikonu amorficznego, dostarczające 4 W/m² (Fies i inni, 2007).

Elektrownia słoneczna Nellis w Nevadzie została oddana do użytku w grudniu 2007, zajmuje 56 hektarów i ma produkować 30 GWh energii rocznie. To 6 W/m² [5hzs5y].

Elektrownia słoneczna Serpa w Portugalii, „najpotężniejsza elektrownia słoneczna na świecie” [39z5m5] [2uk8q8], dysponuje panelami śledzącymi słońce, zajmującymi 60 ha (czyli 600 000 m² lub 0,6 km²), które mają generować 20 GWh energii rocznie, średnio 2,3 MW. Daje to moc na jednostkę powierzchni rzędu 3,8 W/m².

– **Moc z elektrowni słonecznych, potrzebna do dostarczenia tych 50 kWh dziennie na osobę w Wielkiej Brytanii, to więcej niż 100-krotna moc dostarczana przez wszystkie panele słoneczne zainstalowane obecnie na świecie.** Dostarczenie 50 kWh dziennie każdemu Brytyjczykowi wymagałoby średniej mocy na poziomie 125 GW, do czego potrzeba 1 250 GW mocy zainstalowanej. Do końca roku 2007 moc zainstalowana w fotowoltaice na całym świecie osiągnęła 10 GW; przyrost mocy zainstalowanej wynosi około 2 GW rocznie.

51 **Wyłożenie 5% powierzchni Wielkiej Brytanii panelami słonecznymi wydaje się z wielu względów nierealne.** Wydaje się mi to nieprawdopodobne, gdyż Brytyjczycy wolą na swojej wsi prowadzić farmy lub wypoczywać, a nie „uprawiać” panele słoneczne. Odstręcza również cena. To nie jest książka o ekonomii, jednak podam kilka liczb. W oparciu o koszty bawarskiej farmy słonecznej można obliczyć, iż dostarczenie 50 kWh energii dziennie na osobę kosztowałoby 91 000 euro na osobę. O ile elektrownia ta działałaby kolejne 20 lat bez dodatkowych inwestycji, hurtowa cena energii wyniosłaby 0,25 euro za 1 kWh. Więcej w: David Carlson, *BP solar* [2ahecp].



Fot. 6.19. Kogeneracyjny moduł fotowoltaiczny firmy Heliodynamics. Powierzchnia modułu wielkości 32 m² (to nieco więcej niż bok autobusu piętrowego) dostarcza do 10 kW ciepła i 1,5 kW prądu. W słonecznym kraju to ważące tonę urządzenie mogłoby dostarczyć dziennie jakieś 60 kWh ciepła oraz 9 kWh prądu. Te wartości odpowiadają średnim przepływowi rzędu 80 W/m² ciepła i 12 W/m² prądu (na m² powierzchni modułu); przepływy te są zbliżone do przepływów generowanych przez standardowe kolektory słoneczne oraz panele fotowoltaiczne, ale koncentrujący moduł Heliodynamics generuje energię taniej, ponieważ zbudowany jest głównie ze zwykłego płaskiego szkła. Dla porównania przeciętny Europejczyk zużywa 125 kWh energii dziennie.

52 przeciętny Brytyjczyk wyrzuca ok. 300 g jedzenia dziennie. – Źródło: Ventour (2008).

– Fot. 6.10. Miskant uprawiany bez nawozów azotowych daje w USA plon ok. 24 t suchej masy z hektara rocznie. W Wielkiej Brytanii plony wynoszą 12–16 t/ha rocznie. Suchy miskant ma wartość kaloryczną netto rzędu 17 MJ/kg, zatem brytyjskie plony odpowiadają gęstości energetycznej rzędu 0,75 W/m². Źródła: Heaton i inni (2004) oraz [6kq77]. Takie plony osiągnięte są dopiero po trzech latach niezakłóconego wzrostu.

– Rys. 6.11. Przytoczone tu liczby pochodzą z następujących prac: Rogner (2000) energia netto pozyskana z drewna, rzepaku, trzciny cukrowej i plantacji tropikalnych; Bayer Crop Science (2003) rzepak na biodiesel; Francis i inni (2005) oraz Asselbergs i inni (2006) jatrofa; Mabee i inni (2006) brazylijska trzcina cukrowa; Schmer i inni (2008) proso różgowe, gleby gorszej jakości w USA; Shapouri i inni (1995) kukurydza na etanol; Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska (2004); Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer i Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).

53 Najbardziej wydajne rośliny w Europie mają zaledwie 2-procentową efektywność w procesie zamiany energii słonecznej w węglowodany, rzeczywista moc dostarczona na jednostkę powierzchni wynosi jakieś 0,5 W/m². Przy niskim nasłonecznieniu najbardziej wydajne rośliny, solidnie nawożone, mają efektywność rzędu 2,4% (Monteith, 1977). Przy wyższym nasłonecznieniu efektywność konwersji spada. Wg Turkenburga (2000) i Schiermeiera i in. (2008), efektywność konwersji energii słonecznej na energię biomasy wynosi mniej niż 1%.

Oto kilka źródeł na potwierdzenie mojego oszacowania 0,5 W/m² dla energii z roślin w Wielkiej Brytanii. Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska szacuje potencjalną gęstość energetyczną upraw energetycznych w Wielkiej Brytanii na 0,2 W/m² (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Na stronie 43 analizy Towarzystwa Królewskiego nt. biopaliw (Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw – Royal Society working group on biofuels, 2008) miskant zajmuje pierwsze miejsce, dostarczając jakieś 0,8 W/m² energii chemicznej.

W *Ocenie sytuacji energetycznej na świecie ONZ* (World Energy Assessment) Rogner (2000) pisze: „Zakładając efektywność konwersji na prąd rzędu 45% oraz plony rzędu 15 ton suchej masy z hektara na rok, wytworzenie 1 megawata prądu z instalacji na biomase pracującej przez 4 tys. godzin rocznie wymagałoby 2 km² plantacji”. Daje to energię na jednostkę powierzchni rzędu 0,23 W(e)/m² (1 W(e) oznacza 1 wat mocy elektrycznej).

Energy for Sustainable Development Ltd (2003) szacuje, że rośliny krzewiaste (np. wierzba, topola) mogą dostarczyć ponad 10 ton suchej masy z hektara na rok, co odpowiada gęstości energetycznej rzędu 0,57 W/m² (suche drewno ma wartość kaloryczną 5 kWh na kg).

Wg Archera i Barbera (2004), chwilowa sprawność zdrowego liścia w warunkach optymalnych zbliża się do 5%, ale długo-okresowa efektywność gromadzenia energii dzisiejszych upraw wynosi 0,5–1%. Archer i Barber sugerują, że modyfikacje genetyczne mogą podnieść sprawność gromadzenia energii roślin, a szczególnie *roślin o fotosyntezie C₄*, które same z siebie ewoluowały w kierunku bardziej efektywnej fotosyntezy. Rośliny C₄ rosną głównie w tropikach i lubią wysokie temperatury; nie rosną w temperaturach niższych niż 10 °C. Roślinami C₄ są: trzcina cukrowa, kukurydza, sorgo, proso afrykańskie czy proso różgowe. Zhu i inni (2008) szacują teoretyczny limit efektywności konwersji energii słonecznej na energię biomasy na poziomie 4,6% dla typu fotosyntezy C₃ (przy 30 °C i obecnym stężeniu CO₂ w atmosferze rzędu 380 ppm) oraz 6% dla fotosyntezy typu C₄. Twierdzą, że najwyższe rzeczywiście uzyskane wartości efektywności konwersji dla roślin C₃ i C₄ wyniosły odpowiednio 2,4% oraz 3,7%, a także (cytując Boyera, 1982), że średnia efektywność konwersji najpopularniejszych upraw w USA jest 3–4 razy niższa niż te rekordowe wyniki (i wynosi 1%). Jednym z powodów, dla których rośliny nie osiągają teoretycznego limitu, jest fakt, że nie potrafią wykorzystać całego promieniowania jasnego światła słonecznego. Oba opracowania (Zhu i inni, 2008; Boyer, 1982) omawiają możliwości modyfikacji genetycznych w celu uzyskania bardziej wydajnych roślin.

– Nawet w dobrym kotle, podczas spalania suchego drewna, przez komin ucieka 20% ciepła. Źródła: Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw (2008); Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska (2004).