

D Energia słoneczna

Na stronie 51 wymienialiśmy cztery sposoby pozyskiwania energii z zasilanych słońcem systemów biologicznych:

1. substytucja węgla,
2. substytucja ropy,
3. żywność dla ludzi i zwierząt,
4. spalanie produktów ubocznych działalności rolniczej.

Teraz oszacujemy potencjał tych procesów. W praktyce część z nich wymaga tak dużego *wkładu* energetycznego, że dostarcza niewiele energii netto (rys. 6.14). Jednak poniżej zignoruję koszt szarej energii związanej z produkcją i przetwarzaniem surowca.

Rośliny energetyczne jako substytut węgla

Jeżeli uprawiamy w Wielkiej Brytanii rośliny energetyczne takie, jak: wierzba, miskant lub topola (o średniej mocy $0,5 \text{ W}$ na metr kwadratowy powierzchni) i pakujemy je do pieca w elektrowni o sprawności 40%, otrzymujemy moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,2 \text{ W/m}^2$. Gdyby obsadzić wierzbą jedną ósmą Wielkiej Brytanii (500 m^2 na osobę), dysponowalibyśmy mocą $2,5 \text{ kWh/d/o}$.

Obsianie wierzbą jednej ósmej Polski (1000 m^2 na osobę), dałoby moc 5 kWh/d/o .

Substytucja ropy

Istnieje kilka metod przekształcania roślin w paliwa płynne. Potencjał każdej z tych metod wyrażę w kategoriach mocy na jednostkę powierzchni (tak jak na rys. 6.11).

Rzepak – najważniejsze źródło brytyjskiego biodiesla

Zazwyczaj rzepak sieje się we wrześniu, a zbiera w kwietniu. Obecnie w Wielkiej Brytanii rzepakiem obsiewa się 450 000 hektarów rocznie (to 2% powierzchni kraju). Produkcja biodiesla wynosi 1200 litrów z hektara rocznie, litr biodiesla zawiera $9,8 \text{ kWh}$ energii. Daje to moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,13 \text{ W/m}^2$.

Gdybyśmy 25% powierzchni kraju obsiali rzepakiem, otrzymalibyśmy biodiesel o zawartości energetycznej rzędu $3,1 \text{ kWh}$ na osobę dziennie.

Obsianie rzepakiem 25% powierzchni Polski (2000 m^2 na osobę) dałoby moc rzędu 6 kWh/d/o .



Fot. D.1. Drzewa



Fot. D.2. Rzepak. Spożytkowany do produkcji biodiesla dostarcza $0,13 \text{ W/m}^2$ mocy na jednostkę powierzchni.
Fot. Tim Dunne

Etanol z buraka cukrowego

Burak cukrowy daje w Wielkiej Brytanii imponujące plony 53 t z hektara rocznie. Z jednej tony buraka cukrowego pozyskuje się 108 litrów bioetanolu. Bioetanol charakteryzuje się gęstością energetyczną rzędu 6 kWh na litr, co daje moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,4 \text{ W/m}^2$. W rachunku pomijamy wysokie nakłady energetyczne ponoszone w procesie produkcji etanolu.

Bioetanol z trzciny cukrowej

Tam, gdzie da się uprawiać trzcinę cukrową (np. w Brazylii), plony wynoszą 80 ton z hektara rocznie, co daje 17 600 litrów etanolu. Bioetanol ma gęstością energetyczną rzędu 6 kWh na litr, co daje moc na jednostkę powierzchni rzędu $1,2 \text{ W/m}^2$.

Bioetanol z kukurydzy w Stanach Zjednoczonych

Moc na jednostkę powierzchni w przypadku etanolu z kukurydzy jest zadziwiająco niska. Dla zabawy najpierw posłużymy się archaiczną miarką. Z jednego akra otrzymujemy 122 buszle kukurydzy rocznie, a to $122 \times 2,6$ galonów amerykańskich etanolu, co przy 84 000 BTU na galon [mówiąc po polsku – $4,3 \text{ m}^3$ kukurydzy rocznie, 462 litry etanolu, $6,5 \text{ kWh}$ na litr – *red.*] oznacza moc na jednostkę powierzchni rzędu zaledwie $0,2 \text{ W/m}^2$. Jednakże nakłady energetyczne konieczne do przetworzenia kukurydzy w etanol wynoszą nawet 83,000 BTU na galon. 99% wyprodukowanej energii jest pożytkowane na przetwarzanie surowca. Moc na jednostkę powierzchni netto wynosi zaledwie $0,002 \text{ W/m}^2$. Jedy-nym sposobem na to, by proces przekształcania kukurydzy na etanol przyniósł istotny zysk energetyczny netto, jest wykorzystanie wszystkich jego produktów ubocznych. Po uwzględnieniu energii zawartej w produktach ubocznych moc netto na jednostkę powierzchni wyniesie około $0,05 \text{ W/m}^2$.

Etanol celulozowy z prosa różgowego

Czy etanol celulozowy jest cudownym biopaliwem „nowej generacji”? Zespół Schmer i in. (2008) podaje, że energia netto uzyskana z prosa różgowego uprawianego przez pięć lat na glebach marginalnych 10 gospodarstw rolnych w środkowych Stanach wyniosła 60 GJ z hektara rocznie. To $0,2 \text{ W/m}^2$. „To obliczenia wyjściowe, opierające się na materiale genetycznym oraz technologiach upraw prosa różgowego dostępnych w latach 2000 i 2001, kiedy rośliny były sadzone. Modyfikacje genetyczne i poprawa technologii upraw mogą dalej poprawiać bilans energetyczny i produkcję biopaliw z prosa różgowego”.

Jatrofa też daje małą moc na jednostkę powierzchni

Jatrofa to roślina oleista lubiąca suche tropiki (opady roczne rzędu 300–1000 mm). Preferuje temperatury pomiędzy 20 a 28 °C. Spodziewany plon w gorących regionach, na dobrych glebach, wynosi 1600 litrów

gęstość energetyczna (kWh/kg)	
drewno miękkie	
– suszone na powietrzu	4,4
– suszone w suszarni	5,5
drewno twarde	
– suszone na powietrzu	3,75
– suszone w suszarni	5,0
biały papier biurowy	4,0
papier kredowy	4,1
gazeta	4,9
karton	4,5
węgiel	8
słoma	4,2
kurze odchody	2,4
odpady przemysłowe	4,4
odpady medyczne	3,9
odpady komunalne stałe	2,6
odpady komunalne na paliwo (typu RDF)	5,1
opony	8,9

Tabela D.3. Wartość kaloryczna drewna i jemu podobnych. Źródła: Yaros (1997); Ucuncu (1993), *Digest of UK Energy Statistics 2005*



Fot. D.4. SELCHP – Twoje śmieci to ich interes

biodiesla z hektara rocznie. To moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,18 \text{ W/m}^2$. Na nieużytkach plon wynosi 583 litrów z hektara rocznie. To $0,065 \text{ W/m}^2$. Gdybyśmy przeznaczyci 10% powierzchni Afryki pod uprawy dostarczające $0,065 \text{ W/m}^2$, a potem podzielili to między sześć miliardów ludzi, ile by nam przypadło? **0,8 kWh na osobę dziennie**. Dla porównania światowe zużycie ropy wynosi 80 mln baryłek dziennie, co podzielone na 6 mld ludzi daje **23 kWh/d/os.** Nawet gdybyśmy całą Afrykę (z Saharą włącznie) obsadzili jatrofą, uzyskana moc zastąpiłaby jedynie jedną trzecią światowego zużycia ropy.

To może algi?

Algi to rośliny, więc wszystko powyższe stosuje się do alg. Śluzowate podwodne roślinki wcale nie mają sprawniejszej fotosyntezy niż ich lądowi kuzyni. Nie wspominałem jednak o zabiegu, powszechnie stosowanym przez producentów biodiesla z alg – wodę w zbiornikach z algami nawozi się dwutlenkiem węgla odebrany z elektrowni lub fabryk. Algom znacznie łatwiej przeprowadzić fotosyntezę, jeżeli ktoś za nie skoncentruje dwutlenek węgla. Według Rona Putta z Uniwersytetu w Auburn w tym słonecznym zakątku Stanów Zjednoczonych, w stawach nawożonych dwutlenkiem węgla (skoncentrowanym do poziomu 10%) algi mogą narastać w tempie 30 g na metr kwadratowy dziennie, produkując 0,01 litra biodiesla na m^2 dziennie. Oznacza to moc na jednostkę powierzchni 4 W/m^2 – zbliżoną do mocy bawarskiej farmy fotowoltaicznej. By przejechać 50 km dziennie w typowym samochodzie (spalającym 8l/100 km), potrzebowalibyś **420 metrów kwadratowych** pracujących dla Ciebie stawów algowych. Dla porównania powierzchnia na osobę w Wielkiej Brytanii wynosi 4000 m^2 , z czego 69 m^2 stanowi woda (rys. 6.8). Nie zapominajmy, że kluczowe jest nakarmienie alg skoncentrowanym dwutlenkiem węgla. Zastosowanie tej technologii byłoby więc ograniczone zarówno przez dostępność powierzchni pod stawy algowe, jak i dostęp do skoncentrowanego CO_2 , którego wychwycenie miałoby swój koszt energetyczny (co rozważaliśmy w rozdziałach: 23 i 31). Przyjrzyjmy się granicom wykorzystania skoncentrowanego CO_2 . Przyrost alg rzędu 30 g na m^2 dziennie wymagałby co najmniej 60 g CO_2 na m^2 dziennie (ponieważ cząsteczka CO_2 ma większą masę na atom węgla niż cząsteczki w algach). Gdyby wychwycić całe CO_2 ze wszystkich brytyjskich elektrowni (około $2\frac{1}{2}$ tony na osobę rocznie), wystarczyłoby to na użyżenie **230 metrów kwadratowych** stawów algowych na osobę – to jakieś 6% powierzchni kraju.

Przypadająca na Polaka emisja CO_2 związana z produkcją elektryczności wynosi 3,8 tony rocznie. Wystarczyłoby to na użyżenie **350 metrów kwadratowych** stawów algowych na osobę – to trochę ponad 4% powierzchni Polski.

Z tego obszaru da się pozyskać biodiesel o mocy 24 kWh na osobę dziennie, zakładając, że dane dotyczące słonecznej Ameryki znajdą u nas zastosowanie. Realistyczna wizja? A może wystarczy jedna dziesiąta tego obszaru? Sam zdecyduj.

To może algi morskie?

Jak właśnie napisałem, producenci biodiesla z alg zawsze karmią algi skoncentrowanym CO₂. Jeżeli wyprawimy się z tym na morze, pompowanie CO₂ nie zda egzaminu. A bez skoncentrowanego CO₂ produktywność alg spada stukrotnie. By algi morskie poprawiły bilans energetyczny, konieczne byłyby hodowle wielkości kraju.

To może algi produkujące wodór?

Nakłonienie alg do produkcji wodoru przy użyciu światła słonecznego to sprytny pomysł, bo eliminuje szereg chemicznych procesów, zazwyczaj związanych z przemysłową produkcją węglowodanów. Każda dodatkowa faza chemiczna zmniejsza przecież efektywność procesu. Wodór można produkować bezpośrednio w procesie fotosyntezy, przestając na pierwszym etapie. Naukowcy z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnych w Kolorado przewidują, że reaktor wypełniony genetycznie zmodyfikowanymi algami zielonymi, zajmujący 11 ha na pustyni w Arizonie, może produkować 300 kg wodoru dziennie. Wodór zawiera 39 kWh na kg, stąd też instalacja produkcji wodoru z alg dostarczyłaby moc na jednostkę powierzchni rzędu 4,4 W/m². Uwzględniając prąd zużywany przez instalację, moc dostarczona netto spadłaby do 3,6 W/m². To całkiem obiecujący wynik – choćby w porównaniu z bawarską farmą fotowoltaiczną (5 W/m²).

Żywność dla ludzi i zwierząt

Uprawy zbóż takich, jak: pszenica, żyto, jęczmień i kukurydza mają gęstość energetyczną rzędu 4 kWh/kg. W Wielkiej Brytanii przeciętne plony pszenicy wynoszą 7,7 t z hektara rocznie. Jeżeli tą pszenicą nakarmi się zwierzę, moc na jednostkę powierzchni wyniesie 0,34 W/m². Gdyby na takie uprawy przeznaczyć 2800 m² na osobę (to całość obszarów rolniczych Wielkiej Brytanii), produkcja energii chemicznej wyniosłaby około 24 kWh na osobę dziennie.

Średnie plony pszenicy w Polsce to blisko 4 t z hektara. Gdyby na takie uprawy przeznaczyć 4500 m² na osobę (całość polskich terenów rolniczych), to produkcja energii chemicznej wyniosłaby 20 kWh na osobę dziennie.

Spalanie odpadów rolnych

Dowiedzieliśmy się wcześniej, że w elektrowni na biomasę spalającej najlepsze rośliny energetyczne moc na jednostkę powierzchni wynosi 0,2 W/m². Załóżmy, że w to miejsce posadzimy uprawy żywnościowe i włożymy do pieca niejadalne odpady albo że tym zbożem nakarmimy kurczaki, a do pieca wrzucimy to, co kury pozostawią po sobie. Ile mocy na jednostkę powierzchni upraw nam to dostarczy? Oszacujemy to w przybliżeniu, a potem porównamy z rzeczywistością. Załóżmy nieco obłudnie, że zgarniamy odpady z połowy Wielkiej Brytanii (2000 m² na osobę) i wieziemy ciężarówkami do

elektrowni. Przyjmijmy, że odpady rolne dostarczają 1/10 mocy, którą na jednostkę powierzchni dostarczają najlepsze uprawy energetyczne, czyli $0,02 \text{ W/m}^2$. Mnożąc to przez 2000 m^2 , otrzymujemy **1 kWh na osobę dziennie**.

Czy w moich obłędnych założeniach skrzywdziłem odpady rolne? Pownownie oszacujemy możliwą produkcję energii z rolniczych odpadków, w oparciu o prototypową instalację na słomę w Elean we Wschodniej Anglii. Elean, przy mocy wyjściowej 36 MW rocznie, zużywa 200 000 ton słomy zebranej w promieniu 80 km. Zakładając podobną gęstość energetyczną na terenie całego kraju, instalacje typu Elean mogą dostarczyć $0,002 \text{ W/m}^2$. Przy 4000 m^2 na osobę to 8 W na osobę lub też 0,2 kWh na osobę dziennie.

Policzmy to jeszcze inaczej. Produkcja słomy w Wielkiej Brytanii wynosi 10 mln ton rocznie lub $0,46 \text{ kg}$ na osobę dziennie. Przy $4,2 \text{ kWh/kg}$ słoma zawiera energię chemiczną rzędu 2 kWh na osobę dziennie. Gdyby całą tę słomę spalić w elektrowni o sprawności 30% – co raczej nie spodoba się bydłu hodowlanemu, robiącemu ze słomy inny użytek – produkcja prądu wyniosłaby 0,6 kWh na osobę dziennie.

Produkcja słomy w Polsce wynosi 30 mln ton rocznie. Gdyby całą tą słomę spalić w elektrowni o sprawności 30%, to produkcja prądu wyniosłaby **2,7 kWh na osobę dziennie**.

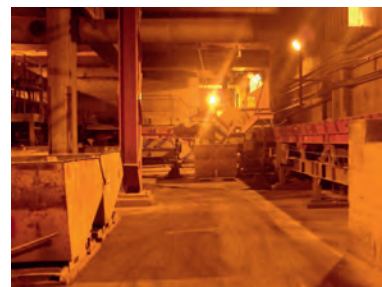
Metan z wysypisk śmieci

Obecnie większość metanu ulatniającego się z wysypisk pochodzi z odpadów organicznych, przede wszystkim z resztek żywności. Jak długo będziemy wyrzucać do śmieci jedzenie i gazety, gaz z wysypisk zapewni nam trwały dopływ energii. Co więcej, spalanie tego metanu będzie dobre dla klimatu, bo to gaz cieplarniany mocniejszy od CO_2 . Wysypisko przyjmujące rocznie 7,5 mln ton odpadów z gospodarstw domowych może produkować $50\,000 \text{ m}^3$ metanu na godzinę.

W roku 1994 emisję metanu z wysypisk szacowano na $0,05 \text{ m}^3$ na osobę dziennie, co przekładało się na energię chemiczną rzędu 0,5 kWh na osobę dziennie i mogło dostarczyć **0,2 kWh prądu na osobę dziennie** przy 40-procentowej sprawności konwersji. Dzięki odpowiedniemu prawodawstwu emisje gazów z wysypisk w Wielkiej Brytanii spadają i teraz są mniej więcej o połowę mniejsze.

Spalanie odpadów bytowych

SELCHP, elektrociepłownia południowo-wschodniego Londynu [www.selchp.com], to jednostka o mocy 35 MW spalająca rocznie 420 tysięcy ton niesegregowanych odpadów z Londynu i okolic. Pakują do pieca wszystko, jak leci, bez sortowania. Już po spaleniu metale żelazne są oddzielane do recyklingu, odpady toksyczne są filtrowane i wysyłane na specjalne składowisko, a pozostały popiół, oddany do ponownego przetworzenia, kończy jako materiał do budowy dróg i budynków. Wartość kaloryczna odpadów wynosi $2,5 \text{ kWh/kg}$ a sprawność cieplna instalacji – 21%, stąd też każdy kilogram odpadów zamienia się w $0,5 \text{ kWh}$ prądu. Emisje dwutlenku węgla wynoszą



Fot. D.4. SELCHP – Twoje śmieci to ich interes

około 1000 g CO₂ na kWh. Z produkowanych 35 MW około 4 MW zużywa sama instalacja do napędu urządzeń i filtracji.

Patrząc szerzej, gdyby każda gmina miała taki SELCHP i gdyby każdy wysyłał tam 1 kg odpadów dziennie, spalanie śmieci dostarczyłoby nam **0,5 kWh_{el} na osobę dziennie**.

To wartość zbliżona do szacunków dla metanu z wysypisk. Niestety – albo jedno, albo drugie. Im więcej śmieci spalimy, tym mniej metanu wycieknie z wysypisk. Więcej informacji dotyczących spalania można znaleźć na rys. 27.2 (str. 216) i rys. 27.3 (str. 217).

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

288 **Moc na jednostkę powierzchni dla produkcji prądu z wierzby, miskanta lub topoli wynosi 0,2 W/m².** – Źródło: Select Committee on Science and Technology Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm].

„Przeciętnie w Europie Północnej można w sposób zrównoważony produkować 10 ton suchej biomasy drzewnej z hektara rocznie (...). Stąd też z 1 km² można uzyskać 1000 ton suchej masy rocznie. To wystarczy do zasilenia jednostki o mocy wyjściowej 150 kW_{el} przy niskiej sprawnościach konwersji lub też 300 kW_{el} przy wysokiej sprawności konwersji”. Oznacza to 0,15–0,3 W_{el}/m². Więcej w: Layzell i in. (2006). [3ap7lc].

– **Rzepak.** – Źródła: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk

299 **Burak cukrowy.** – Źródło: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

– **Bioetanol z kukurydzy.** – Źródło: Shapouri i in. (1995).

– **Bioetanol z celulozy.** Więcej w: Mabee i in. (2006).

– **Jatrofa.** – Źródła: Francis i in. (2005), Asselbergs i in. (2006).

300 **W Stanach Zjednoczonych, w stawach nawożonych skoncentrowanym CO₂, algi mogą narastać w tempie 30 g na metr kwadratowy dziennie, produkując 0,01 litra biodiesla na m² dziennie.** – Źródło: Putt (2007). W tym rachunku nie uwzględniono kosztów energetycznych utrzymania stawów algowych i przetwarzania alg na biodiesel. Putt oblicza bilans energetyczny dla projektu 40-hektarowej farmy algowej, zasilanej metanem z biofermentatora na gnojowicę. Opisywana farma w rzeczywistości produkowałaby mniej energii niż dostarczałby metan. Zużywałaby 2600 kW metanu, co odpowiada gęstości energetycznej na wejściu rzędu 6,4 W/m². Reasumując, gęstość energetyczna na wyjściu, w formie biodiesla, wynosiłaby zaledwie 4,2 W/m². Na wszystkie metody produkcji biopaliw należy spojrzeć krytycznym okiem!

301 **Naukowcy z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnych w Kolorado przewidują, że reaktor wypełniony genetycznie zmodyfikowanymi algami zielonymi, zajmujący 11 ha, może produkować 300 kg wodoru dziennie.** – Źródło: Amos (2004).

302 **Instalacja Elean.** – Źródło: Rządowa biała księga (2003). Elean (36 MW) – pierwsza brytyjska instalacja na słomę. Produkcja słomy: www.biomassenergycentre.org.uk

– **Gaz wysypiskowy.** – Źródła: Matthew Chester, City University, London, wystąpienie własne; Meadows (1996); Aitchison (1996); Alan Rosevear, przedstawiciel Wielkiej Brytanii w Podkomitecie ds. Gazu Wysypiskowego Methane to Markets, maj 2005. [4hamks].

