



Dlaczego warto zajmować się fotosyntezą?

Květoslava Burda

Instytut Fizyki UJ

Fotosynteza jest procesem odpowiedzialnym za wykorzystanie energii słonecznej do produkcji związków organicznych niezbędnych dla wszystkich organizmów żywych. W procesie tym, poza światłem, potrzebna jest woda i dwutlenek węgla pochodzący z atmosfery.

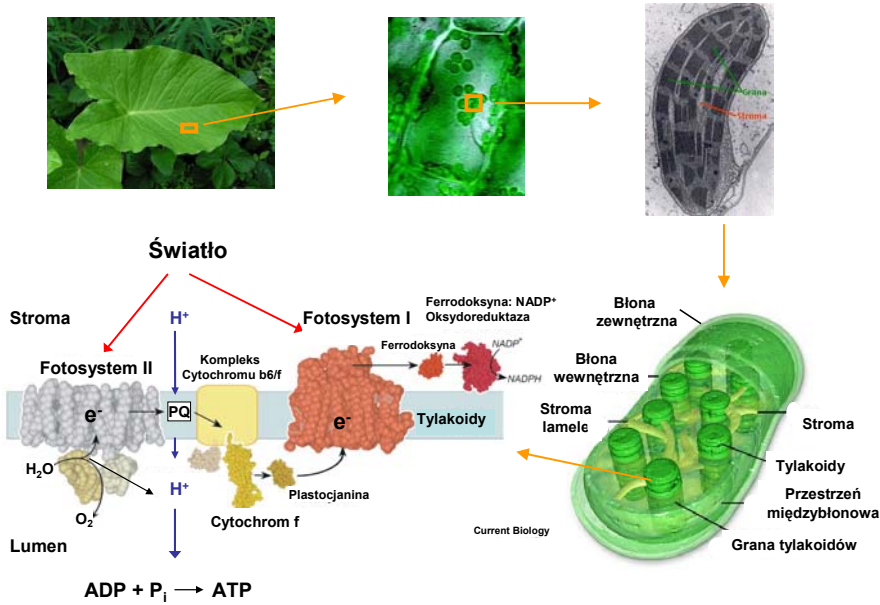
Rozwój pierwszych organizmów zdolnych do fotosyntezy, około 3.5 miliarda lat temu, zapoczątkował życie na Ziemi. Przeważała wtedy fotosynteza beztlenowa, w której zewnętrznym źródłem elektronów i protonów był np. H_2S . Fotosynteza tlenowa pojawiła się ponad 2 miliardy lat temu. Cyjanobakterie, glony i rośliny wyższe wykształciły aparat fotosyntetyczny, który pozwolił na ekstrakcję elektronów i protonów z wody, powszechnie występującej na powierzchni naszej planety. Produktem ubocznym tej reakcji był tlen cząsteczkowy (O_2).

Pojawienie się tlenu w atmosferze zadecydowało o kierunku ewolucji życia. Tlen jest niezbędny w procesie oddychania, w wyniku którego związki organiczne są utleniane z powrotem do dwutlenku węgla i wody z jednoczesnym uwolnieniem energii koniecznej do funkcjonowania organizmów żywych.

Fotosynteza jest procesem zamieniającym energię świetlną w energię chemiczną poprzez łańcuch złożonych reakcji biofizycznych i biochemicznych zachodzących w chloroplastach roślin i komórkach fotosyntetycznych prokariotów.

Sterowane światłem reakcje zlokalizowane są w wewnętrznej błonie chloroplastów, nazywanej tylakoidami (Rys. 1). Fotosynteza składa się z szeregu reakcji, począwszy od rozkładu cząstek wody na tlen cząsteczkowy, kationy wodoru i elektrony, poprzez liniowy transport elektronów, a zakończywszy na tworzeniu NADPH i ATP, związków będących źródłem energii chemicznej wykorzystywanej w metabolizmie komórkowym (szczegóły w Uzupelnieniu 1).

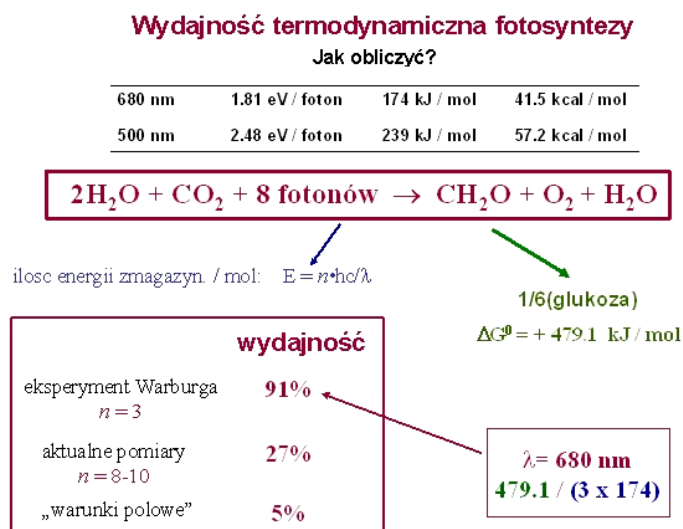
Uzupelnienie 1. Trzy kompleksy współdziałają w łańcuchu transportu elektronów w tylakoidach: fotosystem II (PSII), kompleks cytochromu b6/f i fotosystem I (PSI). Fotosystem II uważany jest za „serce” całego aparatu fotosyntetycznego. To właśnie on wykorzystuje energię światła do katalizy wody, która rozszczepia się na tlen cząsteczkowy, protony (H^+) i elektrony. Przekaz elektronów pomiędzy PSII i PSI jest możliwy dzięki dwóm ruchliwym nośnikom elektronów: plastochinonowi (PQ) i plastocjaninie (PC). Następujące kolejno po sobie reakcje przekazywania elektronów z PSII poprzez cytochrom b6/f do PSI nazywane są fotosyntetycznym liniowym łańcuchem transportu elektronów. Na stronie akceptorowej PSI, $NADP^+$ (forma utleniona fosforanu dwunukleotydu nikotynamidoadeninowego) redukowane jest do NADPH zgodnie z reakcją: $NADP^+ + H^+ + 2e^- \rightarrow NADPH$. Gradient protonowy utworzony w wyniku uwalniania z wody H^+ do wnętrza tylakoidów (strona lumen) i pompowania H^+ z zewnątrz błony do jej wnętrza przez PQ stanowi siłę napędzającą tworzenie ATP (adenozynotrójfosforan).



Rys. 1. Schemat struktury tylakoidów w chloroplastach, zielonych częściach liści oraz schemat łańcucha liniowego transferu elektronów w procesie fotosyntezy, formowania NADPH i ATP, będących końcowymi produktami fazy świetlnej procesu fotosyntezy.

NADPH i ATP powstałe w fazie świetlnej procesu fotosyntezy są wykorzystywane następnie w fazie ciemnej, zwanej cyklem Calvina, w której produkowane są węglowodany i inne związki organiczne. Na tym etapie fotosyntezy zachodzi asymilacja CO_2 . Aby powstała jedna cząsteczka glukozy musi nastąpić sześć kompletnych cykli Calvina, przy czym w każdym z nich zużywane są trzy cząsteczki ATP i dwie cząsteczki NADPH. Proces ten można ująć w następującym równaniu chemicznym:





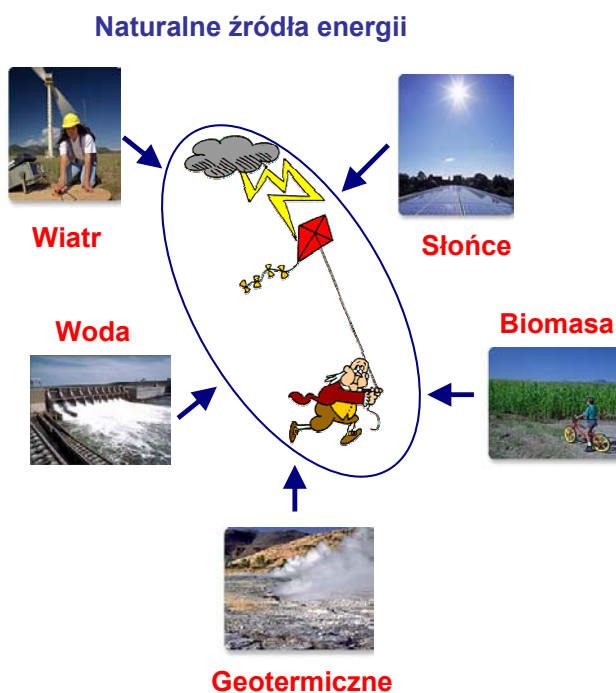
Rys. 2. Termodynamiczna wydajność fotosyntezy

Sposób oszacowania termodynamicznej wydajności całego procesu fotosyntezy został przedstawiony na Rys. 2. Efektywność fotosyntezy nie przekracza 5% (szczegóły zawarte są w Uzupelnieniu 2).

Uzupelnienie 2. Przyjmuje się, że osiem fotonów jest potrzebnych do redukcji jednej cząsteczki CO_2 , czyli wykorzystana energia wynosi $8 \times 174 \text{ kJ/mol}$ dla długości fali 680 nm (jest to maksimum absorpcji centrum reakcji PSII). Energia swobodna reakcji redukcji CO_2 do CH_2O (1/6 cząsteczki glukozy) wynosi 479 kJ/mol. Obliczając stosunek energii związanej w tym procesie do energii włożonej, wyznacza się efektywność procesu fotosyntezy, który sięga 34% w warunkach optymalnych. W rzeczywistości, należałoby uwzględnić absorpcję kwantów energii dla długości fal świetlnych z szerszego zakresu 500–680 nm oraz fakt, że w warunkach naturalnych do utworzenia jednej cząsteczki glukozy potrzebnych jest więcej fotonów, niż zakłada się w warunkach optymalnych. Energia części fotonów ulega rozproszeniu nie dając wkładu do tej reakcji fotochemicznej. Dlatego też wydajność fotosyntezy jest dużo mniejsza i w rzeczywistości nie przekracza 5%.

Słońce w ciągu roku wysyła w kierunku powierzchni Ziemi energię ok. $1,4 \times 10^{18} \text{ kWh}$, ale tylko połowa z niej dociera, gdyż pozostała część ulega rozproszeniu, odbiciu lub absorpcji w atmosferze. Zaledwie $7 \times 10^{14} \text{ kWh}$ jest wykorzystywane przez organizmy fotosyntetyczne (mniej niż 0,1% całkowitej energii wyemitowanej przez Słońce). Jednakże pozostała energia docierająca do Ziemi nie jest tracona, gdyż napędza ona inne procesy energetyczne na powierzchni naszej planety jak wiatry i prądy oceaniczne.

Obecnie ludzkość stoi przed problemem paliwowym, ponieważ szacuje się, iż dostępne rezerwy paliwowe wystarczą zaledwie na ok. 200 lat zakładając, że zużycie energii będzie utrzymywało się na stałym poziomie. Jednakże konsumpcja energii z pewnością wzrośnie wraz z uprzemysłowieniem krajów rozwijających się i stąd konieczność poszukiwania nowych źródeł energii. Marzeniem jest, aby była to energia bezpieczna, czysta i odnawialna. Odnawialne źródła energii mogłyby być w krótkim czasie uzupełniane. Należą do nich między innymi: woda (siła spadku jak i gradienty temperatury wody), wiatr, biomasa, energia słoneczna i geotermiczna (Rys. 3).

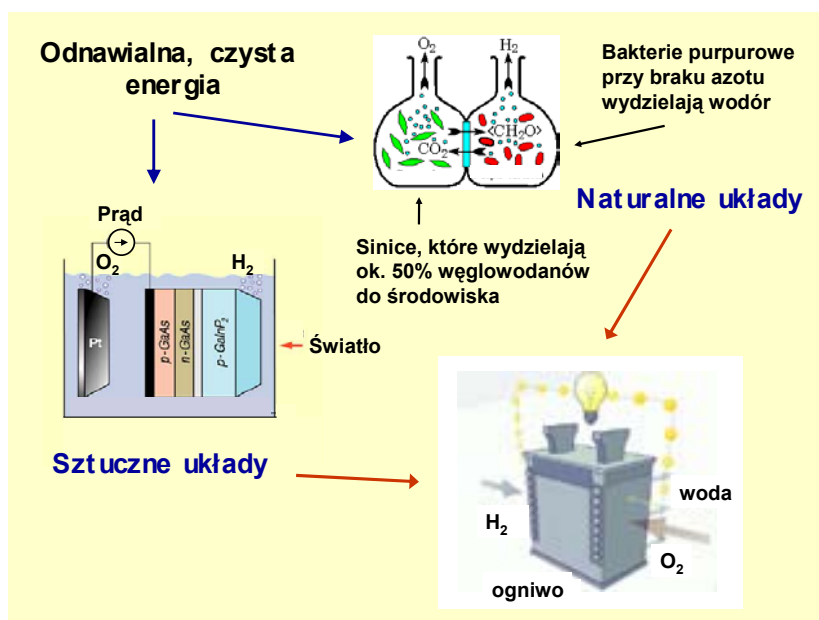


Rys. 3. Naturalne źródła energii

W obliczu kryzysu energetycznego, w ostatnim okresie szczególnie dużo uwagi poświęca się możliwości wykorzystania energii słonecznej i biomasy jako źródeł energii. Prowadzone są prace nad wzrostem wydajności biologicznych źródeł energii przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ich eksploatacji. Szczególnie dynamicznie rozwinęły się badania genetyczne organizmów fotosyntetycznych, mające na celu maksymalne wykorzystanie procesu fotosyntezy na poziomie mo-

lekularnym. Można wyróżnić dwa główne kierunki genetycznych i molekularnych badań: (i) pierwszy z nich koncentruje się na poprawie produkcji biomasy w sposób selektywny, aby uzyskać wzrost wydajności odzysku określonych biopaliw (drewno, olej, alkohol), a (ii) drugi z nich dotyczy budowy ogniw paliwowych w oparciu o poznane mechanizmy fizykochemiczne naturalnie występujące w procesie fotosyntezy.

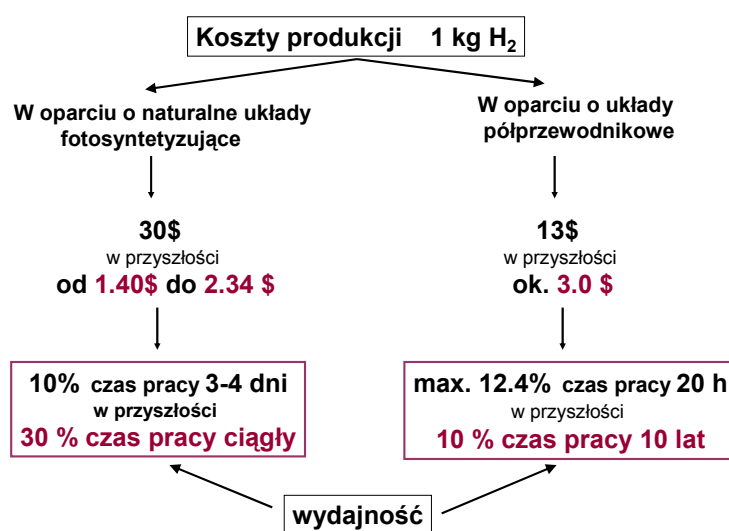
W dalszej części, skoncentrujemy się głównie na wodorze, uważanym obecnie za paliwo przyszłości. Na świecie, wiele grup skupiających specjalistów z różnych dziedzin nauki, między innymi: fizyków, chemików i biologów, pracuje nad tym problemem. Najczystszy sposób produkcji wodoru jest wykorzystanie energii słonecznej do rozszczepienia wody na tlen i wodór. Tego typu proces fotoelektrochemiczny przedstawiony jest na Rys. 4. Ogniwo paliwowe może pracować wykorzystując produkty (O_2 i H_2) powstałe w sztucznych układach półprzewodnikowych, dostępnych już na rynku, lub wytworzone przez naturalne układy fotosyntezy (Rys. 4).



Rys. 4. Naturalne i sztuczne układy zdolne do produkcji H_2

Ogniwo paliwowe jest urządzeniem wykorzystującym tlen i wodór lub paliwo bogate w wodór do wytwarzania prądu. Jeśli użyć czystego H_2 , to ogniwo pali-

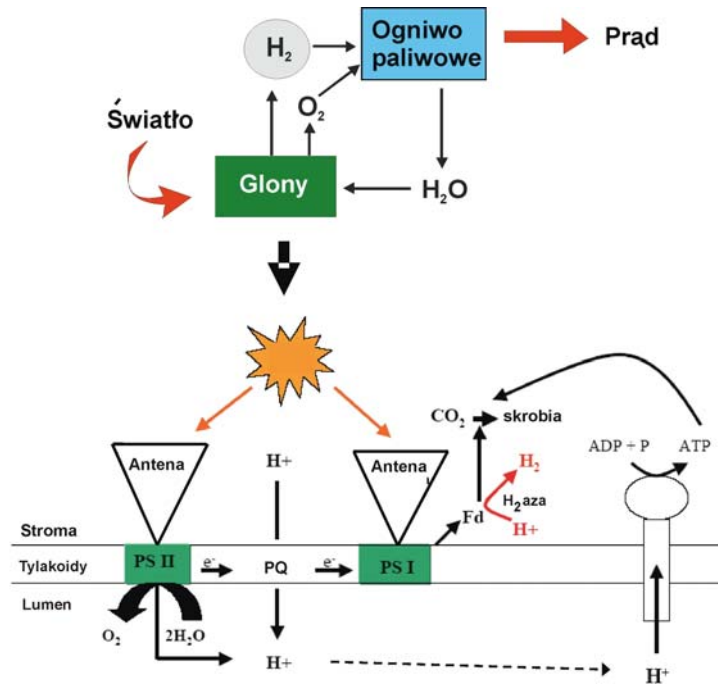
wowe wydziela jedynie ciepło i wodę jako produkt uboczny. Taka produkcja energii w żadnym stopniu nie zanieczyszcza środowiska, a wręcz przeciwnie, jest dla niego przyjazna. Niestety, urządzenia te działające w oparciu o układy półprzewodnikowe są wciąż bardzo drogie, a czas ich pracy zbyt krótki, aby mogły znaleźć powszechne zastosowanie. Układy pracujące w oparciu o organizmy fotosyntetyczne mogłyby być rozwiązaniem tych problemów. Na Rys. 5. zostały przedstawione obecne i przewidywane koszty produkcji wodoru. Z przedstawionego zestawienia jasno wynika, że zarówno koszty jak i wydajność układów naturalnych są znacznie bardziej obiecujące.



Rys. 5. Wydajność i koszty produkcji wodoru

Organizmy fotosyntetyczne produkują wodór z jednoczesnym uwalnianiem tlenu. Jednakże enzym odpowiedzialny za produkcję H₂, zwany hydrogenazą, jest czuły na obecność tlenu. Wzrost stężenia O₂ powoduje zahamowanie wydzielania wodoru. Aby obejść ten problem, podjęto próby skonstruowania mutantów, które byłyby zdolne do produkcji wodoru również w obecności tlenu. Innym rozwiązaniem jest stworzenie takich warunków wzrostu wybranych organizmów fotosyntetycznych, aby można było regulować ich aktywność między fazą wzrostu fotosyntetycznego (wzmoczona produkcja O₂) a fazą produkcji H₂. Za przykład mogą posłużyć niektóre kultury glonów, które wykazują pożądaną zmienną aktywność

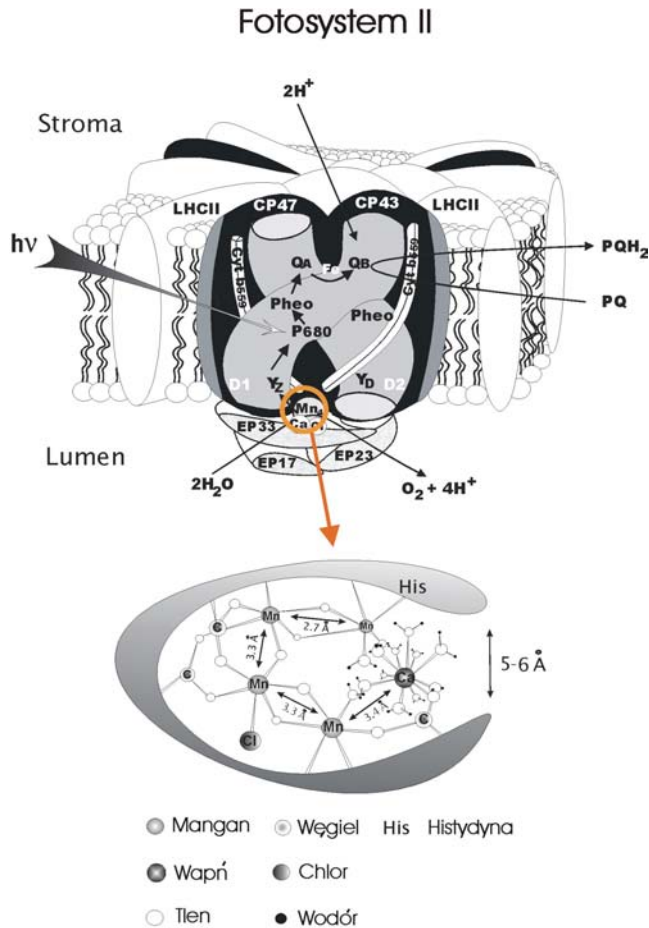
w zależności od koncentracji siarczanów w pożywce. Jak więc widać, istnieje duże spektrum działań fotobiologicznych, które można wykorzystać (Rys. 6).



Rys. 6. Glony mogą zwiększać produkcję tlenu lub wodoru w sposób kontrolowany warunkami zewnętrznymi. (np. dostępność pewnych mikroelementów w pożywce). Komplex rozszczepiający wodę, zlokalizowany w obrębie fotosystemu II po stronie wewnętrznej błony fotosyntetycznej, odpowiedzialny jest za wydzielanie tlenu. Natomiast hydrogenaza (H_2 -aza) produkująca wodór znajduje się za fotosystemem I po zewnętrznej stronie błony

Badania fotosyntezy są również zorientowane w kierunku poznania mechanizmu rozszczepiania wody w obrębie kompleksu wydzielającego tlen, zlokalizowanym na rdzeniu fotosystemu II. Sterowany światłem proces rozszczepiania wody na O_2 i H^+ w warunkach optymalnych osiąga efektywność 100%. Jednakże sztuczny układ, którego prototypem byłby fotosystem II pozostaje wciąż marzeniem wielu naukowców. Wiadomo, że klaster manganowy składający się z 4 atomów Mn i jednego atomu Ca uczestniczy w bezpośrednim procesie utleniania

wody, ale sam mechanizm pobierania H^+ z wody oraz formowanie wiązania $O=O$ pozostaje zagadką (Rys. 7).



Kompleks wydzielający tlen

Rys. 7. Schemat fotosystemu II z zaznaczonymi aktywnymi przekaźnikami elektronowymi (Tyr – tyrozyna, Pheo – feofityna, Q_A – plastochinon związany w tzw. miejscu Q_A , Q_B – plastochinon związany w tzw. miejscu Q_B , P680 – centrum reakcji PSII, cyt b559 – cytochrom b559, Fe – atom żelaza). Pokazano jedną z możliwych konfiguracji kompleksu wydzielającego tlen, zawierającego 4 atomy Mn i jeden atom Ca

Fizycy odgrywają znaczącą rolę w dziedzinie badań fotosyntezy. Różnorodne metody eksperymentalne, takie jak: XANES (spektroskopia absorpcji promieni X), EPR (elektronowy rezonans paramagnetyczny), NMR (magnetyczny rezonans jądrowy), spektroskopia mössbauerowska, spektroskopia fluorescencyjna i absorpcyjna odgrywają ważną rolę w badaniach struktury klastra manganowego, stanów spinowych i walencyjnych aktywnych redoksowo komponent uczestniczących w transporcie elektronów (np.: kompleksy żelaza, tyrozyny). Dogłębne zrozumienie badanych zjawisk fizycznych pozwala na interpretację i opis modelowy fotosyntetycznego transferu energii i elektronów. Teoretyczne analizy są niezwykle pomocne w konstruowaniu sztucznych układów fotosyntetycznych.

Podsumowując, jesteśmy przekonani, że wspólne działania fizyków, biologów, chemików i genetyków pozwolą w niedalekiej przyszłości osiągnąć zamierzony cel, a mianowicie stworzenie technologii pozwalającej na wytwarzanie z dużą wydajnością bezpiecznej i czystej energii.

