

Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika

KATARZYNA BOŻENA GIECZEWSKA

Zakład Biofizyki Instytut Fizyki Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie Marii Curie-Skłodowskiej 5, 20-081 Lublin E-mail: kat.gieczewska@biol.uw.edu.pl

"NAPĘDZANE ŚWIATŁEM" – OD FOTOSYNTEZY DO FOTOOGNIWA

WSTĘP

W 1874 r. w książce *Tajemnicza Wyspa* wizjoner i jeden z pierwszych fantastów, Juliusz Verne, pisał: "Wierzę, że pewnego dnia woda zostanie wykorzystana jako paliwo, a wodór i tlen, z których się składa, użyte razem czy osobno, staną się niewyczerpalnym źródłem ciepła i światła o wydajności, jakiej węgiel nie jest w stanie zapewnić. Wierzę, że gdy zasoby węgla się wyczerpią, powinniśmy opalać i ogrzewać wodą. W przyszłości woda zastąpi węgiel".

Fotosynteza to najważniejszy proces biologiczny, polegający na przetworzeniu energii światła słonecznego na dostępną dla podtrzymania życia energię wiązań chemicznych. Ten niezwykły proces nie tylko ukształtował, w skali geologicznej, znaną nam ziemię, ale i zapewnił pożywienie i większość wykorzystywanych obecnie źródeł energii.

Najbardziej rozpowszechniona forma fotosyntezy związana jest z udziałem cząsteczki barwnika, chlorofilowej lub podobnej, oraz zachodzi poprzez "napędzany" światłem transport elektronów. Zarówno proces przeprowadzany przez organizmy tlenowe, produkujące tlen podczas fotosyntezy (rośliny, glony, sinice), jak i kilka typów bakterii beztlenowych opiera się na tej samej podstawowej zasadzie. Powyższe organizmy przeprowadzają fotosyntezę, w której kluczową cząsteczką jest chlorofil.

Istnieją jednak i takie organizmy, które fotosyntezę przeprowadzają dzięki rodopsynie. Wówczas cały proces jest odmienny od szlaku, w którym uczestnicza chlorofile i związany z izomeryzacją cis-trans cząsteczki przeprowadzającej transport jonów w poprzek błony (LANYI 2004). W zależności od rodzaju rodopsyny, bakteryjnej lub archeonowej, odpowiedzią na bezpośrednie działanie światła może być transport jonów H⁺ (bakteriorodopsyna) lub Cl⁻ (halorodopsyna); nie znany jest dotychczas żaden łańcuch transportu elektronów w tych systemach. Przez wiele lat taki typ fotosyntezy znany był tylko u ekstremofili żyjacych w wysoce zasolonym środowisku, był zatem zaniedbywalny w procentowym udziale ogółu fotosyntezy. W 2010 r. opisano jednak nową formę bakteriorodopsyny, zwaną proteorodopsyną, występującą u morskich proteobakterii, tej samej grupy, w której skład wchodzą purpurowe bakterie fotosyntetyzujące (DELONG i BEJA 2010). Obecnie szacuje się, że proces ten stanowi 5% ogółu procesów fotosyntetycznych.

Słowa kluczowe: fotosynteza, sztuczna fotosynteza, ogniwo fotoelektrochemiczne, fotosyntetyczny transport elektronów

ENERGIA ŚWIETLNA

Słońce, najbliższa nam gwiazda, emituje szerokie spektrum promieniowania elektromagnetycznego, od promieni gamma do fal radiowych. Światło widzialne (400-700 nm) dla organizmów zawierających chlorofil określa się mianem światła fotosyntetycznie czynnego (ang. photosynthetically active radiation, PAR). Światło słoneczne docierając do powierzchni Ziemi ulega rozproszeniu lub absorbcji, np. na cząsteczkach wody czy dwutlenku węgla w atmosferze (powyższe absorbują podczerwień) oraz ozonu (absorbcja ultrafioletu). Skład widma światła widzialnego oczywiście zależy również od ośrodka, przez który światło przenika; i tak np. w systemach wodnych wraz z głębokością absorbcji ulega światło czerwone, rozproszeniu niebieskie, pozostaje zaś zielone (FALKOWSKI i współaut. 2004), które wychwytywane jest przez specyficzne barwniki fotosyntetyczne, np. fukoksantynę lub perydyninę. Na głębokości poniżej 100 m światło jest za słabe, by fotosynteza mogła zajść.

UMIEJSCOWIENIE PROCESU

U wszystkich organizmów fotosyntetyzujących we wczesnych etapach procesu niezbędna jest błona fotosyntetyczna, dwuwarstwa, lipidowa zawierająca błonowe kompleksy barwnikowo-białkowe. Późniejszym stadiom, które przebiegają w wolniejszej skali czasu (milisekundowej) wystarczają białka rozpuszczalne w wodzie.

fotosyntetyzujących eukariontów U podstawowym organellum związanym z procesem fotosyntezy jest chloroplast. To semiautonomiczne organellum, powstałe na drodze endosymbiozy, posiada własny genom i rybosomy, choć część informacji genetycznej została przeniesiona do jądra komórkowego. Chloroplast otoczony jest podwójną błoną zwaną otoczką, wewnątrz zawierając skomplikowany układ błon fotosyntetycznych uorganizowanych w ścieśnione struktury gran i łączące je lamelle stromy. Błony gran są ściśle upakowane; w adaptowanej do ciemności Arabidopsis thaliana grubość błon to 4 nm, światło tylakoidów, lumen to 4,7 nm, a odległość między poszczególnymi dyskami 3,6 nm (PRIBIL i współaut. 2014).

To w systemie błon tylakoidów zachodzi zależna od światła faza fotosyntezy, zaś w macierzy, stromie chloroplastu, reakcje fazy niezależnej od światła, tzw. cyklu Calvina-Bensona, zatem znajdują się w niej odpowiednie enzymy metabolizmu węgla.

Proces fotosyntezy można podzielić na 4 zasadnicze fazy: (i) absorbcję światła oraz dostarczenie, przez układy antenowe,



Ryc. 1. Schemat absorpcji światła fotosyntetycznie czynnego (wg BLANKENSHIP 2014).

energii wzbudzenia do centrum aktywnego fotoukładów (ang. reaction center, RC) (Ryc. 1), (ii) pierwotny transport elektronów w centrach reakcji, (iii) ustabilizowanie potencjału układu poprzez procesy drugorzedowe (m.in. transport protonów w poprzek błony fotosyntetycznej i wytworzenie siły protonomotorycznej) oraz (iv) syntezę i eksport stabilnego produktu. Książkowo, trzy pierwsze fazy określa się mianem fazy świetlnej, ostatnią fazę - niezależną od światła. Obydwie jednak zazwyczaj przebiegają jednocześnie i obydwie regulowane są przez światło, mimo że zależność bezpośrednia dotyczy jedynie wychwytu kwantów światła przez anteny układów.

BARWNIKI FOTOSYNTETYCZNE I UKŁADY ANTENOWE

Po raz pierwszy słowa "chlorofil" użyli Pelletier i Caventou w 1818 r., opisując zielony barwnik zaangażowany w proces fotosyntezy. Trzy Nagrody Nobla związane są z badaniami nad tą cząsteczką otrzymali: (i) w 1915 r. Richard Wilstätter za określenie pierwotnej struktury i m.in. obecności magnezu w cząsteczce, (ii) w 1930 r. Hans Fischer za określenie szczegółowej budowy cząsteczki chlorofilu oraz opracowanie systematyki związków pirolowych i (iii) w 1965 r. Robert Woodward za opracowanie szlaku syntezy chlorofilu. Obecnie odkryto kilka rodzajów cząsteczek chlorofilowych (Chl) nazwanych kolejno od *a* do *f*.

Chlorofil a ($C_{55}H_{72}N_4O_5Mg$), to cząsteczka o wymiarach prawie 10 na 10 Å (1 Å = 0,1 nm). Centralny atom magnezu jest koordynowany przez cztery atomy azotu pierścienia tertrapirolowego, oprócz tego cząsteczka chlorofilu ma długi łańcuch fitolowy, powstały z kondensacji czterech pięcioweglowych jednostek izoprenowych. Chemicznie cząsteczka chlorofilu podobna jest do porfiryn. W chloroplastach roślin lądowych oraz u ramienicowych i zielenic występują dwa typy chlorofilu: Chla i Chlb, różniące się własnościami spektralnymi. Chlorofil a występuje właściwie u wszystkich eukariotycznych organizmów fotosyntetyzujących oraz u prokariotycznych cjanobakterii. Chlorofil b różni się od Chla tylko jednym podstawnikiem przy siódmym atomie węgla pierścienia tetrapirolowego; grupa aldehydowa zastępuje w tym wypadku grupę metylową. To wystarczy by przesunąć maksimum absorbcji cząsteczki w kierunku krótszych fal (patrz Ryc. 5). Chlorofil b jest głównym składnikiem kompleksów antenowych, nie występuje natomiast w składzie fotosyntetycznych centrów reakcji.

Własności spektroskopowe chlorofili są podobne. Widma absorbcji zawierają po dwa maksima absorbcji: jedno w zakresie światła niebieskiego lub bliskiego ultrafioletu (pasmo Soreta), drugie w zakresie światła czerwonego lub bliskiej podczerwieni (Q) (patrz Ryc. 5). Absorbcja w pasmie niebieskim wymusza przejście cząsteczki w drugi stan wzbudzony, który bardzo szybko (ps) oddaje energię i przechodzi w niższy stan wzbudzenia (pasmo Q). Ten niższy stan "żyje" dłużej (ns) i on właśnie wykorzystywany jest bezpośrednio w procesie fotosyntezy (BLANKENSHIP 2014).

Niezaprzeczalnie ważną grupę barwników fotosyntetycznych stanowią karotenoidy: żółte, pomarańczowe lub czerwone tetraterpeny (również zbudowane z podjednostek izoprenowych, o dwóch pierścieniach cykloheksylowych połączonych długim łańcuchem węglowym). Spektralnie uzupełniają one fotosyntetyczny zakres absorbcji wchodząc w skład anten fotosyntetycznych (patrz Ryc. 5). Poza tym, mają szereg innych funkcji: pełnią rolę fotoprotektantów (wygaszają tripletowe stany wzbudzone chlorofilu mogące prowadzić do powstania reaktywnych form tlenu), wygaszają nadmiar energii wzbudzenia w tzw. cyklu ksantofilowym zabezpieczając przed uszkodzeniem fotoukładów, zmiatają wolne rodniki tlenowe, wpływają na płynność i strukturę błon fotosyntetycznych. Karotenoidy ze względu na swą budowę, a w szczególności oddalenie pierścieni cykloheksylowych mają niezwykłe własności energetyczne, mianowicie, wzbudzone wchodzą natychmiast w drugi stan wzbudzony (z S_0 do S_2), stan pierwszy jest niedozwolony (S_1). Następnie zachodzi szybkie wytracenie energii do S₁ i, najczęściej bezpromieniste, do stanu podstawowego (BLANKENSHIP 2014).

Właściwości spektralne wszystkich barwników zmieniają się po ich związaniu w kompleksach białkowych. Istnieją dwa główne typy anten zbierających energię: wewnętrzne, sprzężone z centrami fotosyntetycznymi, i zewnętrzne, mogące się swobodnie przemieszczać w błonie chloroplastowej. Anteny te zwane LHC (ang. light-harvesting complex) opiszę bardziej szczegółowo przy budowie poszczególnych kompleksów.

PIERWOTNY TRANSPORT ELEKTRONÓW W CENTRACH REAKCJI

Centrum reakcji to wieloskładnikowy układ białkowy zanurzony w błonie fotosyntetycznej, mający w składzie barwniki: chlorofil/bakteriochlorofil, karotenoidy oraz kofaktory, takie jak chinony, czy centra żelazosiarkowe, które niezbędne są w transporcie elektronów. Centrum reakcji zawiera parę chlorofili określaną jako pierwotny donor



Ryc. 2. Ogólny schemat transportu elektronów w fotosyntetycznym centrum reakcji (wg BLAN-KENSHIP 2014).

Chl, cząsteczka chlorofilu; D, donor; A, akceptor.

elektronów. Cząsteczki te, choć chemicznie tożsame z cząsteczkami chlorofili antenowych, to jednak ze względu na odmienne otoczenie białkowe mogą przejść w wyższy stan wzbudzenia z wybiciem elektronu. Chlorofil w centrum reakcji przechodzi na wyższy stan wzbudzenia elektronowego dzięki bezpośredniej absorpcji fotonu lub, częściej, dzięki energii dostarczonej z anten fotosyntetycznych. Stan wzbudzenia jest nietrwały i szybko dochodzi do przekazania elektronu na najbliższy akceptor (A) (Ryc. 2), z wygenerowaniem stanu przejściowego Chl+A-(para jonowa). To właśnie jest pierwotna reakcja fotosyntetyczna, gdy energia świetlna przekształcona jest do chemicznego potencjału redukcyjnego. Jeśli elektron zostanie z powrotem przeniesiony z A- na Chl+, mówi się o procesie rekombinacji i utracie nadmiaru energii w postaci ciepła. By temu zapobiec, istnieje szereg niezwykle szybkich reakcji wtórnych (ang. secondary reactions), które konkurują z procesem rekombinacji. Reakcje te, znajdujące się po stronie akceptorowej fotoukładu, z powodzeniem separują dodatni i ujemny ładunek pary jonowej.

Efektem końcowym, zachodzącym w czasie krótszym niż nanosekunda, jest oddzielenie (separacja) (ang. charge separation) oksydoredukujących cząstek prawie o grubość błony biologicznej (ok. 30 Å). Dzięki takiej separacji późniejsze, wolniejsze procesy mają możliwość ustabilizowania oraz przekształcenia energii w bardziej użyteczną formę. System ten, mimo swej prostoty, jest tak efektywny, że w większości przypadków fotochemiczna wydajność kwantowa w przeliczeniu na użyty foton na produkt wynosi prawie 1.0.



Ryc. 3. Schemat Z fotosyntezy obrazujący zmiany potencjału redukcyjnego poszczególnych komponentów procesu (wg BLANKENSHIP 2014).

P680, specjalna para chlorofili fotoukładu II; Phe – feofityna; Q_A , Q_B , cząsteczki plastochinonu związane z białkami PSII; PQ, pula plastochinonu błony tylakoidów; Cyt b₆f, kompleks cytochromowy b₆f; PC, plastocyjanina; P700, specjalna para chlorofili fotoukładu I; A₀, cząsteczka chlorofilu; A₁, filochinon; Fe-S_x, Fe-S_A, Fe-S_B, centra żelazowo-siarkowe; Fd, ferredoksyna; FNR, reduktaza ferredoksyna-NADP. Linią przerywaną zaznaczono potencjalną drogę transportu, charakteryzującą cykliczny transport elektronów wokół PSI (nie opisany). Istotą procesu fotosyntetycznego gromadzenia energii jest transfer elektronu ze wzbudzonego chlorofilu antenowego na cząsteczkę chlorofilu znajdującą się w tzw. centrum reakcji.

Organizmy tlenowe, w tym rośliny rzecz jasna, posiadają dwa centra reakcji fotochemicznych, dwa układy fotosyntetyczne, w których zachodzi liniowy transport elektronów (ang. non-cyclic electron transfer chain). Fotosystem II, dzięki kompleksowi rozkładającemu wodę, uzupełnia brak wyemitowanych elektronów, jednocześnie uwalniając tlen cząsteczkowy jako produkt uboczny reakcji fotochemicznych. Wyrzucony elektron transportowany jest na pule plastochinonu (Ryc. 3), dalej na kompleks cytochromowy b₆f i fotosystem I (PSI), gdzie redukuje, dokujący do fotosystemu, akceptor elektronów NADP+ do NADPH. W trakcie transportu elektronów przez błonę fotosyntetyczną, dzięki przemieszczaniu się jonów wodorowych, wytwarzany jest ich gradient stanowiący siłę protonomotoryczną używaną przez syntazę ATP do wytwarzania ATP.

Szybkość pierwotnych procesów fotosyntezy ma rozległą rozpiętość. Cała kaskada reakcji, czyli: absorbcja światła przez odpowiednie barwniki, transfer energii w obrębie anten fotosyntetycznych, transport elektronów w obrębie i pomiędzy fotosystemami, transport protonów, synteza ATP, asymilacja węgla i eksport stabilnego produktu, odbywa się w czasie od femtosekund (10⁻¹⁵) przez pikosekundy (10⁻¹²), nanosekundy (10⁻⁹), mikrosekundy (10-6), milisekundy (10-3) do nawet sekund. Reakcje fotochemiczne to rząd femto- i nanosekund, reakcje biochemiczne to rząd mikrosekund do sekund. Fotosynteza to również proces biochemiczny o największym zakresie zmiany potencjału oksydoredukcyjnego; oksydacja wody przez fotosystem II to potencjał +0,8V, a ferredoksyna w PSI -0,7V. Operowanie w tak skrajnych środowiskach redukcyjnych wymaga mechanizmów zabezpieczających przed uszkodzeniami, np. wywołanymi przez reaktywne formy tlenu, m.in. tlen singletowy.

FOTOSYSTEMY

Opisany wcześniej transport elektronów poprzez przekaźniki zachodzi dzięki ich umiejscowieniu w matrycach białkowych. Pierwszy układ fotosyntetyczny (PSI) u roślin to 650 kDa kompleks białkowo-barwnikowy zawierający 18 podjednostek i ponad 200 grup prostetycznych. Donory układu, plastocyjanina i cytochrom c553, wiążą się z PSI dzięki oddziaływaniom hydrofobowym z podjednostkami PsaA oraz PsaB i dzięki oddziaływaniu elektrostatycznemu z N-końcowym odcinkiem podjednostki PsaF. Ostatnio opublikowana analiza struktury krystalicznej monomeru PSI-LHCI opisuje 17 podjednostek białkowych zawierających 45 domen transblonowych, zawierających 158 cząsteczek chlorofili, 28 karotenoidów, 2 cząsteczki filochinonów, 8 cząsteczek lipidów i 3 centra Fe₄S₄. Dwie największe podjednostki centrum reakcji kompleksu, PsaA i PsaB, tworzą funkcjonalny heterodimer o 22 helisach transbłonowych. Skupia on wiekszość kofaktorów drogi przekazywania elektronów od specjalnej pary chlorofili P700, do pierwszej kieszeni Fe_4S_4 zwanej Fx. To jakby serce układu. To właśnie centralny heterodimer koordynuje ponad 80 cząsteczek chlorofilu działających jak wewnętrzne anteny zbierające światło. Stromalna podjednostka PsaC zawiera dwie terminalne kieszenie $Fe_{A}S_{A}$ i wraz z podjednostkami PsaD i PsaE uczestniczy w dokowaniu stromalnego akceptora elektronów, ferredoksyny. PsaF bierze udział w wiązaniu obecnego w lumen chloroplastowym donora elektronów, plastocyjaniny, i może uczestniczyć w przekazywaniu energii wzbudzenia z LHCI do rdzenia kompleksu (NELSON i JUNGE 2015). Podjednostka PsaG pośredniczy w kotwiczeniu anten LHCI. PsaJ odpowiada za stabilność i formowanie się kompleksu PSI. PsaH, PsaI wraz z PsaL tworzą domeny oddziałujące z LHCII w czasie tzw. state transition (redystrybucja energii wzbudzenia pomiędzy fotosystemami). PsaH dodatkowo przeciwdziała tworzeniu się trimerów (Amunts i Nelson 2009).

Anteny fotosyntetycznie związane z PSI (LHCI) składają się z produktów czterech genów jądrowych (*Lhca1-4*), które formują dwa dimery pasa o kształcie księżyca/rogala przylegającego do centralnej części PsaF. Pas ten ma około 180 kDa, co stanowi 30% kompleksu (całość PSI ok. 650 kDa). Białka antenowe PSI należą do rodziny białek wiążących chlorofil *a/b*. Samo wiązanie pomiędzy białkami Lhca nie opiera się na oddziaływaniach

poszczególnych helis, ale konformacji głowaogon, która optymalizuje liczbę cząsteczek chlorofili gotowych do oddziaływania z centrum układu.

Anteny fotosystemu II, LHCII, to jedno z najliczniej występujących białek na Ziemi. LHCII może być oczywiście związane z fotosystemem II, jak również w znacznej ilości występować swobodnie w błonie tylakoidów czy wreszcie łączyć się nietrwale z fotosystemem I. W błonach fotosyntentycznych LHCII może występować jako monomer zawierający ok. 12 cząsteczek chlorofilu lub jako trimer. Dzięki ukierunkowanej mutagenezie wiadomo, że pięć miejsc wiązania chlorofilu okupuje chlorofil a, trzy chlorofil b, a cztery kolejne mogą wiązać obydwie cząsteczki chlorofilu. Spektroskopowy i czynnościowy obraz anten LHCII jest więc złożony i może być bardzo zmienny. Wolne kompleksy antenowe zebraną energię mogą rozpraszać na drodze ciepła lub wygaszania niefotochemicznego.

Gęsto rozmieszczone w błonie fotosyntetycznej kompleksy antenowe pochłaniają, a następnie przenoszą energię wzbudzenia do centrum fotoukładu. Dzieje się tak na zasadzie sprzężenia elektrodynamicznego między barwnikami poszczególnych kompleksów.

Centrum reakcji fotosystemu II, składające się z heterodimeru D1/D2 i cytochromu b_{559} , jest niezwykle podobne do centrum reakcji bakterii purpurowych. Monomer PSII zawiera jeszcze przynajmniej jeden trimer LHCII, monomer CP26, monomer CP29, ogółem około 95 chlorofili i 30 karotenoidów na centrum reakcji (NELSON i JUNGE 2015).

Dimer PSII zawiera 19 podjednostek peptydowych na monomer, z których 16 to podjednostki transbłonowe, a 3 błonowopowierzchniowe uczestniczące w rozkładzie wody. Jak wspomniano, w centrum kompleksu znajdują się białka D1 i D2 wiążące większość kofaktorów, po bokach znajdują się anteny CP47 i CP43 wiążące odpowiednio 16 i 13 cząsteczek chlorofili (SHEN 2015).

Ponadto opisano 12 mniejszych podjednostek, co daje razem 35 helis transbłonowych na monomer PSII. Szczególną funkcję wykazują trzy skrajne, hydrofilowe podjednostki: PsbO, PsbU i PsbV, które zlokalizowane po stronie lumen, wraz z zewnętrznymi pętlami polipeptydów D1, D2, CP43 i CP47, tworzą ochronę dla kompleksu rozkładającego wodę, ściślej, dla kieszeni Mn_4CaO_5 , oddzielając ją od roztworu lumen (SHEN 2015). Każdy monomer PSII zawiera 35 cząsteczek chlorofili, 2 feofityny, 11 β-karotenów, 2 plastochinony, jon wodorowęglanowy, 1 cytochrom typu b i jeden typu c, atom żelaza, ponad 20 cząsteczek lipidów, 2 jony chloru, kieszeń Mn_4CaO_5 oraz inne komponenty.

Kompleks rozszczepiający wodę (ang. oxygen evolving complex, OEC), PSII, jest unikatowy, gdyż jako jedyny enzym jest w stanie przeprowadzić czteroelektronową oksydację dwóch cząsteczek wody do tlenu cząsteczkowego, O2. Ważny udział w całym procesie rozkładu wody ma reszta tyrozyny Y₂ znajdującej się w miejscu 161 łańcucha aminokwasowego białka D1. Tyrozyna ta może ulec szybkiemu utlenieniu przez P680⁺ (~ 20-200 ns) (MCCONNELL i współaut. 2010). Zapobiega to rekombinacji pierwotnego rozdziału ładunku (and. recombination of primary charge separation). Tyrozyna Y związana jest z histydyną, która z kolei jest akceptorem protonu pochodzącego z utleniania Y_z . Forma Y_z jest potężnym utleniaczem. Utlenienie OEC redukuje Y_z , następuje regeneracja Y_z protonem przekazanym wcześniej na histydynę. Mechanizm ten nazwano związanym z protonem transportem elektronów (ang. proton coupled electron transfer, PCET). Fizycznie tyrozyna ta znajduje się w odległości około 7 Å od centrum OEC i stanowi pomost między kieszenią manganową a centrum reakcji P680 PSII. Takie przestrzenne rozdzielenie obydwu centrów reakcji zapobiega zmianie kierunku w transporcie elektronów pomiędzy PSII i OEC.

Jony manganu w OEC tworzą hipotetyczne miejsce wiązania dla wody jako substratu. OEC katalizuje powstanie podwójnego wiązania pomiędzy tlenem molekularnym O=O. Właściwy mechanizm nie jest do końca poznany, postuluje się istnienie stanów przejściowych, w których Mn^{IV}=O lub Mn^{IV-} -O' przeprowadza atak nukleofilowy przez cząsteczkę wody. Stany przejściowe wydają się niezbędne, jako że cały proces wymaga usunięcia z cząsteczki wody czterech elektronów, by uwolnić jedną cząsteczkę tlenu. Fotochemia centrum reakcji OEC umożliwia "przetwarzanie" tylko jednego elektronu na raz. Istnieje zatem pięć pośrednich stanów utlenienia w cyklu katalizowanym przez OEC, oznacza się je S-stanami, ściślej Sn, gdzie n=0-4. PSII adaptowany do ciemności posiada w większości OEC na S₁ stopniu utlenienia. Wszystkie S-stany charakteryzują się długimi czasami życia, µs-ms w warunkach światła wysycającego. Utlenienie stanu S₃ przez tyrozynę Y₂, prowadzi

do przejścia w stan S₄, który ulega spontanicznemu zanikowi do S₀ wraz z formowaniem O_2 . Potecjały poszczególnych przejść to 1,11V dla S_1/S_2 , 1,14V dla S_3/S_4 , 1,2V dla $S_3 Y_z / S_3 Y_z$ i 1,07V dla S_4 / S_0 (McConnell i

współaut. 2010). Są one niezwykle blisko siebie, co nie jest typowe dla pojedynczego centrum reakcji redoks i umożliwia dzięki PCET utlenianie sekwencyjne i pokonywanie barier energetycznych.

CZY MOŻNA LEPIEJ?

Dziwnym wydaje się szeroko rozpowszechnione przekonanie, że roślinnej fotosyntezy usprawnić już nie sposób, jako że ewolucyjnie jest ona już odpowiednio wydajna. Nic bardziej mylnego (Ryc. 4). Należy pamiętać, że roślinna fotosynteza powstała w królestwie prokariontów, czyli w warunkach niskiego oświetlenia i przy niskiej zawartości tlenu. W rezultacie rośliny mają fotosystem II, który łatwo ulega uszkodzeniu przez nadmiar swojego substratu, czyli światła (MURA-TA i współaut. 2012). By uniknąć uszkodzeń spowodowanych światłem istnieją mechanizmy fotoprotekcyjne mające na celu rozproszenie nadmiaru energii np. w postaci ciepła, które, zyskując na czasie, pozwalają na szybką naprawę uszkodzonych podjednostek PSII. Mechanizmy te, gdyby proces przeprowadzać in vitro w warunkach laboratoryjnych, powodowałyby straty energetyczne. Ewolucyjne przystosowanie do intensywniejszego oświetlenia na lądzie skutkowało u roślin zastąpieniem sinicowych fikobilisomów przez anteny zbierające światło (LHC). Jak na ironię niektóre rośliny zmuszone zostały do powtórnych zmian adaptacyjnych i przystosowania do warunków niskiego światła, np. w niższych partiach lasów. Zmiany te miały na celu zwiększenie absorbcji światła, m.in. dzięki większemu upakowaniu błon fotosyntetycznych w stosy gran. Czy jednak jest to wydajniejsza strategia niż zachowanie oryginalnych fikobilisomów, nie wiadomo. Kolejna potencjalna "wada" całego systemu to możliwości kataliczne najważniejszego enzymu fazy niezależnej od światła, karboksylazy/ oksygenazy rybulozo-1,5-bisfosforanu (ang. ribulose bisphosphate carboxylase-oxygenase, RuBisCo). Enzym ten może zarówno wiązać dwutlenek węgla (prawidłowy przebieg procesu), jak i tlen, prowadząc do poważnych strat energetycznych i obniżenia wydajności całego procesu fotosyntezy.

Możliwe jest usprawnienie mechaniwygaszania fotochemicznego zmów, np. (wygaszania stanów wzbudzonych chlorofilu na drodze reakcji fotosyntetycznych), poprzez hodowlę odpowiednich krzyżówek

podejście i cele modyfikacji	praca
metody klasycznej hodowli	
NPQ - wygaszanie niefotochemiczne	Jung i Niyogi 2009
fotoinhibicja PSII	JANSEN i współaut. 2010
nieznany regulator fotosyntezy	FUЛMOTO i współaut. 2012
inżyniera genetyczna	
modyfikacja/wymiana anten LHC	przegląd w BLANKENSHIP i współaut. 2011
nadeksperesja endogennych lub heterologicznych białek	CHIDA i współaut. 2007, PESARESI i współaut. 2009
zahamowanie rozpraszających energię procesów regulatorowych	PRIBIL i współaut. 2010
biologia syntetyczna	
przeprojektowanie wrażliwych na światło podjednostek fotosyster jednopodjednostkowe fotosystemy	nów

barwniki wprowadzane przez syntetyczne aminokwasy

przegląd w LEISTER 2012

Ryc. 4. Przegląd dróg stosowanych w celu optymalizacji fotosyntezy (wg LEISTER 2012, zmieniona).

gatunkowych lub odmianowych (FUJIMOTO i współaut. 2012). Natomiast dzięki inżynierii genetycznej okazało się, że nadekspresja plastocyjaniny (PESARESI i współaut. 2009) lub jej substytutu glonowego (cytochromu c_6) zwiększa biomasę *Arabidopsis thaliana* (CHI-DA i współaut. 2007). Podobnie, zwiększenie poziomu fosforylacji białek tylakoidowych poprzez wyłączenie tylakoidowej fosfatazy TAP38, zwiększa fotosyntetyczny transport elektronów w warunkach niskiego natężenia światła (PRIBIL i współaut. 2010). Biologia syntetyczna zajmuje się możliwym zastosowaniem, projektowaniem od nowa ulepszonej wersji fotosystemów, fotostabilnej, nie produkującej wolnych rodników o możliwie prostej budowie (LEISTER 2012).

SZTUCZNA FOTOSYNTEZA – Z NATURY DO LABORATORIUM

Naturalna fotosynteza polega na absorbcji energii świetlnej przez kompleksy antenowe, a następnie na separacji ładunku przez centra reakcji fotosystemów. Ogniwa słoneczne uczulane barwnikiem (ang. dye-sensitized solar cells, DSSC) działają dzięki podobnemu mechanizmowi (MCCONNELL i współaut. 2010). Ogniwo takie musi zostać sprzęgnięte z wieloelektronowym katalizatorem, który będzie przeprowadzał oksydację cząsteczek wody w celu produkcji wodoru. Taki układ musi być w stanie przechować/kompensować zredukowane i utlenione ekwiwalenty i produkować paliwo na zasadzie oksydacji wody i redukcji CO₂.

Poprzez naśladowanie (mimetykę) naturalnego procesu fotosyntezy układ sztuczny może się składać z części zbierającej światło (pełniącej funkcję anten), centrum reakcji dla rozdziału ładunku i katalizatora przeprowadzającego produkcję "paliwa słonecznego". Wszystkie te części muszą ze sobą współgrać oraz być zorganizowane w czasie, miejscu i potencjale energetycznym odpowiednim dla szybkiego i efektywnego zachodzenia reakcji fotochemicznych.

JEDNOSTKI ANTENOWE

Najczęściej wykorzystuje się jednostki chromoforowe, barwniki, jak porfiryny, ftalocyjaniny (blisko spokrewnione z pochodnymi chlorofilowymi), koordynanty z metalami (cechujące się przeniesieniem ładunku w parze metal-ligand) używane jako fotouczulacze



Ryc. 5. Schemat absorbcji światła w procesie fotosyntezy i w układach sztucznych (wg McCon-NELL i współaut. 2010, zmieniona).

dla poszczególnych centrów reakcji. Würtner i współpracownicy użyli tworu dwuchromoforowego złożonego z barwnika NBI dwuimidu błękitu naftalenowego (ang. blue naphthalene bisimide) na obrzeżach agregatów ZnCl (ROGER i współaut. 2006). Jako składnik modelowy bakteriochlorofilu c ZnCl absorbuje światło niebieskie i czerwone (Ryc. 5), z dodatkiem NBI jest w stanie absorbować również zieloną część spektrum (Rys. 5). Możliwe jest również stworzenie zielonego barwnika niezwykle spektralnie podobnego do np. chlorofilu a. Taki sztuczny barwnik oparty na perylenie, ulega łatwej funkcjonalizacji i może służyć do budowy szeregu biomimetycznych układów donor-akceptor (GIAIMO i współaut. 2002). Wykazano, że wielocząsteczkowe układy zbierające energię można skonstruować z samoporządkujących się chromoforowych "klocków" zarówno w roztworze, jak na powierzchni nośnika (GUN-DERSON i współaut. 2012).

Gdy centrum reakcji otoczone jest przez dużą liczbę anten, niektóre z nich absorbować mogą z RC przypadkowe fotony, a co za tym idzie, po wzbudzeniu przekazywać energię do centrum reakcji zanim nadmiar energii ulec zdoła promienistemu lub bezpromienistemu rozproszeniu. Stąd pomysł na drzewiasto rozgałęzione chromofory, działające na zasadzie kaskady energetycznej, jednocześnie mogące oddziaływać ze sobą grupami funkcyjnymi. Większość z nich zbudowana jest z porfiryn lub nawet z układów hybrydowych metali z cząstkami organicznymi (McConnell i współaut. 2010). Należy pamiętać jednak, że nie zawsze więcej znaczy lepiej. W układach naturalnych okazuje się, że zmniejszenie wielkości anten zwiększa wydajność fotosyntezy (MELIS 2009).

SEPARACJA ŁADUNKÓW

Model minimum dla współgrania układu donor-akceptor to diada molekularna, zespół kowalencyjnie związanych porfiryny i chinonu, tzw. system P–Q (ang. porphyrin-quinone). Tak prosty system służyć może zrozumieniu podstawowych aspektów fotosyntezy, nie jest w stanie jednak utrzymać rozdziału ładunków wystarczająco długo, na tyle, by mógł być używany w sztucznych ogniwach (zaledwie ≥ 200 ps). Bardziej użyteczne wydają się układy triadowe, np. triada fotouczulacza porfirynowego (P) połączonego z jednej strony z karotenoidowym donorem elektronów (Car), a z drugiej z chinonowym akceptorem (Q). W tej triadzie fotowzbudzenie porfiryny doprowadza do powstania stanu singletowego Car-1P*-Q, który zanika sekwencyjnie w dwóch krokach, prowadząc do powstania Car^{*+}-P-Q^{*-}, stanu, którego czas życia wynosi już µs (Ryc. 6). Rekombinacja ładunku jest zwolniona głównie ze względu na pozycje neutralnej porfiryny. Inne propozycje, to m.in. nanostruktury zbudowane z porfiryny i fulerenów (FUKUZUMI i KOJIMA 2008).

W układach donor-akceptor ważne jest nie tylko ułożenie przestrzenne podjednostek, ale również środowisko układu (np. rozpuszczalnik) oraz temperatura.



Ryc. 6. Schemat indukowanego światłem transportu elektronów w różnych układach sztucznych (wg McConnell i współaut. 2010, zmieniona).

DSSC, ogniwo słoneczne uczulane barwnikiem; CB, pasmo przewodnictwa; VB, pasmo walencyjne półprzewodnika; D, donor elektronów; C, chromofor; A, akceptor elektronów; N3, barwnik oparty na rutenie; Ox, katalizator rozkładu wody.

KATALIZATORY

By stworzyć układ zdolny do rozkładu wody i produkcji wodoru niezbędne jest, by miał on możliwość do utrzymania wysokiego potencjału oksydoredukcyjnego. Głównie wykorzystuje się tu kompleksy metali przejściowych rutenu (Ru), manganu (Mn) i irydu (Ir). Z kolei kompleksy rutenu, renu (Re), kobaltu (Co) i niklu (Ni) używane są w ogniwach fotochemicznie redukujących CO₂ (MCCONNELL i współaut. 2010).

Reakcja oksydacji wody wymaga akumulacji czterech ekwiwalentów utleniających zgodnie z reakcją:

$$2H_2O + 4hv$$
 $O_2 + 4H^+ + 4e^-$

Pierwszym katalizatorem syntetycznym był opracowany w 1982 r. niebieski dimer *cis,cis*-[(bpy),(H₂O)Ru^{III}ORu^{III}(H₂O)(bpy),]⁴⁺.

Cząsteczka ta umożliwia jednoczesny transport elektronów i protonów, co powoduje nagromadzenie utlenionych ekwiwalentów w centrum reakcji Ru-O-Ru. Oczywiście powstały też sztuczne kompleksy manganowe, wzorowane na naturalnym OEC (MCCONNELL i współaut. 2010). Kompletny, sztuczny fotoukład byłby najbardziej uniwersalny, gdyby opracować odpowiednie części budulcowe, cegiełki, które można by aranżować według uznania i potrzeb. Zastępując np. centrum P680 kompleksem [Ru(bpy)₃]²⁺, OEC, sztucznym dimerem manganowym. Indukowany światłem transfer elektronów z dimeru manganowego Mn(II,II) na fotoutlenione centrum Ru skutkowałoby utworzeniem kompleksu Mn(III,IV), który zdolny jest do rozkładu wody.

OGNIWA FOTOELEKTROCHEMICZNE

DSSC opracowano w celu zastąpienia nimi drogich ogniw fotowoltaicznych. Charakteryzują się wydajnością około 11% z użyciem tzw. czerwonego barwnika N3 ([Ru- $L_2(NCS)^2]^{2+}$, gdzie L=kwas 2,2'-dipirydylo-4,4'--dikarboksylowy). Takie ogniwo składa się z fotouczulonej barwnikiem anody, mediatora oksydoredukcyjnego i platynowej elektrody. Fotoanoda to zazwyczaj wielkocząsteczkowy (mezoskopowy), gruby film dwutlenku tytanu (TiO₂) zanurzony w elektrolicie zawierającym mediatory (I₃⁻/I₃). Wzbudzenie barwnika powoduje wyrzucenie elektronu w pasmo przewodnictwa (ang. conduction band, CB) nanocząsteczek dwutlenku tytanu, a następujący później wychwyt elektronów to już produkcja fotoprądu (Ryc. 7). Utleniona cząsteczka barwnika ulega regeneracji dzięki anionowi jodkowemu (I) elektrolitu. Z kolei anion trójjodkowy (I_3^-), utleniony produkt I, ulega redukcji na katodzie platynowej.

Samo wychwytywanie energii słonecznej poprzez takie lub podobne, uczulone kompleksami rutenu układy na powierzchni dwutlenku tytanu, związane jest nie tylko z rodzajem barwnika, ale i strukturą przestrzenną (topografią) powierzchni filmu tytanowego. Najbardziej preferowana jest taka o odpowiedniej porowatości i niewielkich rozmiarach cząsteczek (ok. 20 nm). Na powierzchni



Ryc. 7. Schemat ogniw fotoelektrochemicznych (na podstawie MCCONNELL i współaut. 2010).

DSSC, ogniwo słoneczne uczulane barwnikiem; N3, barwnik rutenowy; C, chromofor; Ox, katalizator rozkładu wody; I, jod.

całkiem płaskiej czy jednowarstwowej, przyłączony barwnik wychwycić może zaledwie ułamek padającego światła, natomiast wielowymiarowa sieć nanocząsteczek wzmacnia absorbcję promieniowania wielokrotnie, podobnie jak czynią ścieśnione fragmento ty błon tylakoidów ułożone w stosy gran. Co ciekawe, w obecności tego samego barwnika i podłoża, można, zmieniając wielkość nanocząstek dwutlenku tytanu (np. do 200-400 nm), zwiększyć wychwyt energii w regionie światła czerwonego i bliskiej podczerwieni (MAR-TINSON i współaut. 2008).

Perspektywiczne wykorzystanie fotosyntezy to nie tylko systemy wiernie kopiujące proces fotosyntezy czy systemy opierające się na jego ogólnej koncepcji, ale również tworzenie układów z wyizolowanych fotoukładów czy anten immobilizowanych na powierzchni nośnika czy elektrody. Wyizolowany ze szpinaku fotosystem I unieruchomiony na złotej płytce, która ma być odbiorcą elektronów, tworzący tzw. złoty liść, ma jednak niewielką wydajność (CIESIELSKI i współaut. 2008).

Prof. Nocera z Massachusetts Institute of Technology w Cambridge (USA) przedstawił wyniki badań nad tzw. "sztucznym liściem" (NOCERA 2012). Prototyp ma rozmiar karty do gry, a umieszczony w naczyniu z wodą w temperaturze pokojowej wykazuje znaczną wydajność i stabilność. Na sztuczny liść składa się płytka amorficznego krzemu z przyłączonymi katalizatorami produkcji wodoru i tlenu: stopem NiMoZn z jednej strony (sztuczny PSI) i częścią OEC opartą na kobalcie (Co-OEC) z drugiej (sztuczny PSII). Ze względu na dostępność i taniość komponentów takie ogniwo wydaje się być niezwykle obiecujace.

PODSUMOWANIE

Dzięki działalności organizmów fotosyntetyzujących w ciągu roku powstaje 100 bilionów ton biomasy, co oznacza masę rzędu 2 egipskich piramid na godzinę (Hou i współaut. 2014). Usprawniając fotosyntezę roślinną można uzyskać ok. dwukrotne zwiększenie wydajności procesu, wciąż trwają jednak poszukiwania sztucznych systemów mogacych czerpać z nieograniczonego źródła (słońca) energię, którą ludzkość mogłaby wykorzystać. Nie tylko chodzi tu o mimikę naturalnego procesu, ale przede wszystkim o jego usprawnienie, jak i produkcję biopaliw, w tym wytwarzanie wodoru (NOCERA 2012, HE i współaut. 2014, ULLMAN i współaut. 2014). Niedawno opisany chlorofil f z sinicy Halo-

mincronema hongdechloris, z maksiumum absorbcji przesuniętym na 707 nm (CHEN i współaut. 2010), może przyczynić się do zwiększenia wydajności produkcji paliw słonecznych.

Postęp w badaniach nad sztuczną fotosyntezą jest niezwykle szybki, badania przebiegaja wielotorowo, bardziej lub mniej związane z pierwotnym schematem procesu. Z dnia na dzień bliżej nam do odkrycia tanich, wytrzymałych i efektywnych ogniw słonecznych i do wizji zarówno Juliusza Verne'a, jak i ojca fotochemii Giacomo Ciamiciana, który W 1912 r. opisał swą wizję szklanych domów wykorzystujących zazdrośnie strzeżoną tajemnicę roślin, fotosyntezę.

LITERATURA

- AMUNTS A., NELSON N., 2009. Plant photosystem I design in the light of evolution. Structure 17, 637-650.
- BLANKENSHIP R., 2014. Molecular Mechanisms of Pho-
- tosynthesis. JohnWiley & Sons, Chichester, UK. CHEN M., SCHLIEP M., WILLOWS R. D., CAI Z. L., NEILAN B. A., SCHEER H., 2010. A red-shifted chlorophyll. Science 329, 1318-1319.
- CHIDA H., NAKAZAWA A., AKAZAKI H., HIRANO T., SURU-GA K., OGAWA M., SATOH T., KADOKURA K., YAMA-DA S., HAKAMATA W., ISOBE K., ITO T., ISHII R., NISHIO T., SONOIKE K., OKU T., 2007. Expression of the algal cytochrome c6 gene in Arabidopsis enhances photosynthesis and growth. Plant Cell Physiol. 48, 948-957.
- CIESIELSKI P. N., SCOTT A. M., FAULKNER C. J., BERRON B. J., CLIFFEL D. E., JENNINGS G. K., 2008. Functio-nalized nanoporous gold leaf electrode films for the immobilization of photosystem I. ACS Nano 2, 2465-2472.

- DELONG E. F., BEJA O., 2010. The light-driven proton pump proteorhodopsin enhances bacterial survival during tough times. PLoS Biol 8, e1000359.
- FALKOWSKI P. G., KATZ M. E., KNOLL A. H., QUIGG A., RAVEN J. A., SCHOFIELD O., TAYLOR F. J., 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. Science 305, 354-360.
- FUJIMOTO R., TAYLOR J. M., SHIRASAWA S., PEACOCK W. J., DENNIS E. S., 2012. *Heterosis of Arabidopsis* hybrids between C24 and Col is associated with *increased photosynthesis capacity.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109, 7109-7114.
- FUKUZUMI S., KOJIMA T., 2008. Control of redox reac-tivity of flavin and pterin coenzymes by metal ion coordination and hydrogen bonding. J. Biol.
- Inorg. Chem. 13, 321-333. GIAIMO J. M., GUSEV A. V., WASIELEWSKI M. R., 2002. Excited-state symmetry breaking in cofacial and linear dimers of a green perylenediimide chlorophyll analogue leading to ultrafast charge separation. J. Am. Chem. Soc. 124, 8530-8531.

- GUNDERSON V. L., SMEIGH A. L., KIM C. H., CO D. T., WASIELEWSKI M. R., 2012. Electron transfer within self-assembling cyclic tetramers using chlorophyll-based donor-acceptor building blocks. J. Am. Chem. Soc. 134, 4363–4372.
- Am. Chem. Soc. 134, 4363-4372.
 HE Z., WU H., CAO Y., 2014. Recent advances in polymer solar cells: realization of high device performance by incorporating water/alcohol-soluble conjugated polymers as electrode buffer layer. Adv. Mater. 26, 1006-1024.
 HOU H. J., ALLAKHVERDIEV S. I., NAJAFPOUR M. M., GO-
- HOU H. J., ALLAKHVERDIEV S. I., NAJAFPOUR M. M., GO-VINDJEE, 2014. *Current challenges in photosynthesis: from natural to artificial.* Front. Plant Sci. 5, 232.
- LANYI J. K., 2004. *Bacteriorhodopsin.* Annu. Rev. Physiol. 66, 665-688.
- LEISTER D., 2012. How Can the Light Reactions of Photosynthesis be Improved in Plants? Front. Plant Sci. 3, 199.
- MARTINSON A. B., HAMANN T. W., PELLIN M. J., HUPP J. T., 2008. New architectures for dye-sensitized solar cells. Chemistry 14, 4458-4467.
- solar cells. Chemistry 14, 4458-4467. MCCONNELL I., LI G., BRUDVIG G. W., 2010. Energy conversion in natural and artificial photosynthesis. Chem. Biol. 17, 434-447.
- MELIS A., 2009. Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. Plant Sci. 177, 272-280.
- MURATA N., ALLAKHVERDIEV S. I., NISHIYAMA Y., 2012. The mechanism of photoinhibition in vivo: reevaluation of the roles of catalase, alpha-tocopherol, non-photochemical quenching, and electron transport. Biochim. Biophys. Acta 1817, 1127-1133.
- NELSON N., JUNGE W., 2015. Structure and Energy Transfer in Photosystems of Oxygenic Photosyn-

thesis. Annu. Rev. Biochem. DOI: 10.1146/annu-rev-biochem-092914-041942.

- NOCERA D. G., 2012. *The artificial leaf.* Acc. Chem. Res. 45, 767-776.
- PESARESI P., SCHARFENBERG M., WEIGEL M., GRANLUND I., SCHRODER W. P., FINAZZI G., RAPPAPORT F., MA-SIERO S., FURINI A., JAHNS P., LEISTER D., 2009. Mutants, overexpressors, and interactors of Arabidopsis plastocyanin isoforms: revised roles of plastocyanin in photosynthetic electron flow and thylakoid redox state. Mol. Plant 2, 236– 248.
- PRIBIL M., PESARESI P., HERTLE A., BARBATO R., LEISTER D., 2010. Role of plastid protein phosphatase TAP38 in LHCII dephosphorylation and thylakoid electron flow. PLoS Biol 8, e1000288.
- PRIBIL M., LABS M., LEISTER D., 2014. Structure and dynamics of thylakoids in land plants. J. Exp. Bot. 65, 1955–1972.
- ROGER C., MULLER M. G., LYSETSKA M., MILOSLAVINA Y., HOLZWARTH A. R., WURTHNER F., 2006. Efficient energy transfer from peripheral chromophores to the self-assembled zinc chlorin rod antenna: a bioinspired light-harvesting system to bridge the "green gap". J. Am. Chem. Soc. 128, 6542– 6543.
- SHEN J. R., 2015. The Structure of Photosystem II and the Mechanism of Water Oxidation in Photosynthesis. Annu. Rev. Plant Biol. 66, 23-48.
- ULLMAN A. M., LIU Y., HUYNH M., BEDIAKO D. K., WANG H., ANDERSON B. L., POWERS D. C., BREEN J. J., ABRUNA H. D., NOCERA D. G., 2014. Water oxidation catalysis by Co(II) impurities in Co(III-)404 cubanes. J. Am. Chem. Soc. 136, 17681– 17688.

KATARZYNA BOŻENA GIECZEWSKA

Zakład Biofizyki Instytut Fizyki Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie Marii Curie-Skłodowskiej 5, 20-081 Lublin

"NAPĘDZANE ŚWIATŁEM" – OD FOTOSYNTEZY DO FOTOOGNIWA

Streszczenie

Fotosynteza to najważniejszy proces biologiczny, polegający na przetworzeniu energii światła słonecznego na dostępną dla podtrzymania życia energię wiązań chemicznych. W niniejszej pracy omówiono podstawowe założenia procesu, barwniki fotosyntetyczne i białkowe kompleksy błonowe. Zwrócono szczególną uwagę na charakterystyczne dla zajścia procesu mechanizmy molekularne, by tym łatwiej wprowadzić czytelnika w niełatwe zagadnienia sztucznej fotosyntezy. Omówiono podstawowe strategie czerpiące z naturalnego procesu: biomimetyczne, opierające się na naśladowaniu gotowych układów naturalnych, oraz takie, które używając sztucznie syntetyzowanych, uproszczonych, komponentów są zgodne z ogólną koncepcją procesu fotosyntetycznego. W dobie rozwijających się nauk energetycznych stworzenie wydajnego, taniego i przyjaznego dla środowiska ogniwa słonecznego przybliża się coraz bardziej.

KATARZYNA BOŻENA GIECZEWSKA

Zakład Biofizyki

Instytut Fizyki

Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Marii Curie-Skłodowskiej 5, 20-081 Lublin

DRIVEN BY LIGHT - FROM PHOTOSYNTHESIS TO PHOTOCELL UNIT

Summary

Photosynthesis is the main biological process driven by light, which converts light energy into chemical one that can be later used to fuel organisms' activities. In this paper, I describe molecular principles underlying this process as well as involved therein photosynthetic pigments and membrane proteins complexes. Photosynthetic processes are widely used as an inspiration for artificial ones, not only by attempts to mimick the natural processes but also by building simpler ones from artificial components. Research developments in this field may lead to to the discovery of an efficient, cheap and environmental friendly photocell unit.