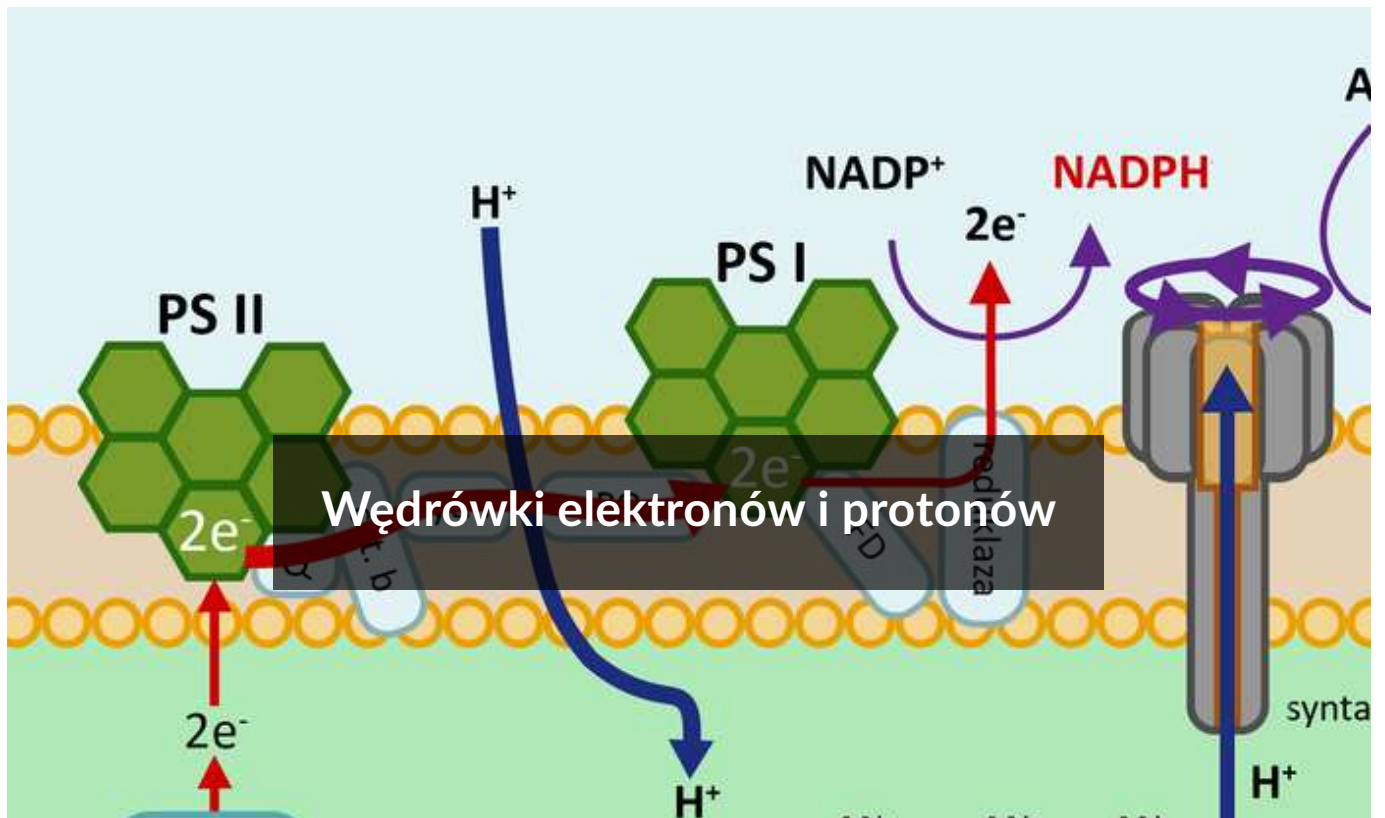


Wędrówki elektronów i protonów

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Gra edukacyjna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Funkcją transportu elektronów i fosforylacji fotosyntetycznej jest redukcja NADP^+ oraz zatrzymywanie uwolnionej energii w cząsteczce ATP. U eukariontów transport elektronów i fosforylacja fotosyntetyczna zachodzą w błonie tylakoidów, u prokariotów zaś procesy te przebiegają w błonie komórkowej.

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

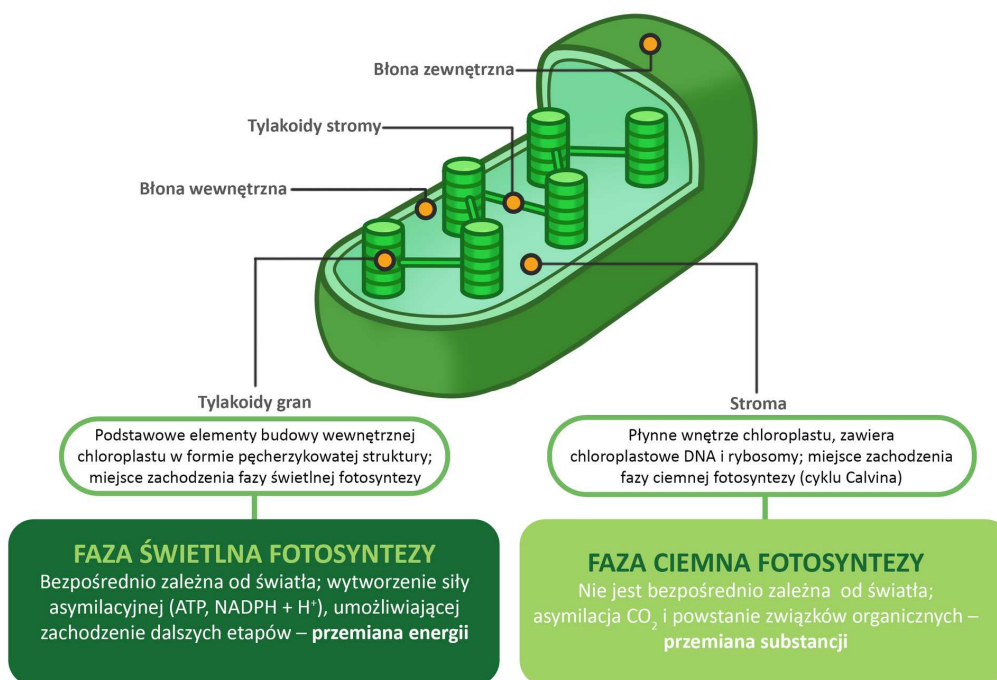
Większość organizmów na świecie żyje tylko dzięki słońcu, które emituje energię świetlną absorbowaną przez fotosyntetyzujące organizmy. Energia ta zostaje przekształcona podczas reakcji fotosyntezy w energię wiązań chemicznych zawartych w związkach organicznych. Wytworzone w ten sposób cząsteczki pokarmowe stanowią źródło energii do pozostałych procesów metabolicznych komórki. Fotosynteza zachodzi u roślin, glonów i niektórych prokariotów, jednak tutaj skupimy naszą uwagę na procesach zachodzących u tych pierwszych.

Twoje cele

- Opiszysz przebieg fazy fotosyntezy zależnej od światła.
- Wyjaśnisz mechanizm powstawania ATP w procesie chemiosmozy w chloropląście.
- Porównasz fosforylację cykliczną i niecykliczną.

Przeczytaj

Miejsce zachodzenia fotosyntezy



Budowa chloroplastu.

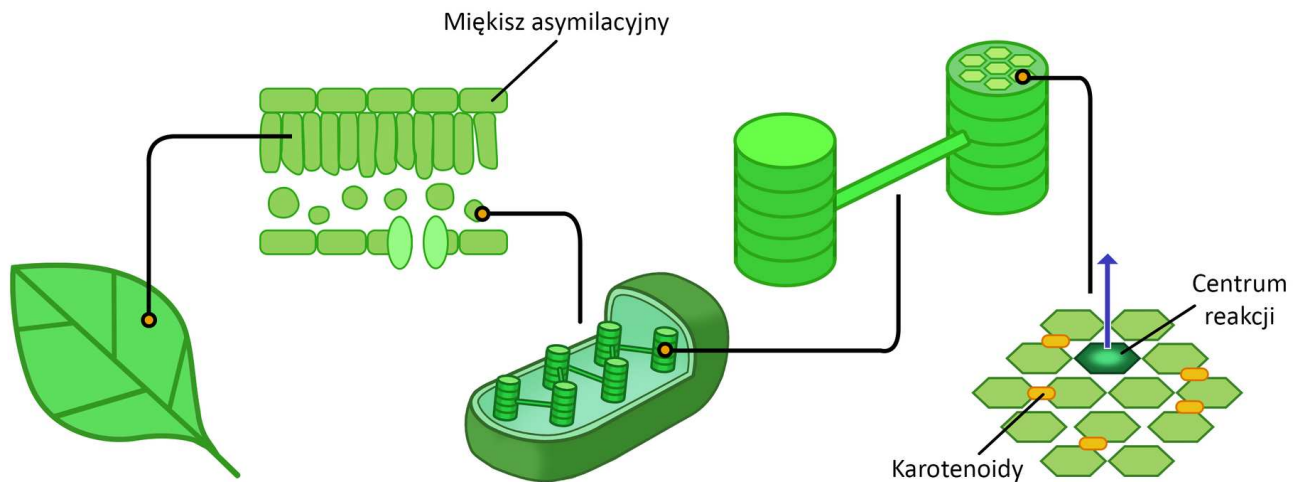
Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Fotosynteza jest na tyle wyjątkowym procesem, że musi zachodzić w specjalnie do tego przystosowanych strukturach. U roślin są nimi chloroplasty. Organelle te wyposażone są w system błon z zakotwiczonymi barwnikami fotosyntetycznymi, który stanowi miejsce zachodzenia **fazy jasnej fotosyntezy**, oraz stromę wypełniającą wewnątrz chloroplastu, gdzie zachodzi **faza niezależna od światła**.

Budowa i działanie fotosystemów

Światło jest formą energii elektromagnetycznej, która może być absorbowana przez barwniki. Różne barwniki pochłaniają światło o różnej długości fali, a te długości, które nie są pochłaniane, ulegają odbiciu lub transmisji. W chloroplastach znajdują się trzy podstawowe grupy barwników absorbujących światło: **chlorofil a**, chlorofil *b* i karotenoidy,

które są barwnikami pomocniczymi dla chlorofilu, a także chronią je przed trwałym utlenieniem. Karotenoidy absorbują światło o innej długości fali niż chlorofil, a wzbudzone cząsteczki karotenoidów pośredniczą w przekazywaniu energii chlorofilowi *a*. W związku z tym chlorofil może zostać wzbudzony bezpośrednio przez docierającą do niego energię świetlną lub pośrednio w sytuacji, gdy otrzymuje energię pochodzącą ze wzbudzonych karotenoidów. Pojedyncza cząsteczka chlorofilu może pochłonąć jedynie bardzo niewielką porcję energii, dlatego też barwniki fotosyntetyczne zebrane są w kompleksy absorbujące kwanty światła, zwane **fotosystemami**.



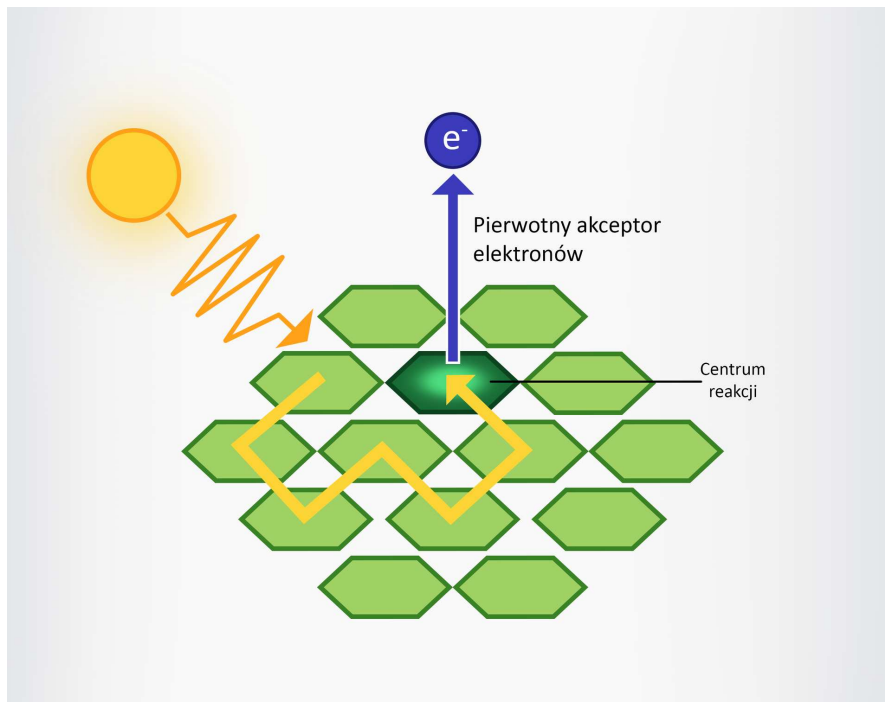
Ulokowanie fotosystemów w chloroplastach.

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Podczas fazy jasnej fotosyntezy dochodzi do zaabsorbowania przez chlorofil porcji światła o odpowiedniej długości fali (fotonu). Powoduje to przejście cząsteczki ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego, a energia ta zostaje przekazana na kolejną cząsteczkę chlorofilu. Z niej znowu na kolejną i kolejną, aż do osiągnięcia **centrum reakcji fotosystemu**. W ten sposób działa system antenowy, który stanowi swego rodzaju pułapkę energetyczną, umożliwiającą przekazanie energii i ładunków na kolejne cząsteczki.

W centrum reakcji znajdują się zmodyfikowane cząsteczki barwnika, które mają obniżoną energię emisji i można z nich wybić elektrony. Wybite elektrony zostaną następnie przekazane na cząsteczkę będącą pierwotnym akceptorem elektronów, skąd trafiają na kolejne cząsteczki, takie jak ferredoksyna czy plastochinon, które transportują je dalej.

W konsekwencji kolejnych zdarzeń powstaje siła redukcyjna w postaci $\text{NADPH} + \text{H}^+$ oraz zachodzi konwersja energii świetlnej w energię chemiczną, zmagazynowaną w wiązaniach wysokoenergetycznych ATP. Zarówno $\text{NADPH} + \text{H}^+$, jak i ATP to cząsteczki niezbędne do zajęcia fazy ciemnej fotosyntezy.



Mechanizm działania systemu antenowego.

Źródło: Inga Wójtowicz, licencja: CC BY-SA 3.0.

Fosforylacja niecykliczna – liniowy transport elektronów

Fosforylacja fotosyntetyczna jest sposobem na wytwarzanie siły asymilacyjnej, potrzebnej do przeprowadzenia reakcji cyklu Calvina. Do tego celu niezbędne są odpowiednie kompleksy cząsteczek, tworzące fotosystemy.

Błona [tylakoidu](#) zawiera dwa rodzaje fotosystemów, które ze sobą współdziałają podczas fazy jasnej fotosyntezy. W centrum reakcji fotosystemu I (PS I) znajduje się chlorofil *a* o maksimum absorpcji fali świetlnej o długości 700 nm, natomiast fotosystem II (PS II) zawiera w centrum reakcji chlorofil *a* o maksimum absorpcji fali o długości 680 nm. Pomiedzy nimi znajdują się cząsteczki tworzące fotosyntetyczny łańcuch przenoszący elektrony i protony.

[Fosforylacja niecykliczna](#) jest procesem, podczas którego dochodzi do syntezy ATP z wykorzystaniem obu fotosystemów, pomiędzy którymi są transportowane elektrony przy jednoczesnym powstaniu $\text{NADPH} + \text{H}^+$ oraz tlenu cząsteczkowego.

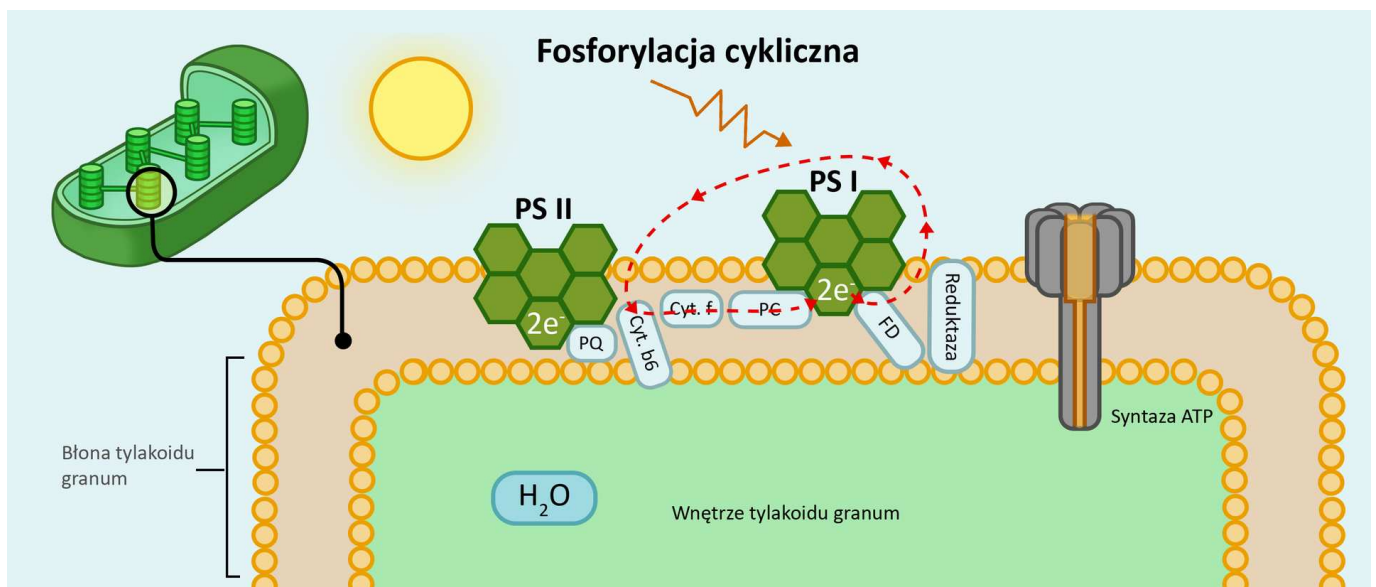
Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., Inga Wójtowicz, licencja: CC BY-SA 3.0.

Fosforylacja cykliczna

Rośliny, które znajdują się w optymalnych dla siebie warunkach natężenia światła i stężenia dwutlenku węgla, przeprowadzają fosforylację niecykliczną. Natomiast w pewnych warunkach, na przykład okresowego niedoboru wody lub obniżonego poziomu dwutlenku węgla, wywołanego na przykład zamknięciem aparatów szparkowych, zachodzi **fosforylacja cykliczna**.

W procesie tym wykorzystany jest jedynie fotosystem I i nie zachodzi fotoliza wody. Wybite z fotosystemu I elektrony trafiają natomiast na ferredoksynę, a następnie powracają do tego samego fotosystemu za pośrednictwem kompleksu cytochromów oraz plastocyjaniny.

Podczas tej wędrówki elektronów po przenośnikach elektronów dochodzi do transportu protonów do wnętrza tylakoidu i wytworzenia gradientu ich stężeń po obu stronach błony. Umożliwia to zajście **chemiosmozy** z wytworzeniem ATP, jednak nie powstaje $\text{NADPH} + \text{H}^+$ i nie tworzy się tlen cząsteczkowy.



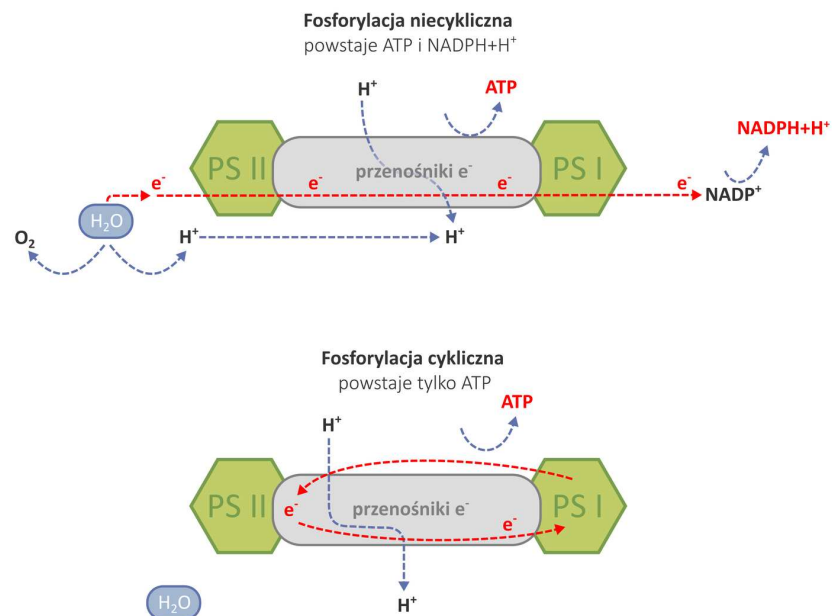
Ruch elektronów w trakcie fosforylacji cyklicznej.

PS I – fotosystem pierwszy, **PS II** – fotosystem drugi, **PQ** – plastochinon, **PC** – plastocyjanina, **Cyt. b6 i cyt. f** – kompleks cytochromów b6f, **FD** – ferredoksyna, e^- – elektron, .

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., Inga Wójtowicz, licencja: CC BY-SA 3.0.

Fosforylacja niecykliczna i cykliczna

Warto zwrócić uwagę, że rośliny są zdolne do jednoczesnego przeprowadzenia obu typów fosforylacji, cyklicznej i niecyklicznej, jednak to fosforylacja niecykliczna dostarcza $\text{NADPH}+\text{H}^+$ – niezbędnego do fazy ciemnej fotosyntezy. Istnieje pogląd, iż na początku ewolucji pierwotne bakterie wykorzystywały proces fosforylacji cyklicznej do wytwarzania ATP z udziałem energii świetlnej.



Porównanie fosforylacji fotosyntetycznej niecyklicznej i cyklicznej.

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., Inga Wójtowicz, licencja: CC BY-SA 3.0.

Słownik

chemiosmoza

proces, w wyniku którego protony przemieszczają się przez błony białkowo-lipidowe z wytworzeniem ATP

chlorofil

zielony barwnik fotosyntetyczny roślin i sinic; zlokalizowany jest w błonach fotosyntetycznych (tylakoidach); pełni funkcję centrum energetycznego zbierającego energię świetlną lub centrum reakcji fotochemicznych

faza ciemna fotosyntezy

faza fotosyntezy niezależna bezpośrednio od światła; asymilacja CO_2 i powstanie związków organicznych – przemiana substancji

faza jasna fotosyntezy

faza fotosyntezy bezpośrednio zależna od światła, umożliwiająca wytworzenie siły asymilacyjnej (ATP , $\text{NADPH}+\text{H}^+$), wykorzystywanej w dalszych etapach fotosyntezy

fosforylacja cykliczna

proces syntezy ATP z wykorzystaniem energii świetlnej, w którym uczestniczy tylko fotosystem PS I i nie powstaje NADPH+H⁺ ani tlen cząsteczkowy

fosforylacja niecykliczna

proces syntezy ATP z wykorzystaniem energii świetlnej, w którym uczestniczą oba fotosystemy, PS I i PS II, oraz powstają NADPH+H⁺ i tlen cząsteczkowy

fotosynteza

(gr. *fos* – światło; *synthesis* – łączenie) proces przetwarzania przez organizmy samożywne (autotrofy) energii świetlnej w energię chemiczną

fotosystem

kompleks barwników absorbujących kwanty światła podczas fazy jasnej fotosyntezy, zawierający centrum reakcji oraz systemy antenowe

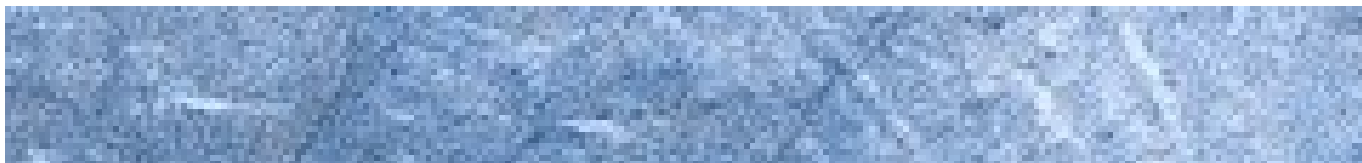
tylakoidy

cienkie błoniaste struktury przypominające woreczki; wewnątrz komórek prokariotów fotosyntetyzujących są wypełnione barwnikiem fotosyntetycznie czynnym, a wewnątrz chloroplastów komórek eukariotycznych są zróżnicowane: część z nich jest mała i ułożona w sposób przypominający stosy monet – są to tylakoidy gran zawierające chlorofil, część zaś jest wydłużona, łączy ze sobą tylakoidy gran i określana jest mianem tylakoidów międzygranowych (tylakoidów stromy)

Gra edukacyjna

Polecenie 1

Rozwiąż quiz i sprawdź swoją wiedzę na temat wędrówki elektronów i protonów.



Test

Sprawdź swoją wiedzę na temat wędrówki elektronów i protonów.

Poziom trudności:

łatwy

Limit czasu:

4 min

Twój ostatni wynik:

-

Uruchom

Polecenie 2

Opisz przebieg fazy fotosyntezy zależnej od światła.

Polecenie 3

Wyjaśnij, dlaczego w warunkach małego stężenia dwutlenku węgla nie zachodzi fosforylacja niecykliczna i uruchamiany jest wtedy mechanizm fosforylacji cyklicznej.

Polecenie 4

Ułóż pytanie testowe na temat wędrówki elektronów oraz protonów i daj je do rozwiązania kolegom oraz koleżankom.

Question: ...

- a. ...
- b. ...
- c. ...
- d. ...

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1

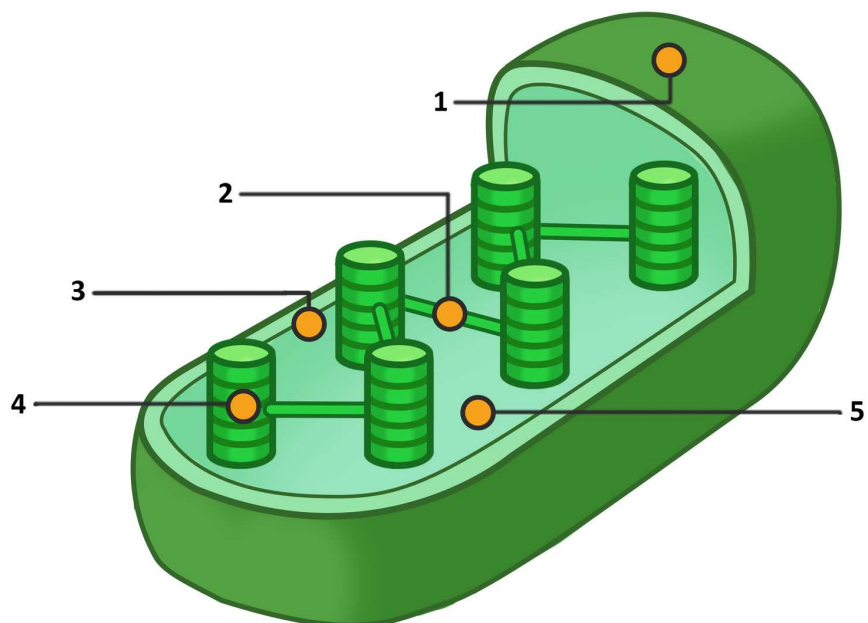


Zaznacz prawidłowe dokończenie zdania.

Faza świetlna fotosyntezy...

- nie jest bezpośrednio zależna od światła, ale wymaga siły asymilacyjnej.
- umożliwia przekształcenie energii chemicznej w energię świetlną.
- wymaga obecności barwników fotosyntetycznych.
- może zachodzić zarówno w dzień, jak i w nocy.

Ćwiczenie 2



Chloroplast.

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Połącz w pary numery i prawidłowe opisy elementów budowy chloroplastu.

tylakoid stroma, błona zewnętrzna, stroma, błona wewnętrzna, tylakoidy gran

1	
2	
3	
4	
5	

Ćwiczenie 3



Oceń, czy informacje dotyczące fazy jasnej fotosyntezy są prawdziwe czy fałszywe. Zaznacz „Prawda”, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo „Fałsz”, jeśli jest fałszywe.

	Prawda	Fałsz
Zachodzi u roślin, bakterii, glonów i niektórych grzybów.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umożliwia przekształcenie energii świetlnej w energię chemiczną.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umożliwia wytworzenie siły asymilacyjnej w postaci ATP i NADPH + H ⁺ .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zachodzi na błonie tylakoidów i w stromie chloroplastu.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ćwiczenie 4



Zaznacz odpowiedź, która zawiera poprawne informacje dotyczące fosforylacji niecyklicznej.

	Uczestniczące fotosystemy	Produkty
A <input type="checkbox"/>	PS I i PS II	Tylko ATP
B <input type="checkbox"/>	PS I	Tylko ATP
C <input type="checkbox"/>	PS II	ATP oraz NADPH + H ⁺
D <input type="checkbox"/>	PS I i PS II	ATP oraz NADPH + H ⁺

Ćwiczenie 5



System antenowy stanowi swego rodzaju pułapkę energetyczną, umożliwiającą absorpcję kwantów światła w chloroplastach, co zapoczątkowuje fazę jasną fotosyntezy. Uporządkuj poniższe etapy tego procesu we właściwej kolejności.

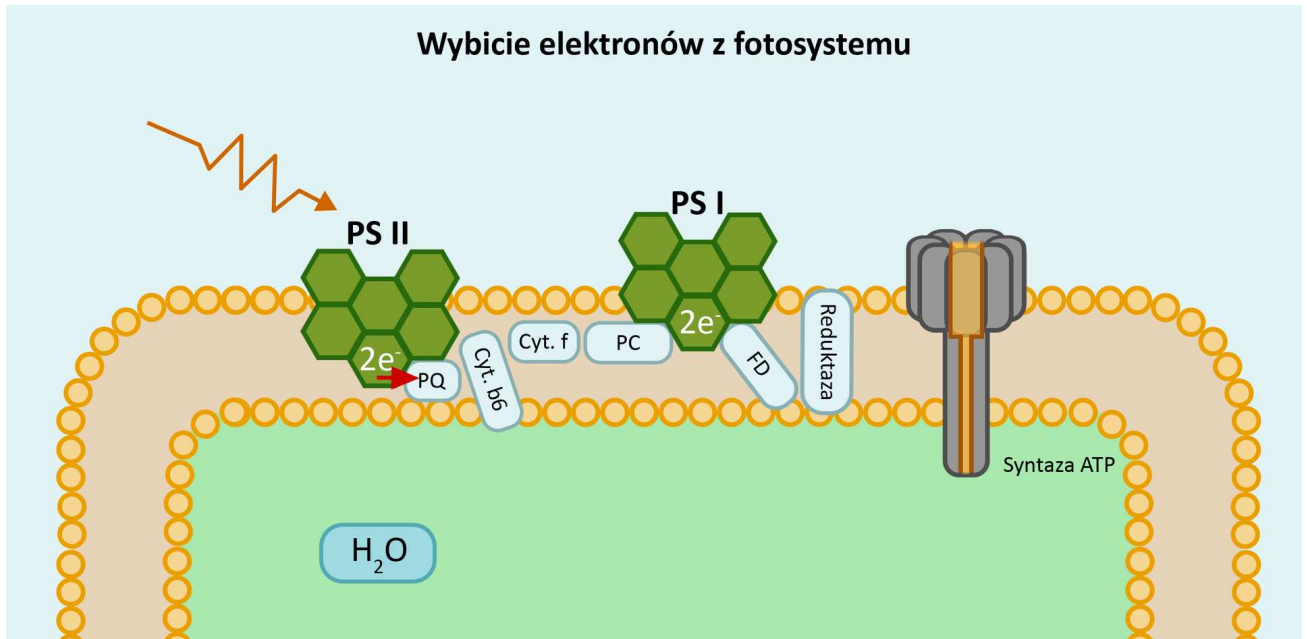
- wybicie elektronów z centrum reakcji
- przekazanie elektronów na pierwotny akceptor elektronów
- przejście cząsteczki chlorofilu ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego
- przekazanie energii na kolejną cząsteczkę chlorofilu
- zaabsorbowanie przez chlorofil porcji światła
- przekazanie energii do centrum reakcji

Ćwiczenie 6

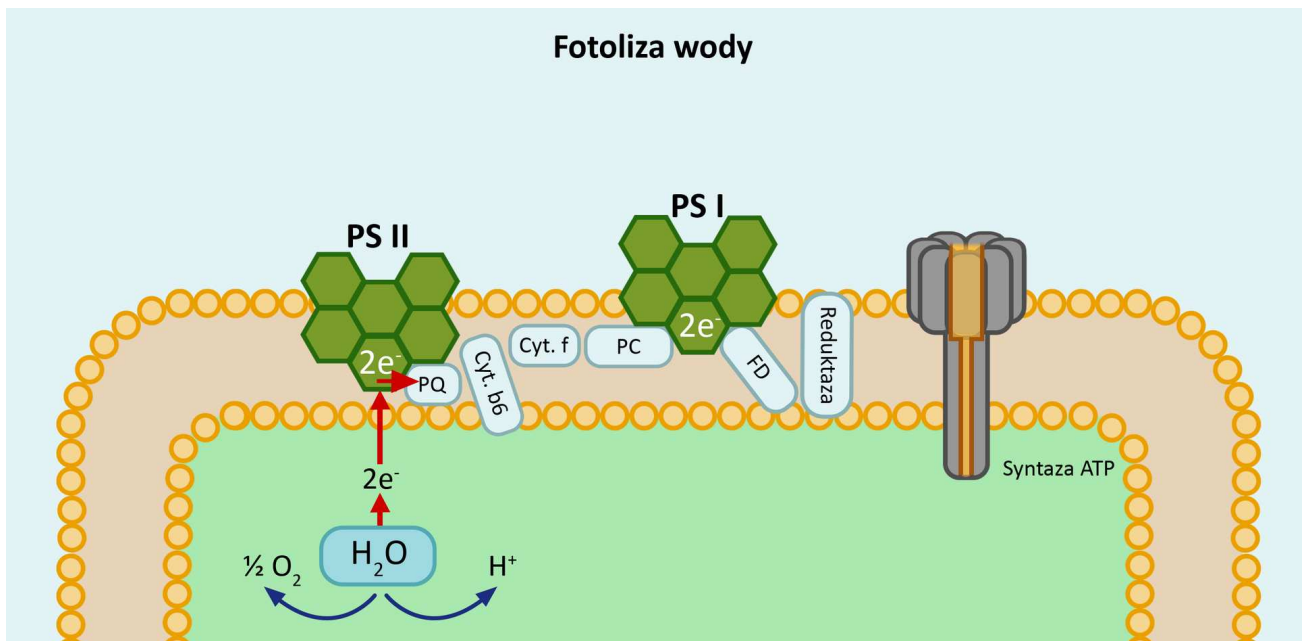


Uzupełnij poniższe zdania dotyczące fazy jasnej fotosyntezy tak, aby zawierały prawdziwe informacje.

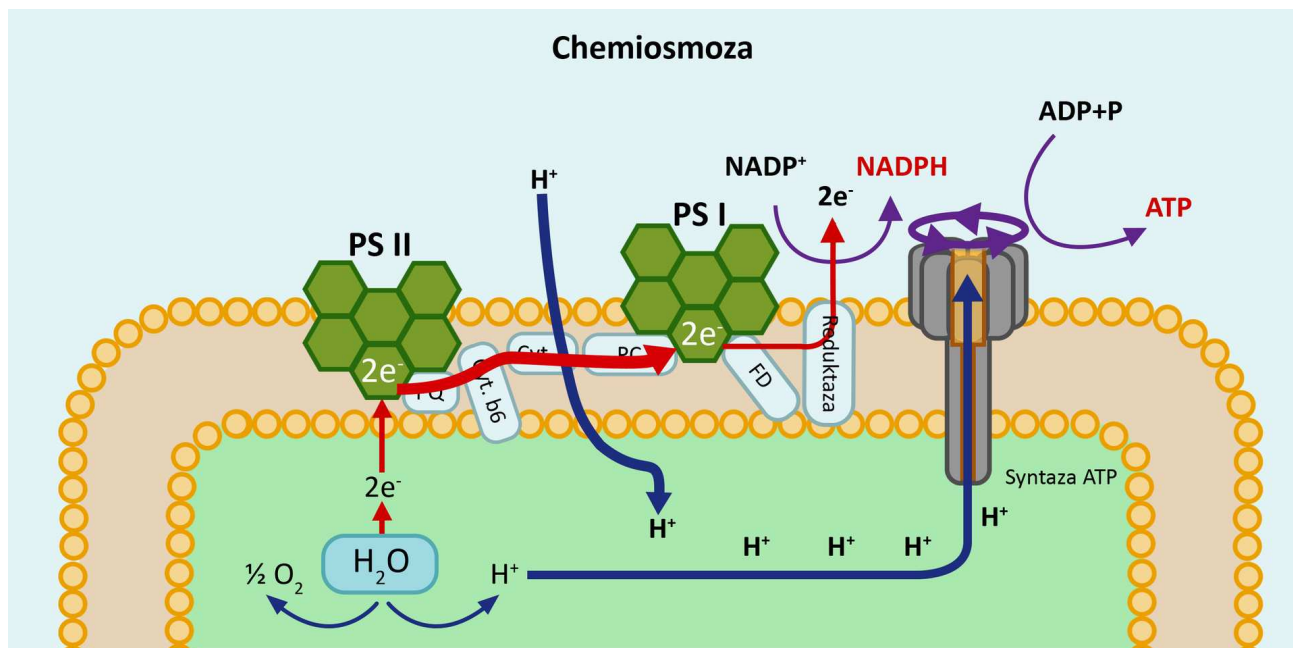
Foton światła wzbudza elektrony chlorofili anten energetycznych w fotosystemie drugim, a skumulowana energia wzbudzenia wybija elektrony z chlorofili a chlorofili b w centrum reakcji. Elektrony są przejmowane przez pierwotny wtórny akceptor elektronów. W fotosystemie powstaje luka protonowa luka elektronowa.



Wybicie elektronów z fotosystemu II podczas fosforylacji niecyklicznej.
 Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.



Fotoliza wody zachodząca podczas fosforylacji niecyklicznej.
 Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.



Chemiosmoza zachodząca podczas fosforylacji niecyklicznej.

Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Dla nauczyciela

Autor: Anna Juwan

Przedmiot: biologia

Temat: Wędrowki elektronów i protonów

Grupa docelowa: uczniowie III etapu edukacyjnego – kształcenie w zakresie rozszerzonym

Podstawa programowa:

Zakres rozszerzony

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

III. Energia i metabolizm.

4. Fotosynteza. Uczeń:

3) analizuje na podstawie schematu przebieg fazy zależnej od światła oraz fazy niezależnej od światła; wyróżnia substraty i produkty obu faz; wykazuje rolę składników siły asymilacyjnej w fazie niezależnej od światła;

4) wyjaśnia mechanizm powstawania ATP w procesie chemiosmozy w chloroplastach;

5) porównuje na podstawie schematu fotofosforylację cykliczną i niecykliczną.

Kształtowane kompetencje kluczowe:

- kompetencje cyfrowe;
- kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się;
- kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii.

Cele operacyjne (językiem ucznia):

- Opisziesz przebieg fazy fotosyntezy zależnej od światła.
- Wyjaśnisz mechanizm powstawania ATP w procesie chemiosmozy w chloroplastach.
- Porównasz fosforylację cykliczną i niecykliczną.

Strategie nauczania:

- konstruktywizm;
- konektywizm.

Metody i techniki nauczania:

- z użyciem komputera;
- rozmowa kierowana;
- ćwiczenia interaktywne;
- gra dydaktyczna;
- linia czasu.

Formy pracy:

- praca indywidualna;
- praca w parach;
- praca w grupach;
- praca całego zespołu klasowego.

Środki dydaktyczne:

- komputery z głośnikami, słuchawkami i dostępem do internetu;
- zasoby multimedialne zawarte w e-materiale;
- tablica interaktywna/tablica, pisak/kreda.

Przed lekcją:

1. **Przygotowanie do zajęć.** Nauczyciel loguje się na platformie i udostępnia uczniom e-materiał „Wędrowki elektronów i protonów”. Prosi uczestników zajęć o rozwiązanie ćwiczenia nr 6 z sekcji „Sprawdź się” na podstawie treści w sekcji „Przeczytaj”.
2. Uczniowie przypominają sobie informacje na temat fotosyntezy jako reakcji anabolicznej, zwracając uwagę na udział elektronów i protonów.

Przebieg lekcji

Faza wstępna:

1. Prowadzący lekcję wyświetla treści z sekcji „Wprowadzenie”. Informuje uczniów o planowanym przebiegu lekcji i przedstawia kryteria sukcesu.
2. **Raport z przygotowań.** Nauczyciel, za pomocą dostępnego w panelu użytkownika raportu, sprawdza, którzy uczniowie zapoznali się z udostępnionym e-materiałem i wykonali zadane ćwiczenie. Jeśli odpowiedzi uczniów bardzo się różnią lub ćwiczenie okazało się trudne, nauczyciel omawia je na forum.

Faza realizacyjna:

1. **Praca z tekstem.** Jeśli nauczyciel uzna, że przygotowanie uczniów jest niewystarczające, zarządza ciche czytanie tekstu z sekcji „Przeczytaj”. Następnie prowadzi rozmowę kierowaną dotyczącą zagadnień poruszanych w e-materiale. Uczniowie odpowiadają na zadane przez niego pytania:

„Jak przebiega faza fotosyntezy zależna od światła?”, „Jaką funkcję pełni fotosyntetyczny łańcuch?”, „Co to jest fosforylacja fotosyntetyczna?”, „W wyniku jakiego procesu powstają protony?”, „Jakie są etapy transportu elektronów podczas fazy świetlnej fotosyntezy?”, „Dlaczego ruch elektronów jest kluczowy w fazie jasnej fotosyntezy?”.

Jeśli jest to konieczne, nauczyciel naprowadza uczniów na właściwe odpowiedzi.

2. **Linia czasu.** Nauczyciel dzieli uczniów na cztery grupy. Każda z grup ma za zadanie opisać za pomocą linii czasu wędrówki elektronów i protonów podczas fotosyntezy. Następnie grupy prezentują swoje linie czasu.
3. **Praca z multimediami („Gra edukacyjna”).** Uczniowie dzielą się na zespoły i rozwiązują pytania quizowe. Nauczyciel wraz z uczniami określa zasady rywalizacji i punktowania dobrych odpowiedzi (np. gra na czas lub na liczbę poprawnych odpowiedzi). Przeprowadzenie gry w klasie. Nauczyciel lub wybrany uczeń dba o prawidłowy przebieg quizu zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami. Nauczyciel ogłasza zwycięską drużynę.
4. Uczniowie wykonują w parach polecenia 3 („Wyjaśnij, dlaczego w warunkach małego stężenia dwutlenku węgla nie zachodzi fosforylacja niecykliczna i uruchamiany jest wtedy mechanizm fosforylacji cyklicznej”) oraz 4 („Ułóż pytanie testowe na temat wędrówki elektronów oraz protonów i daj je do rozwiązania kolegom oraz koleżankom”). Ochotnicy przedstawiają swoje odpowiedzi na forum klasy.
5. **Utrwalanie wiedzy i umiejętności.** Uczniowie wykonują ćwiczenia 7 (dotyczące roli fotolizy wody podczas fosforylacji fotosyntetycznej niecyklicznej) i 8 (dotyczące roli, jaką w syntezie ATP pełni transport elektronów wzdłuż błony tylakoidu podczas fosforylacji fotosyntetycznej niecyklicznej) w sekcji „Sprawdź się”. Nauczyciel sprawdza poprawność wykonanych zadań, omawiając je wraz z uczniami.

Faza podsumowująca:

1. Uczniowie rozwiązują ćwiczenie nr 3 (typu „prawda/fałsz”) z sekcji „Sprawdź się”. Następnie przygotowują podobne zadanie dla osoby z pary: tworzą trzy prawdziwe lub fałszywe zdania dotyczące tematu lekcji. Uczniowie wykonują ćwiczenie otrzymane od kolegi lub koleżanki.
2. Omówienie ewentualnych problemów z rozwiązaniem ćwiczeń z sekcji „Gra edukacyjna”.

Praca domowa:

1. Wymyśl pięć pytań związanych z tematem e-materiału, które mogłyby pojawić się na egzaminie maturalnym.

Materiały pomocnicze:

- Neil A. Campbell i in., „Biologia Campbella”, tłum. K. Stobrawa i in., Rebis, Poznań 2019.

- „Encyklopedia szkolna. Biologia”, red. Marta Stęplewska, Robert Mitoraj, Wydawnictwo Zielona Sowa, Kraków 2006.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania gry edukacyjnej:

- Nauczyciel może wykorzystać grę edukacyjną do podsumowania lekcji.