

Fosforylacja oksydacyjna

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Gra edukacyjna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Fosforylacja oksydacyjna

Mitochondrialny łańcuch oddechowy jest też nazywany łańcuchem transportu elektronów. To ciąg przemian biochemicznych, w którym elektrony są przenoszone na tlen cząsteczkowy, w wyniku czego powstaje woda. Uzyskana w tym procesie energia jest następnie zamieniana na energię chemiczną ATP.

Źródło: Wikimedia Commons, domena publiczna.

Mitochondrium to organellum komórkowe nazywane centrum energetycznym komórki. Właśnie w nim, w konsekwencji transportu elektronów, odbywa się wytwarzanie wysokoenergetycznego związku ATP. Proces ten zachodzi na drodze fosforylacji oksydacyjnej, która ma związek z łańcuchem oddechowym.

Twoje cele

- Opiszysz transport elektronów i protonów w łańcuchu oddechowym.
- Wskażesz powiązania łańcucha oddechowego z fosforylacją oksydacyjną.
- Wyjaśnisz związek chemiosmozy z fosforylacją ADP.

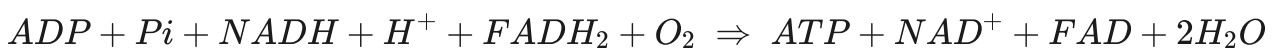
Przeczytaj

Istota i lokalizacja fosforylacji oksydacyjnej

Ilość energii potrzebna mężczyźnie ważącemu 70 kg i prowadzącemu tryb życia o umiarkowanej intensywności to aż 8400 kJ (2000 kcal) dziennie. Dostarczenie tak dużej porcji energii wymaga 83 kg ATP. Jednakże w organizmie człowieka w danym momencie ilość ATP wynosi zaledwie 250 g. Na szczęście różnica między ogólnie wymaganą ilością ATP a tą, którą dysponujemy w danym momencie, nie jest problemem, ponieważ ADP jest ponownie wykorzystywany do syntezy ATP. Każda cząsteczka ATP jest odzyskiwana około 300 razy dziennie, dzięki procesowi **fosforylacji oksydacyjnej**.

Fosforylacja oksydacyjna u organizmów eukariotycznych zachodzi w wewnętrznej błonie mitochondrialnej, natomiast u prokariotów – w ich błonie komórkowej.

Wytworzenie ATP na drodze fosforylacji oksydacyjnej jest reakcją egzoenergetyczną, którą można zapisać w postaci następującego równania:



W błonie wewnętrznej mitochondriów znajdują się zespoły (kompleksy) związków chemicznych uszeregowanych zgodnie ze wzrastającym **potencjałem oksydoredukcyjnym** i coraz większą **elektroujemnością**. Związki te tworzą **łańcuch oddechowy**. Potencjał oksydoredukcyjny, nazywany też potencjałem redoks, to zdolność danego związku chemicznego do przyjmowania i oddawania elektronów. W łańcuchu oddechowym elektrony są transportowane od związków **bardziej zredukowanych** do tych o **większym stopniu utlenienia**, by ostatecznie dotrzeć do cząsteczki **tłenu** o największej elektroujemności.

NADH i FADH₂, czyli zredukowane formy **uniwersalnych przenośników protonów i elektronów**, otrzymywane podczas **glikolizy, reakcji pomostowej** oraz **cyklu Krebsa**, są utleniane przez składniki łańcucha oddechowego. Elektrony pochodzące z **NADH i FADH₂** są przenoszone przez zakotwiczone w błonie wewnętrznej mitochondrium składniki łańcucha oddechowego, uszeregowane zgodnie ze wzrastającą elektroujemnością.

Transport elektronów w łańcuchu kończy się, gdy zostaną one przekazane na tlen – cząsteczkę o największej elektroujemności.

W wyniku takiego uporządkowanego przepływu elektronów wzdłuż błony wewnętrznej mitochondriów, uwolniona zostaje energia, która wykorzystana jest do przepompowania protonów (jonów H^+) w poprzek tej błony – z matriks mitochondrium do przestrzeni międzybłonowej (perimitochondrialnej).

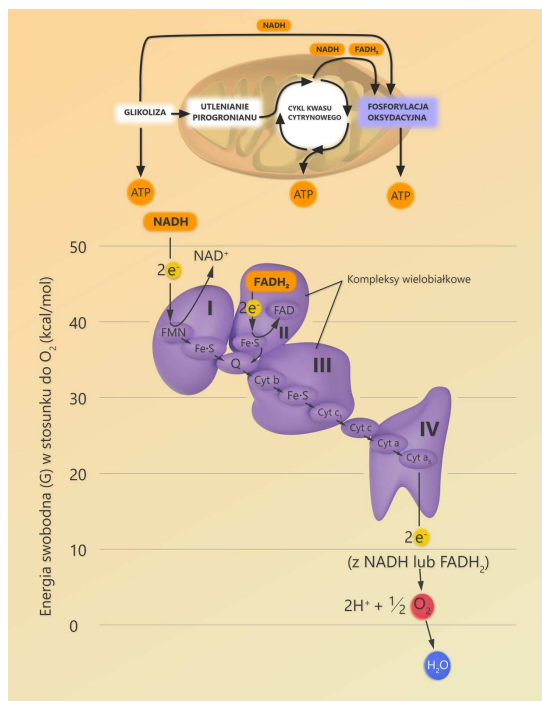
W wyniku tego procesu dochodzi do kumulacji jonów H^+ w przestrzeni międzybłonowej. Łańcuch oddechowy umożliwia więc wytworzenie gradientu stężeń protonów, których energia jest następnie wykorzystana do syntezy ATP.

Składniki łańcucha oddechowego

Wewnętrzna błona mitochondrialna tworzy fałdy – **grzebienie mitochondrialne**. Znacznie zwiększają one powierzchnię, na której znajdują się składniki łańcucha oddechowego.

W skład łańcucha oddechowego wchodzi cztery kompleksy białkowe. Są to trzy pompy protonowe o nazwach: oksydoreduktaza NADH-Q (kompleks I), nazywana dehydrogenazą NADH, oksydoreduktaza Q-cytochrom c (kompleks III) i oksydaza cytochromu c (oksydaza cytochromowa, kompleks IV), oraz wielki kompleks białkowy reduktaza bursztynian-Q (kompleks II), który jest bezpośrednio związany z cyklem Krebsa. Połączone kompleksy I, III i IV tworzą kompleks wielkocząsteczkowy (supramolekularny) – respirasom. Ułatwia on szybkie przenoszenie elektronów ze zredukowanych substratów, a także zapobiega uwalnianiu pośrednich form reakcji.

Elektrony są transportowane pomiędzy danymi kompleksami przez dwa specjalne nośniki elektronów: koenzym Q, nazywany również **ubichinonem**, oraz cytochrom c. W transporcie elektronów w łańcuchu oddechowym można wyróżnić cztery etapy.



Schemat przedstawia układ przenośników elektronów w łańcuchu transportu elektronów oraz spadek energii swobodnej podczas wędrówki elektronów w dół łańcucha. Po przyjęciu elektronów od mniej elektroujemnego składnika, położonego wyżej na rycinie, składnik łańcucha ulega redukcji. Następnie – oddając elektrony do kolejnego, bardziej elektroujemnego składnika – przechodzi w formę utlenioną.

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

Dwa elektrony przenoszone są z NADH na grupę prostetyczną kompleksu I – mononukleotyd flawinowy (FMN), który przechodzi w formę zredukowaną FHNH₂. Następnie elektrony z FHNH₂ zostają przekazane na białko żelazowo-siarkowe (Fe-S). W dalszej kolejności elektrony przekazywane są na koenzym Q (Q). Po przyjęciu dwóch elektronów przez Q powstaje jego zredukowana postać QH₂.

1

2

FADH₂ to enzym wchodzący w skład kompleksu II, który zasila łańcuch transportu elektronów. Jego elektrony przenoszone są na centra Fe-S, a następnie do Q. Skutkuje to powstaniem QH₂,

z którego elektrony przenoszone są na kolejny element łańcucha oddechowego – kompleks III.

Kompleks III katalizuje przeniesienie elektronów z QH_2 do cytochromu c (cyt c). Zawiera on dwa rodzaje cytochromów: b i c_1 . Cytochromy mają jako grupę prostetyczną grupę hemową, czyli żelazoprotoporfirynę IX. Grupa ta zawiera **jon żelaza**, który podczas transportu elektronów zmienia stopień utlenienia od formy zredukowanej Fe^{2+} do formy utlenionej Fe^{3+} . Oprócz cytochromów w kompleksie III występuje białko żelazowo-siarkowe z centrum typu 2Fe-2S (centrum Rieskiego).

3

4 Kompleks IV katalizuje przeniesienie elektronów z cytochromu c na tlen cząsteczkowy, który jest końcowym akceptorem. Cząsteczce O_2 przekazywane są cztery elektrony, w wyniku czego zostaje ona zredukowana do dwóch cząsteczek H_2O .

Synteza ATP

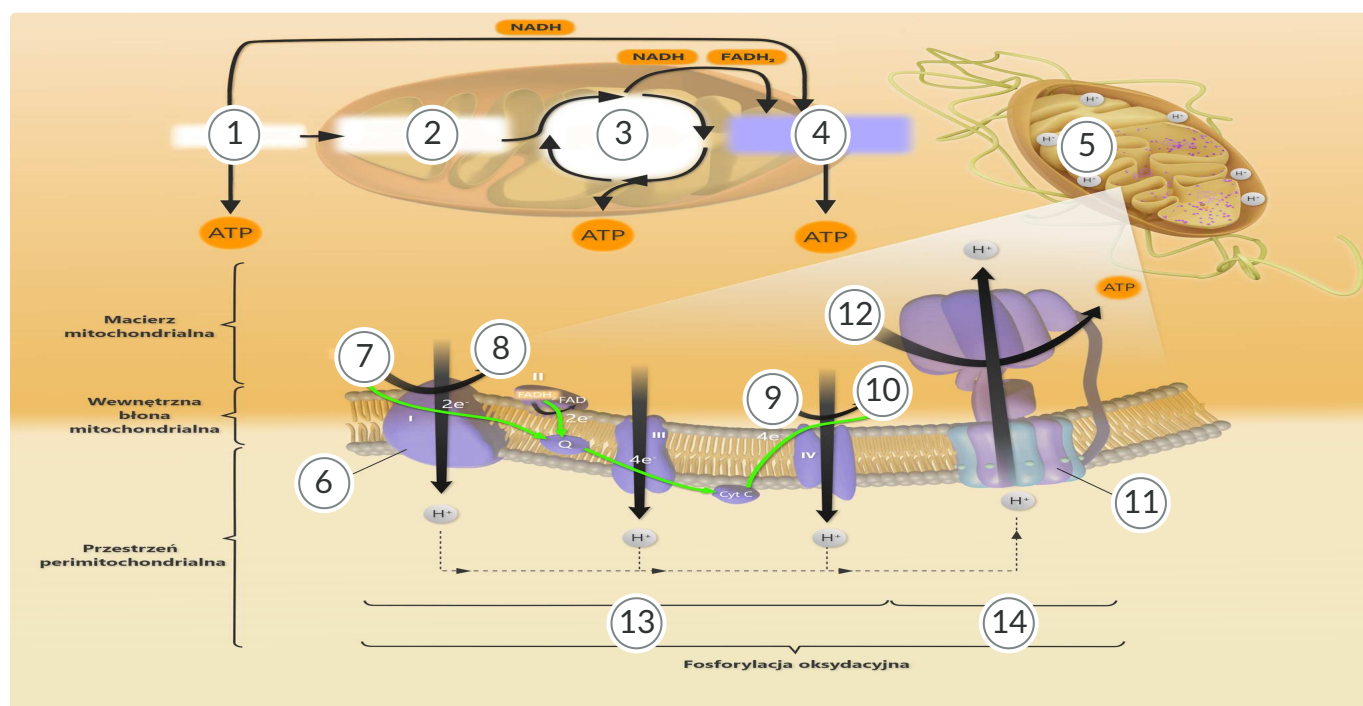
W 1961 r. brytyjski biochemik Peter Mitchell wysunął tzw. hipotezę chemiosmotyczną, mówiącą, że transport elektronów i synteza ATP są ze sobą sprzężone. Dzieje się tak dzięki utworzonemu w poprzek wewnętrznej błony mitochondrialnej gradientowi protonowemu. Przenoszenie elektronów wzdłuż łańcucha oddechowego prowadzi do pompowania protonów ze strony matriks na stronę cytoplazmatyczną wewnętrznej błony mitochondrialnej. Stężenie H^+ w matriks maleje, rośnie zaś w przestrzeni międzybłonowej, co prowadzi do powstania gradientu elektrochemicznego. Wówczas protony z powrotem

przeplływają do matriks, dzięki czemu ich stężenie w poprzek błony zostaje wyrównane. Taki przepływ protonów napędza syntezę ATP przez syntazę ATP (kompleks V). Efekt korzystnego energetycznie nierównomiernego rozłożenia protonów nazywa się **siłą protonomotoryczną**. Ma ona dwie składowe: gradient elektryczny i chemiczny. Hipoteza Mitchella została potwierdzona eksperymentalnie.

Ciekawostka

Początkowo hipoteza chemiosmotyczna Mitchella nie została przyjęta zbyt entuzjastycznie. Jeden z naukowców zajmujących się syntazą ATP, Efraim Racker, wspominał, że część badaczy uważała Mitchella za „nadwornego błazna”, którego praca nie ma żadnego znaczenia. Obecnie jednak odkrycie zjawiska napędzania reakcji syntazy ATP przez gradient protonowy uznaje się za jedno z dwóch (obok poznania struktury DNA) najważniejszych odkryć biologicznych XX w. W 1978 r. Peter Mitchell został uhonorowany Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii.

Więcej o syntezie ATP dowiesz się z e-materiału pt. Sposoby syntezy ATP w komórce.



1

Glikoliza

2

Utlenianie pirogronianu

3

Cykl kwasu cytrynowego

4

Fosforylacja oksydacyjna i łańcuch oddechowy

5

Wewnętrzna błona mitochondrialna

6

Kompleks białkowy przenośników elektronów

7

NADH zawierający elektrony pochodzące z pokarmu

8

NAD^+

9

$2\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2$

10

H_2O

11

Syntaza ATP

12



13

Łańcuch transportu elektronów

Transport elektronów wzdłuż łańcucha oddechowego umożliwia aktywne pompowanie protonów (H^+) z macierzy mitochondrialnej do przestrzeni międzybłonowej. Powoduje to powstanie gradientu protonowego, a także prowadzi do redukcji tlenu cząsteczkowego do wody.

14

Chemiosmoza

Synteza ATP z ADP i P_i napędzana jest przez bierny (zgodny z gradientem stężeń) przepływ H^+ przez kanał syntazy ATP obecnej w błonie.

NADH i FADH_2 przenoszą elektrony do łańcucha transportu elektronów zakotwiczonego w wewnętrznej błonie mitochondrium (zielone strzałki). Ostatecznie elektrony przekazywane są na akceptor – tlen, tworząc cząsteczkę wody, po jednoczesnym dołączeniu jonów wodorowych. Oprócz przyjmowania elektronów kompleksy I, III i IV pompują protony z macierzy mitochondrialnej do przestrzeni perimitochondrialnej. Energia chemiczna przekształcana zostaje w siłę protonomotoryczną, która wynika z gradientu błonowego H^+ .

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

Ciekawostka

Znane wszystkim trucizny, takie jak [cyjanek](#) czy tlenek węgla, działają szkodliwie na nasz organizm, hamując aktywność enzymu oksydazy cytochromu c. Prowadzi to do zatrzymania reakcji łańcucha oddechowego.

Słownik

cyjanki

sole kwasu cyjanowodorowego; ich niekorzystny wpływ na organizm wynika z wiązania się z atomami miedzi i żelaza, które wchodzą w skład enzymów łańcucha oddechowego

cykl Krebsa

cykl kwasu cytrynowego, w którym substrat, jakim jest acetylokoenzym A, zostaje utleniony do CO₂ w wyniku wielu przemian biochemicznych

cytochromy

białka złożone, hemoproteiny, które dzięki odwracalnej zmianie stopnia utlenienia żelaza grupy hemowej (z Fe²⁺ na Fe³⁺) stanowią układ przenośników elektronów w łańcuchu oddechowym u roślin i zwierząt

dehydrogenazy

grupa enzymów zdolna do odszczepienia atomów wodoru od związków organicznych

energia swobodna

zdolność do wykonania pracy bez zmiany temperatury i ciśnienia układu

fosforylacja oksydacyjna

proces syntezy ATP w warunkach tlenowych z wykorzystaniem łańcucha oddechowego

glikoliza

(gr. *glik* – słodki; *lysis* – rozpuszczanie) szlak metaboliczny, w którym na skutek wielu reakcji biochemicznych z jednej cząsteczki glukozy powstają: dwie cząsteczki pirogronianu, dwie cząsteczki ATP, dwie cząsteczki NADH oraz cząsteczka wody

łańcuch oddechowy

zespół enzymatycznych reakcji oksydacyjno-redukcyjnych zachodzących w wewnętrznej błonie mitochondrium u organizmów eukariotycznych, natomiast u bakterii – w błonie plazmatycznej, katalizowany przez białkowe przenośniki elektronów zawierające: flawiny, centra żelazo-siarkowe i hemy jako grupy prostetyczne

pompa protonowa

białko błonowe zdolne do transportowania protonów (H⁺) wbrew ich gradientowi stężeń

reakcja pomostowa

oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu – reakcja odłączania dwutlenku węgla od cząsteczki pirogronianu z jego jednoczesną dehydrogenacją i przyłączeniem powstałej reszty acetylowej do koenzymu A, w wyniku czego tworzy się acetylokoenzym A

syntaza ATP

enzym katalizujący reakcję wytwarzania ATP z ADP i fosforanu nieorganicznego

ubichinon, koenzym Q

chinon będący specjalnym nośnikiem elektronów; przenosi elektrony między odpowiednimi kompleksami w łańcuchu oddechowym

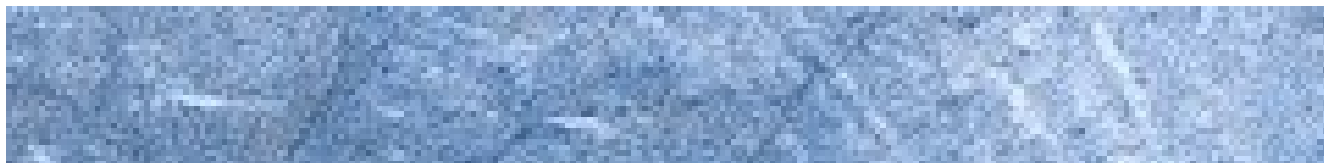
uniwersalne przenośniki protonów i elektronów

NAD⁺, czyli forma utleniona dinukleotydu nikotynoamidoadeninowego, oraz FAD, czyli forma utleniona nukleotydu flawinoadeninowego – związki organiczne, które są akceptorami protonów i elektronów

Gra edukacyjna

Polecenie 1

Sprawdź, co wiesz o łańcuchu oddechowym. Rozwiąż quiz.



Test

Sprawdź swoją wiedzę

Poziom trudności:

łatwy

Limit czasu:

4 min

Twój ostatni wynik:

-

Uruchom

Polecenie 2

Wyjaśnij, jakie znaczenie dla organizmów żywych ma fosforylacja oksydacyjna.

Polecenie 3

Wymień związki chemiczne, wchodzące w skład łańcucha oddechowego, i scharakteryzuj ich funkcje.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Wskaż prawidłowe dokończenie zdania.

Przepływ elektronów na łańcuchu oddechowym odbywa się...

- przez kanał syntazy ATP.
- bezpośrednio przez dwuwarstwę lipidową.
- w poprzek błony, za pomocą białek nośnikowych.
- wzdłuż błony, przez kompleksy białkowe.

Ćwiczenie 2



Dopasuj pojęcia związane z łańcuchem oddechowym do ich prawidłowych opisów.

różnica stężeń protonów po obu stronach błony, przepływ protonów zgodnie z gradientem stężeń przez syntazę ATP, kompleks białkowy odpowiedzialny za przenoszenie elektronów na cząsteczkę tlenu

gradient protonowy	
chemiosmoza	
oksydaza cytochromowa	

Ćwiczenie 3



Źródło: OpenStax, dostępny w internecie: Pobierz za darmo z <http://cnx.org/contents/185cbf87-c72e-48f5-b51e-f14f21b5eabd@9.85>., licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4



Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń.

Stwierdzenie	Prawda	Fałsz
Fosforylacja oksydacyjna jest najbardziej wydajnym energetycznie typem fosforylacji.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Łańcuch oddechowy zachodzi na grzebieniach mitochondrialnych komórek eukariotycznych oraz w cytozolu prokariotów.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Na łańcuchu oddechowym produktem ubocznym jest tlen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ćwiczenie 5

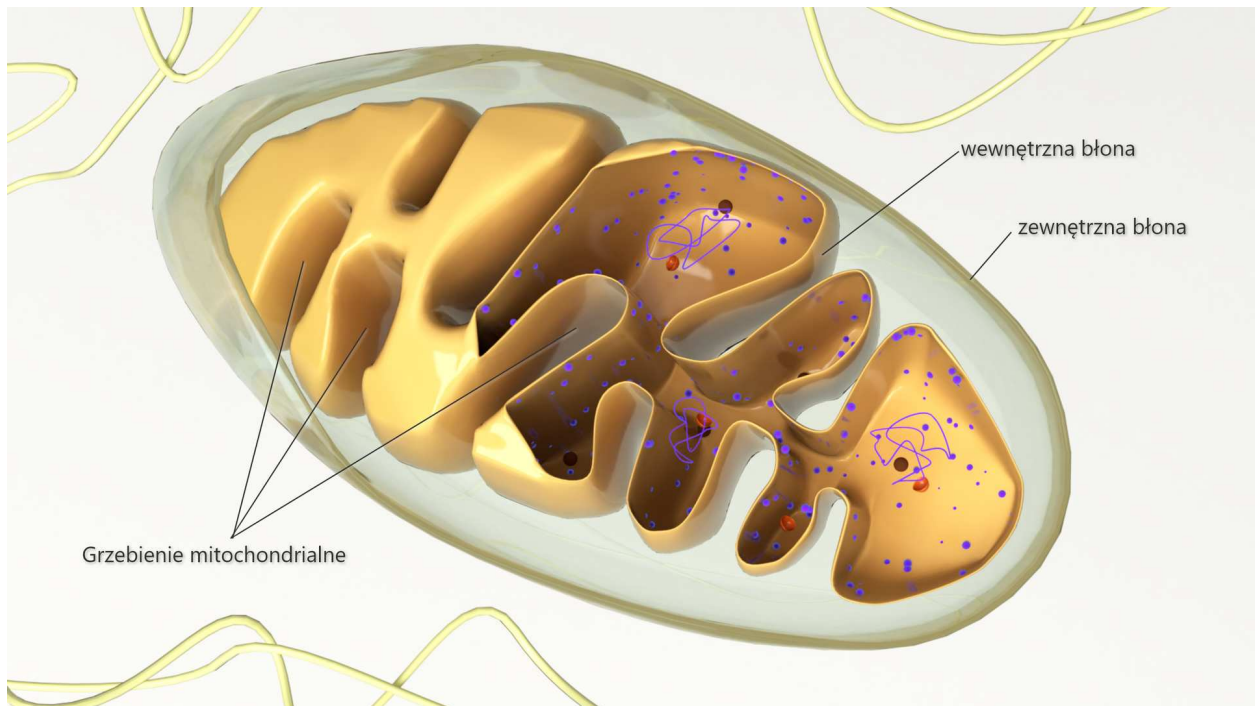


Przyporządkuj wymienione niżej związki odpowiednio do grup produktów lub substratów łańcucha oddechowego.

NADH, ADP i Pi, FADH_2 , H_2O , FAD, O_2 , ATP, NAD^+

Substraty	
Produkty	

Ćwiczenie 6

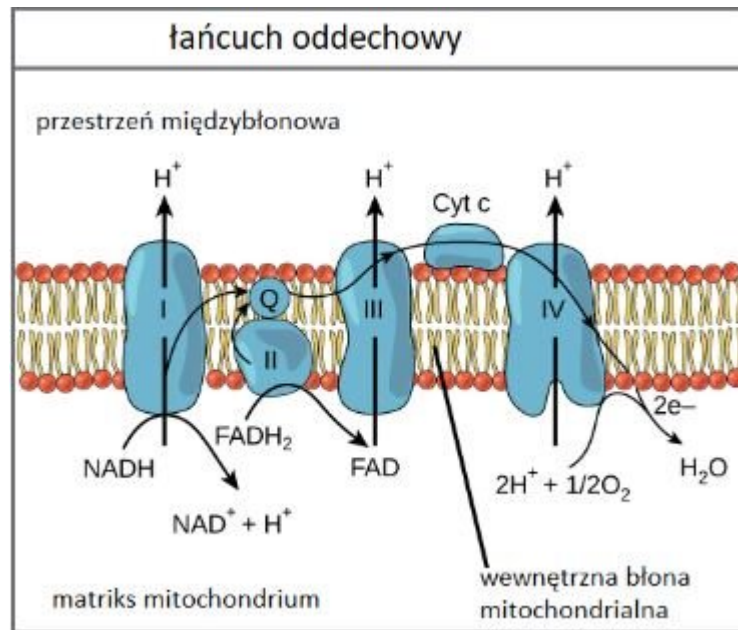


Źródło: Englishsquare.pl Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Schemat powyżej przedstawia budowę mitochondrium. Uzasadnij twierdzenie, że duża liczba grzebieli mitochondrialnych jest przystosowaniem do wydajnego działania mitochondrium.

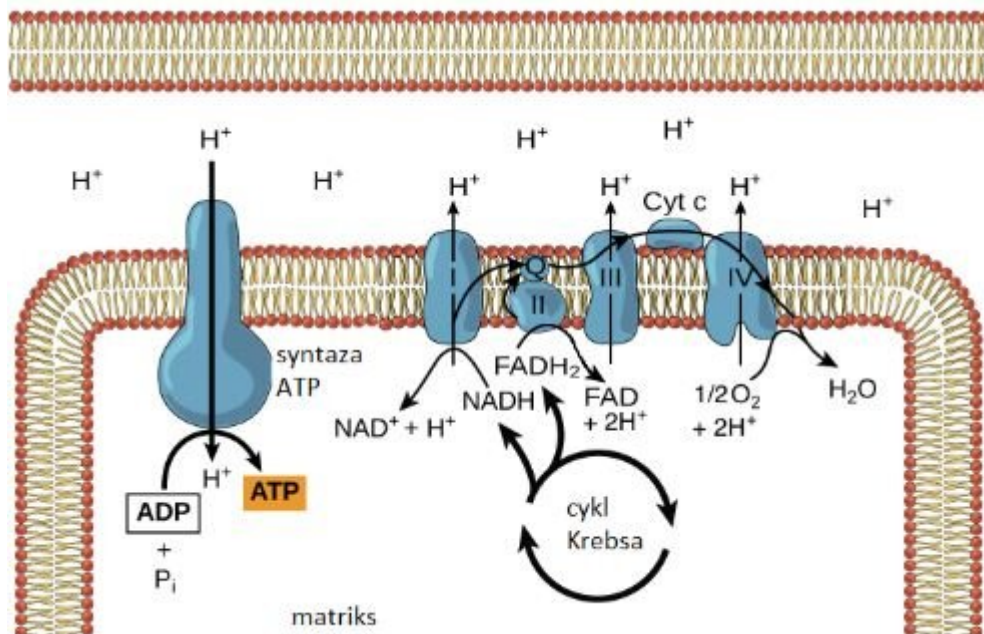
Blank area for the answer.

Ćwiczenie 7



Źródło: OpenStax, dostępny w internecie: <http://cnx.org/contents/185cbf87-c72e-48f5-b51e-f14f21b5eabd@9.85>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 8



Źródło: OpenStax, dostępny w internecie: <http://cnx.org/contents/185cbf87-c72e-48f5-b51e-f14f21b5eabd@9.85>, licencja: CC BY 3.0.

Dla nauczyciela

Autor: Anna Juwan

Przedmiot: biologia

Temat: Fosforylacja oksydacyjna

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

Podstawa programowa:

Zakres rozszerzony

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

III. Energia i metabolizm.

5. Pozyskiwanie energii użytecznej biologicznie. Uczeń:

3) przedstawia, na czym polega fosforylacja substratowa;

4) wyjaśnia mechanizm powstawania ATP w procesie chemiosmozy w mitochondriach (fosforylacja oksydacyjna);

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):

- Opiszysz transport elektronów i protonów w łańcuchu oddechowym.
- Wskażesz powiązania łańcucha oddechowego z fosforylacją oksydacyjną.
- Wyjaśnisz związek chemiosmozy z fosforylacją ADP.

Strategie nauczania:

- konstruktywizm;
- konektywizm.

Metody i techniki nauczania:

- z użyciem komputera;

- ćwiczenia interaktywne;
- linia czasu;
- gra dydaktyczna.

Formy pracy:

- 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. Uczniowie zapoznają się z treścią w sekcji „Przeczytaj”.

Przebieg lekcji

Faza wstępna:

1. Prowadzący lekcję wyświetla treści z sekcji „Wprowadzenie”. Informuje uczniów o planowanym przebiegu lekcji i przedstawia kryteria sukcesu.

Faza realizacyjna:

1. **Praca z tekstem.** Nauczyciel ocenia, na podstawie informacji na platformie, stan przygotowania uczniów do zajęć. Jeżeli jest ono niewystarczające, prosi o ciche zapoznanie się z treścią w sekcji „Przeczytaj”. Jeżeli zaś uczestnicy zajęć zaznajomili się wcześniej z tekstem, prosi, aby w 4-osobowych zespołach wynotowali minimum trzy najważniejsze, ich zdaniem, kwestie poruszone w e-materiale. Na koniec każda z grup na forum przedstawia i argumentuje swój wybór.
2. **Linia czasu.** Nauczyciel dzieli uczniów na cztery grupy. Każda z grup ma za zadanie opisać za pomocą linii czasu etapy łańcucha oddechowego i wskazać ich związek z fosforylacją oksydacyjną. Następnie grupy prezentują swoje linie czasu.
3. **Praca z multimedium („Gra edukacyjna”).** Uczniowie w tych samych zespołach 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 nagradza zwycięską drużynę, np. ocenami z aktywności.

4. Utrwalanie wiedzy i umiejętności. Uczniowie dobierają się w pary i wykonują ćwiczenia nr 7 i 8 (polegające na analizie schematów przebiegu łańcucha oddechowego) w sekcji „Sprawdź się”. Następnie konsultują swoje rozwiązania z inną parą uczniów i ustalają jedną wersję odpowiedzi.

Faza podsumowująca:

1. Ochotnicy definiują pojęcia: chemiosmoza, dehydrogenazy, potencjał oksydoredukcyjny, syntaza ATP, pompa protonowa.
2. Nauczyciel wyświetla temat lekcji i cele zawarte w sekcji „Wprowadzenie”, podsumowuje omawiany na lekcji materiał, wyjaśnia wątpliwości uczniów.

Praca domowa:

1. Wykonaj ćwiczenia od 1 do 6 z sekcji „Sprawdź się”.

Materiały pomocnicze:

- Jane B. Reece i in., „Biologia Campbella”, tłum. K. Stobrawa i in., Dom Wydawniczy REBIS, Poznań 2021.
- „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.