KURS

„BIOLOGIA POD KLUCZ"

ODDYCHANIE KOMÓRKOWE, FERMENTACJA

Prezentacja jest chroniona prawnie przed kopiowaniem bez pisemnej zgody autora i stanowi „utwór" i w myśl Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 1994 r., Nr 24, poz. 83 z późn. zm.).

PODSTAWA PROGRAMOWA 2025



1. Wykazuje związek budowy mitochondrium z przebiegiem procesu oddychania komórkowego.
2. Analizuje na podstawie schematu przebieg glikolizy, reakcji pomostowej i cyklu Krebsa, wyróżnia substraty i produkty tych procesów.
3. Przedstawia, na czym polega fosforylacja substratowa.
4. Wyjaśnia mechanizm powstawania ATP w procesie chemiosmozy w mitochondriach (fosforylacja oksydacyjna).
5. Porównuje drogi przemiany pirogronianu w fermentacji alkoholowej, mleczanowej i w oddychaniu tlenowym.
6. Wyjaśnia, dlaczego utlenianie substratu energetycznego w warunkach tlenowych dostarcza więcej energii niż w warunkach beztlenowych.
7. Analizuje na podstawie schematu przebieg glukoneogenezy i glikogenolizy oraz wykazuje związek tych procesów z pozyskiwaniem energii przez komórkę.

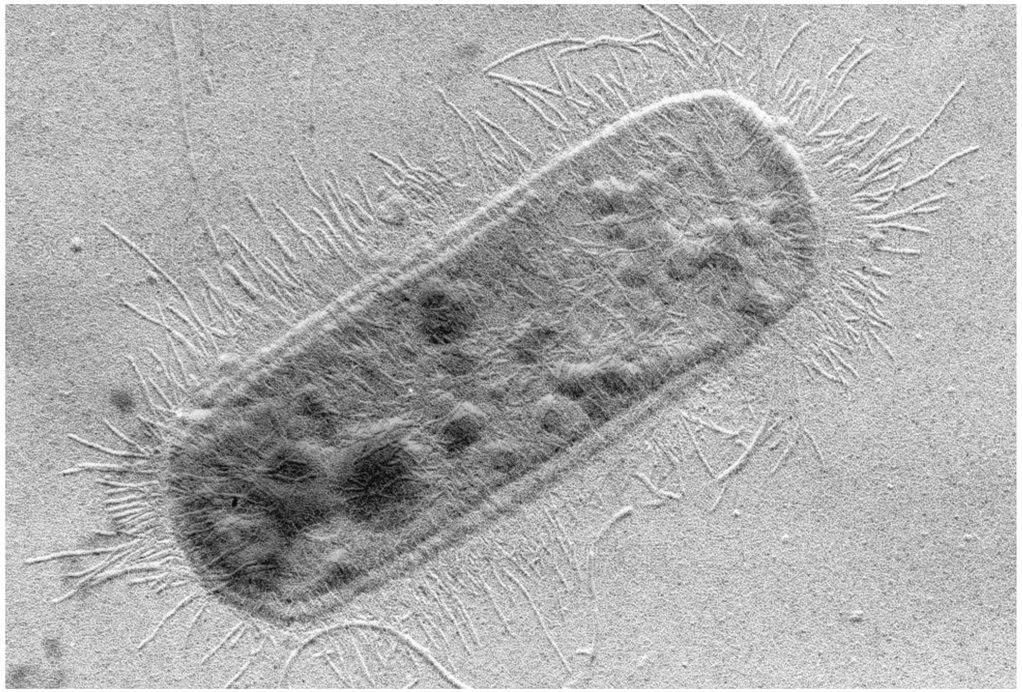
ODDYCHANIE TLENOWE

MIEJSCE ZACHODZENIA ODDYCHANIA TLENOWEGO

W komórkach **eukariotycznych** oddychanie tlenowe zachodzi w **mitochondrium** (2,3 i 4 etap). Tylko pierwszy etap zachodzi w **cytozolu**.



W komórkach **prokariotycznych** oddychanie tlenowe zachodzi częściowo w **cytozolu** i częściowo w **błonie komórkowej**.



OGÓLNIE RÓWNANIE REAKCJI ODD.TLENOWEGO



$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \longrightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{energia}$$

Na podstawie powyższego równania można stwierdzić, że oddychanie tlenowe jest reakcją **kataboliczną**, ponieważ:

- ze **złożonych** związków organicznych powstają **proste** związki nieorganiczne,
- w jego wyniku dochodzi do **uwolnienia energii** - część zostaje zmagazynowana w cząsteczkach związków wysokoenergetycznych (**ATP**), a cześć rozprasza się w postaci **ciepła**

ZAPAMIĘTAJ!



Przebieg oddychania tlenowego jest **dużo bardziej złożony** niż przedstawia to równanie reakcji na poprzednim slajdzie. Energia **musi być uwalniania stopniowo**, ponieważ uwolnienie dużej ilości energii w krótkim czasie **doprowadziłoby do uszkodzenia komórki.**

ZAPAMIĘTAJ!



Energię można **uwolnić** lub **dostarczyć**.

Nie jest możliwe wyprodukowanie / powstanie / syntetyzowanie energii, bo **przeczy to zasadom termodynamiki**.

Sformułowań „synteza” / „powstanie” można użyć w odniesieniu do **ATP**, który jest związkiem chemicznym.

ETAPY ODDYCHANIA TLENOWEGO

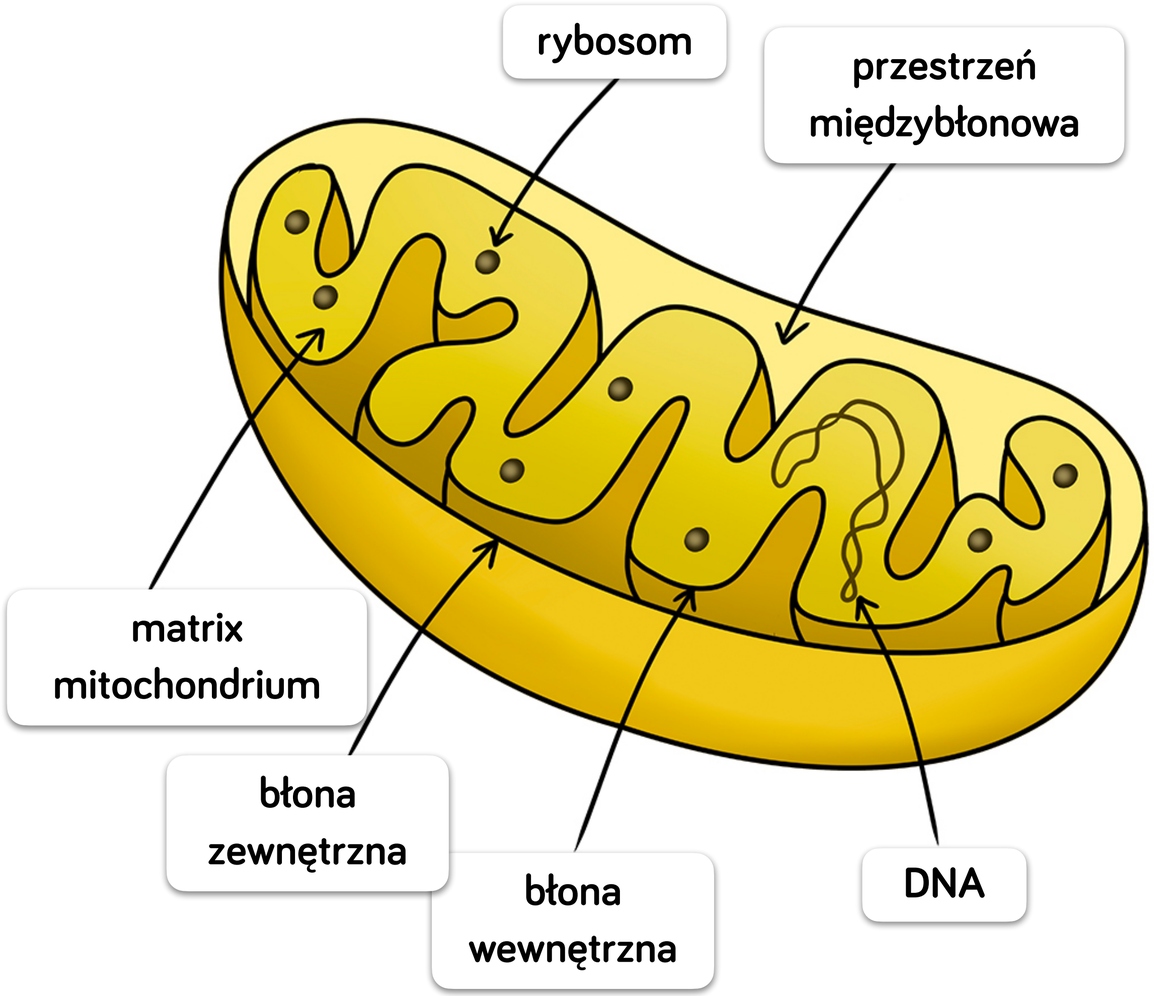


Oddychanie tlenowe w komórkach **eukariotycznych** przebiega w czterech etapach:

1. **glikoliza** - zachodzi w cytozolu komórki
2. **reakcja pomostowa** - zachodzi w matrix mitochondrium
3. **cykl Krebsa** - zachodzi w matrix mitochondrium
4. **łańcuch oddechowy** - zachodzi w wewnętrznej błonie mitochondrium

W komórkach **prokariotycznych** pierwsze etapy zachodzą w **cytozolu**, a łańcuch oddechowy w **błonie komórkowej**, która tworzy liczne wpuklenia.

PRZYPOMNIENIE BUDOWY MITOCHONDRIUM :)



Mitochondria to owalne lub cylindryczne organella komórkowe. Mitochondrium składa się z dwóch błon:

- błony **zewnętrznej**,
- błony **wewnętrznej**, która jest silnie pofałdowana i tworzy **grzebienie mitochondrialne**.

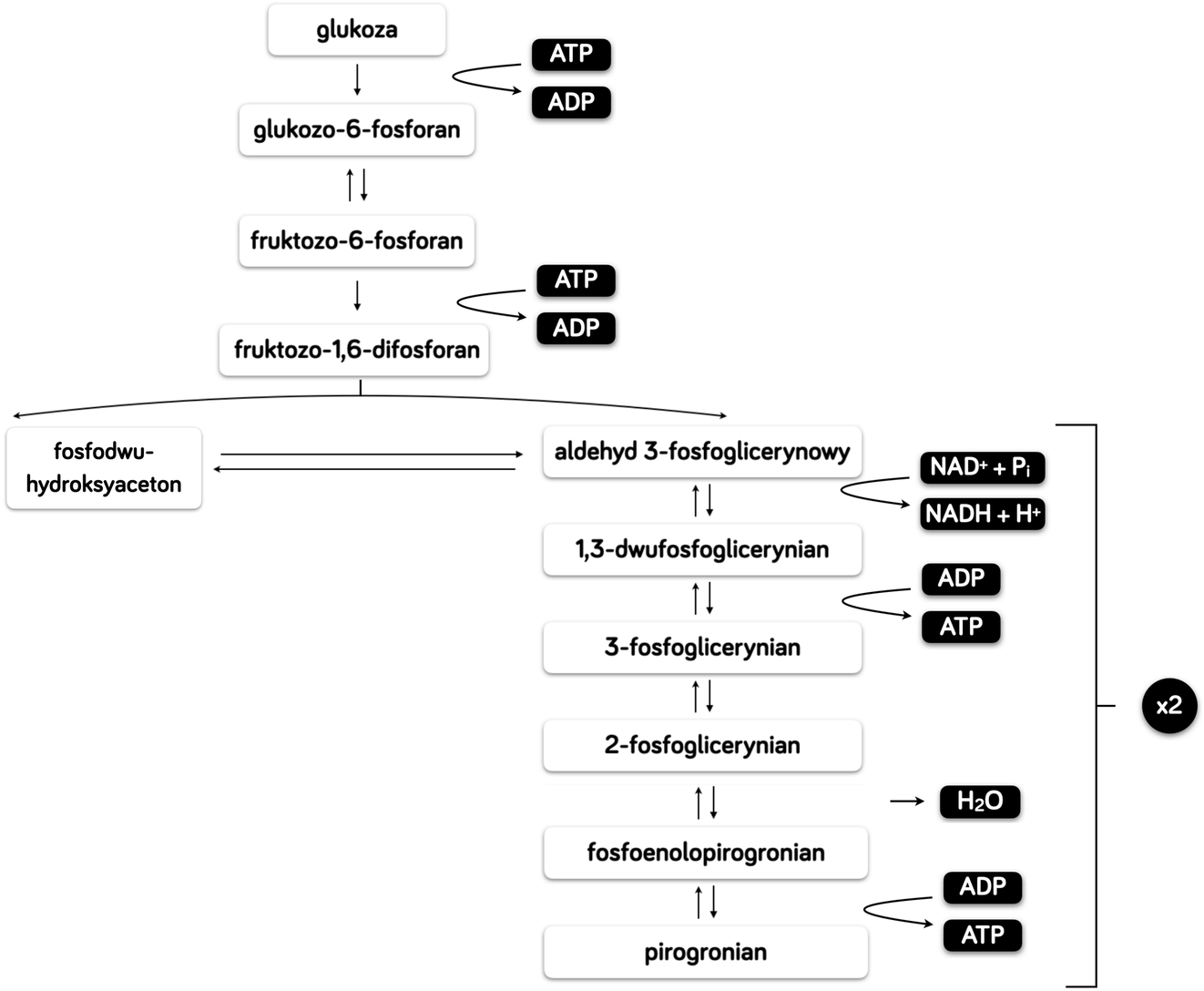
Pomiędzy nimi występuje **przestrzeń międzybłonowa** (perimitochondrialna).

Wnętrze mitochondrium wypełnia **matrix** (macierz) mitochondrium.

GLIKOLIZA

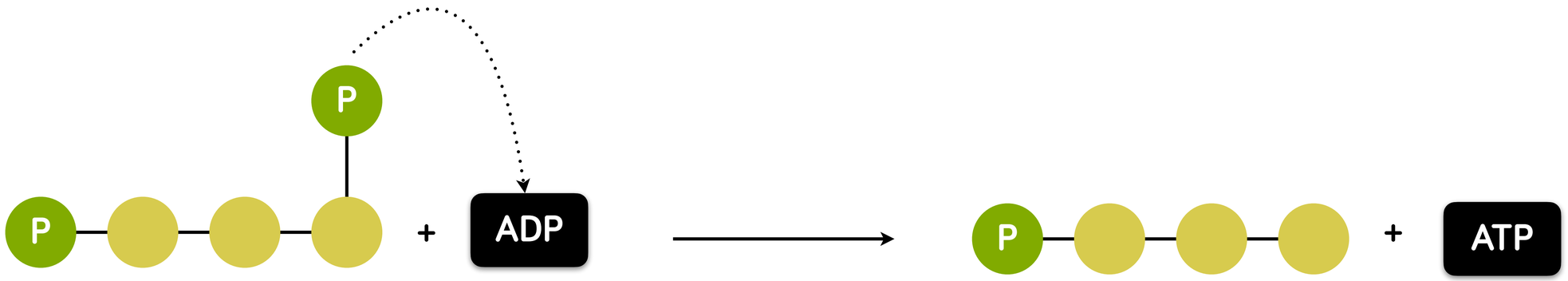
Glikoliza to szlak metaboliczny, który w całości przebiega w **cytozolu**. Substratem w tym szlaku jest **jedna cząsteczka glukozy**, która **ulega rozkładowi** i utlenieniu do **dwóch cząsteczek pirogronianu**.

W trakcie glikolizy **wytwarzane są cztery cząsteczki ATP**, ale dwie z nich są zużywane, więc zysk to **dwie cząsteczki ATP.** Produktami są także **dwie cząsteczki zredukowanego NADH + H^+**, które trafiają na **łańcuch oddechowy.**



FOSFORYLACJA SUBSTRATOWA

ATP w glikolizie powstaje na drodze **fosforylacji substratowej**



organiczny substrat

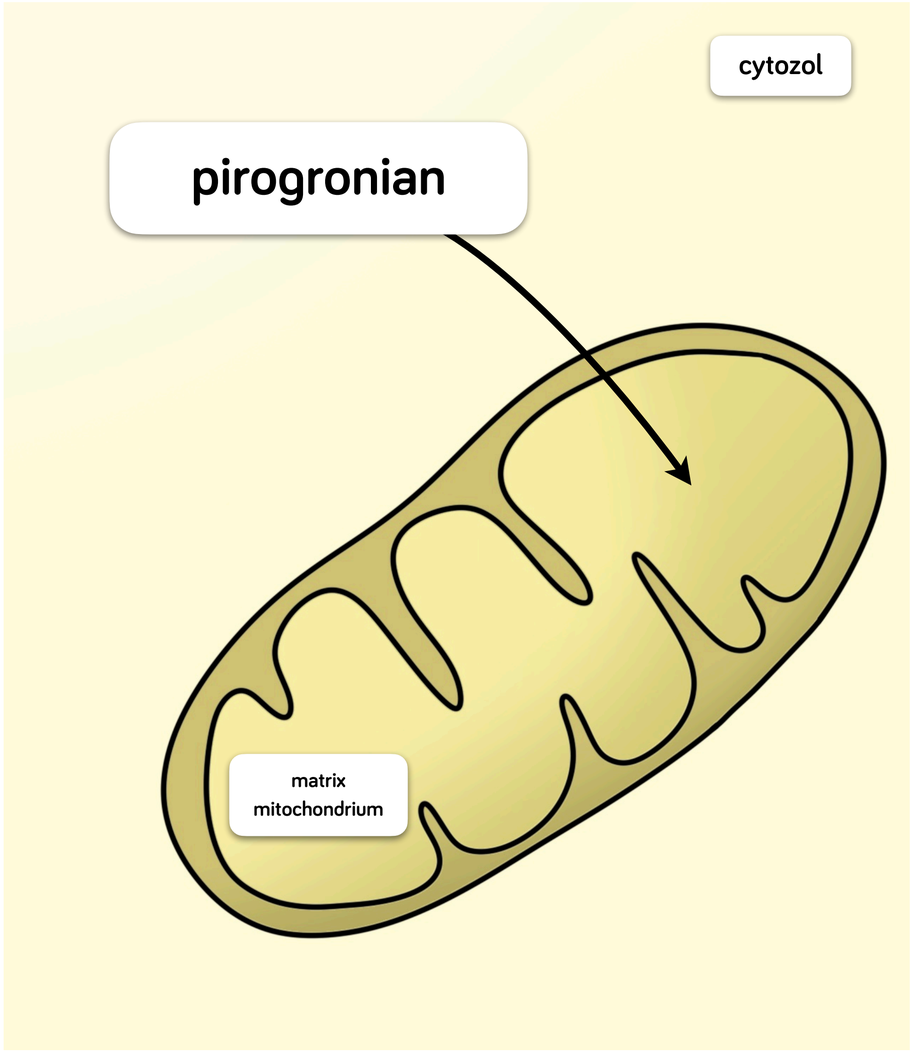
1,3-difosfoglicerynian

organiczny produkt

3-fosfoglicerynian

GLIKOLIZA

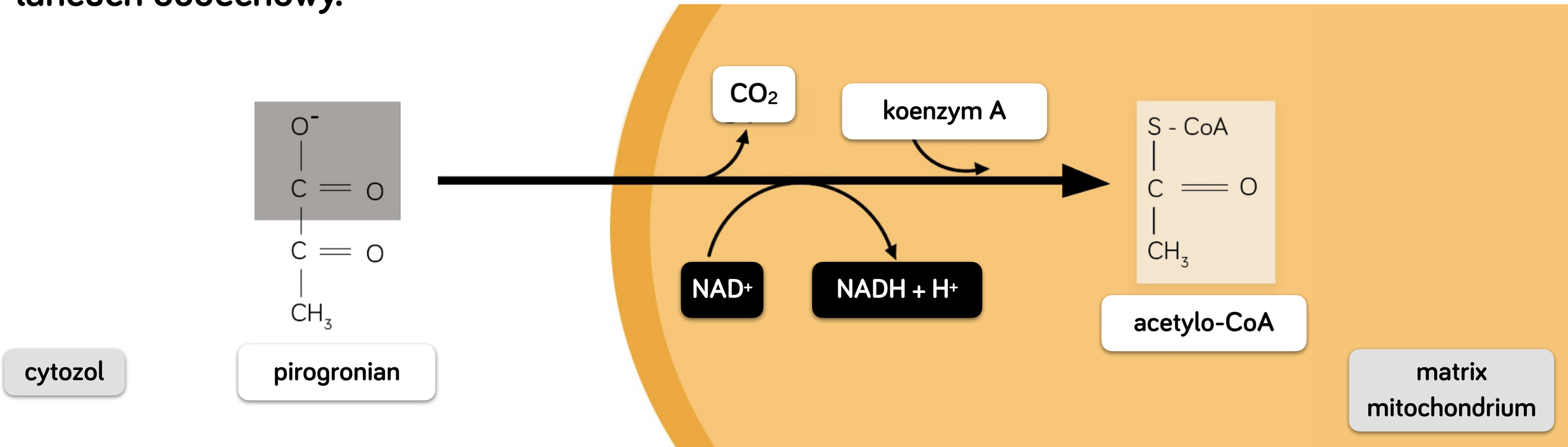
Produkt glikolizy - pirogronian, po jej zakończeniu, jest transportowany z **cytozolu** do **matrix mitochondrium**.



REAKCJA POMOSTOWA

Reakcja pomostowa polega na przekształceniu **pirogronianu** do **acetylokoenzymu A**. Nazywana też jest **oksydacyjną dekarboksylacją pirogronianu.**

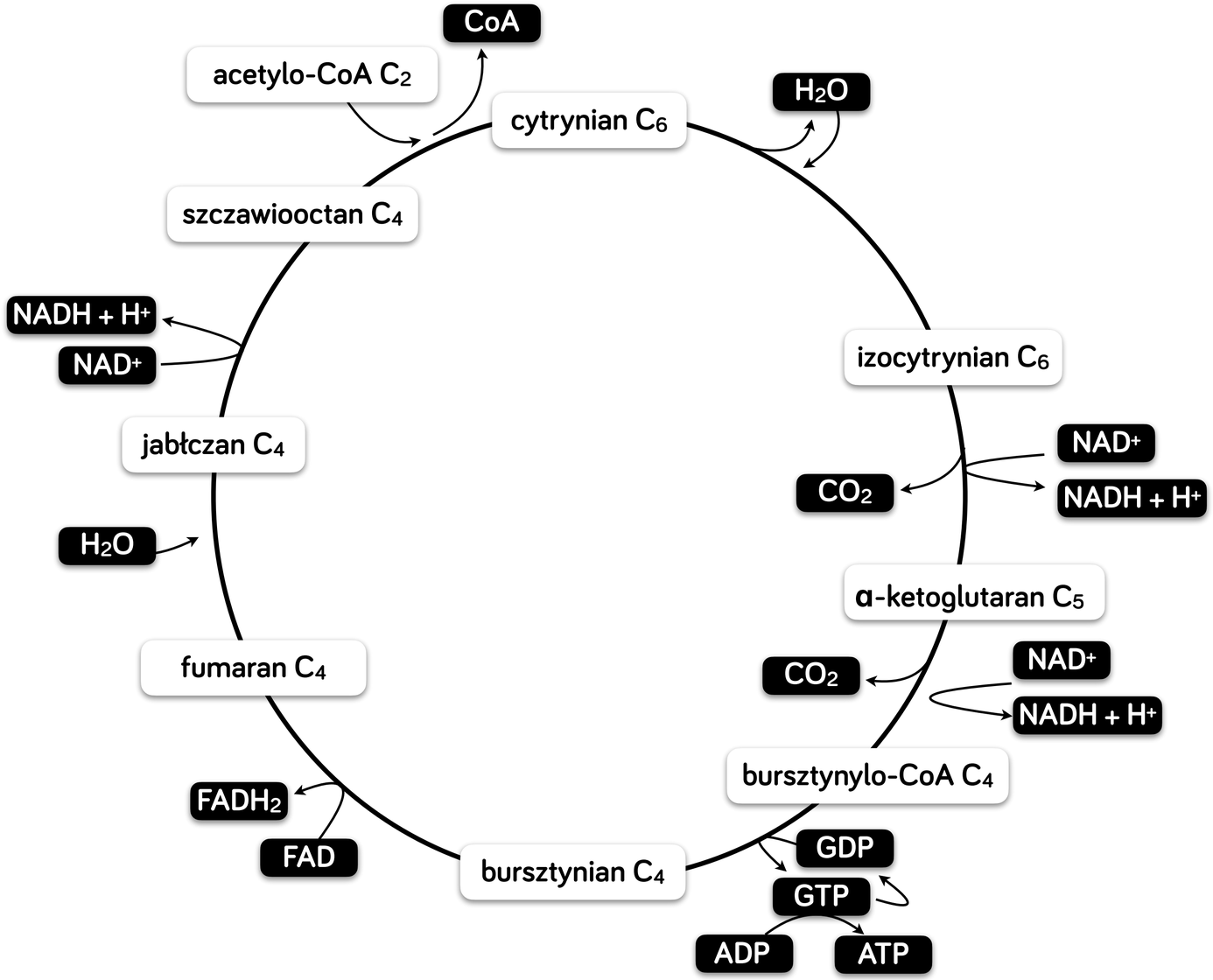
Produktami tej reakcji są: acetylo-CoA, CO_2, NADH + H^+. **Zredukowany NADH + H^+ trafia na łańcuch oddechowy.**



CYKL KREBSA

Cykl Krebsa to cykl przemian metabolicznych. Przebiega w **matrix mitochondrium**.

Substratem tego cyklu jest **acetylo-CoA**, natomiast akceptorem acetylo-CoA jest **szczawiooctan**, który wprowadza grupę acetylową do cyklu. Ze szczawiooctanu i grupy acetylowej powstaje **cytrynian**, który ulega dalszym przemianom. Z tego względu cykl Krebsa jest czasem nazywany **cyklem kwasu cytrynowego**.



CYKL KREBSA



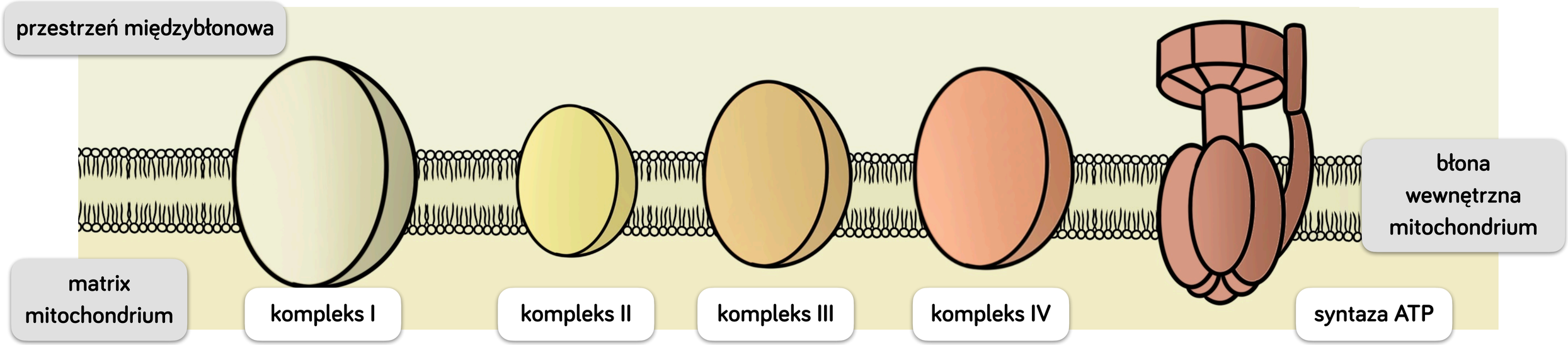
Produktami cyklu Krebsa są: trzy cząsteczki **NADH + H^+**, jedna cząsteczka **$FADH_2$**, dwie cząsteczki **CO_2** oraz cząsteczka **ATP**. ATP powstaje na drodze **fosforylacji substratowej** (tak jak w glikolizie).

Zredukowane przenośniki trafiają na łańcuch oddechowy.

ŁAŃCUCH ODDECHOWY

Łańcuch oddechowy tworzą **cztery duże kompleksy białkowe** (I, II, III, IV) zlokalizowane w **wewnętrznej błonie mitochondrium**. Wszystkie są przenośnikami **elektronów** i są uszeregowane według **wzrastającego potencjału oksydoredukcyjngo**, a trzy z nich (I, III, IV) transportują też **protony**.

Za ostatnim (IV) kompleksem białkowym znajduje się białko - **syntaza ATP**, która odpowiedzialna jest za **produkcję ATP** z ADP i P_i.



ŁAŃCUCH ODDECHOWY



Na łańcuchu oddechowym dochodzi do **utleniania** zredukowanych przenośników:

- **NADH + H^+** (z udziałem kompleksu I),
- **$FADH_2$** (z udziałem kompleksu II),

które powstały w poprzednich etapach oddychania tlenowego. W wyniku utleniania tych związków uwalniane są **elektrony** i **protony**.

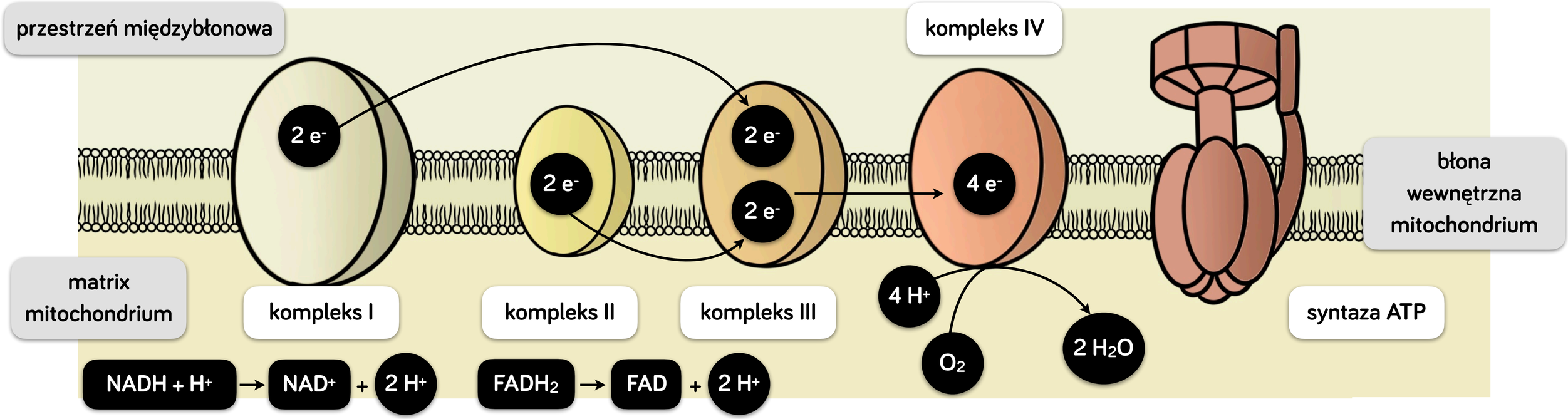
$NADH + H^+ \longrightarrow NAD^+ + 2\,H^+ + 2e^-$

$FADH_2 \longrightarrow FAD + 2\,H^+ + 2e^-$

CO SIĘ DALEJ DZIEJE Z ELEKTRONAMI?

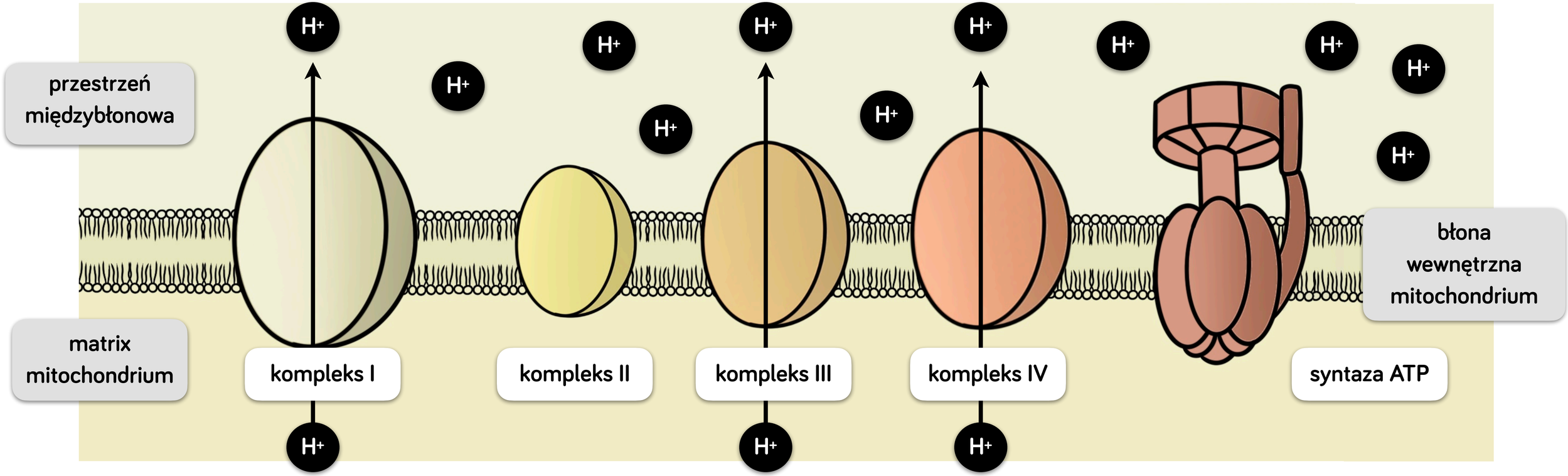
Elektrony są transportowane przez kolejne przenośniki białkowe wzdłuż błony wewnętrznej mitochondrium na **cząsteczkę tlenu** (O_2). Tlen oprócz elektronów, przyjmuje też protony i redukuje się do **cząsteczki wody** (H_2O).

Temu transportowi elektronów towarzyszy **uwolnienie energii** (nie jest to energia w postaci ATP!).



CO SIĘ DALEJ DZIEJE Z PROTONAMI?

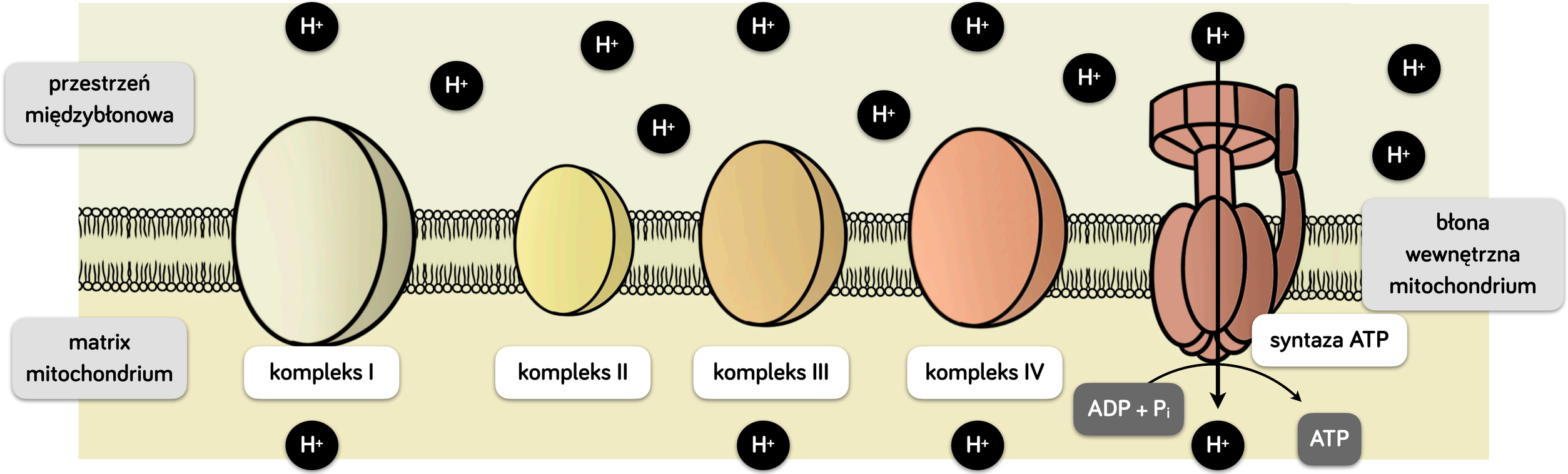
Protony są transportowane na drodze **transportu aktywnego** z **matrix** mitochondrium do **przestrzeni międzybłonowej**. Energia niezbędna w tym transporcie pochodzi z transportu elektronów przez łańcuch przenośników. Protony gromadząc się w przestrzeni międzybłonowej tworzą **gradient protonowy**.



CO SIĘ DALEJ DZIEJE Z PROTONAMI?

Protony **biernie wracają** z **przestrzeni międzybłonowej** do **matrix mitochondrium** przez kanał syntazy ATP. Wytworzony wcześniej **gradient protonowy** jest **siłą napędową** dla **syntazy ATP** do **syntezy ATP**.

Przepływ H^+ przez kanał tego białka wprawia w ruch jego rotor, a główka syntazy dołącza reszty fosforanowe do ADP - dochodzi do zamiany energii **mechanicznej** na **chemiczną** zawartą w **ATP**.



WYJAŚNIJ DLACZEGO ... ?



Wyjaśnij dlaczego po przerwaniu ciągłości błony wewnętrznej mitochondrium synteza ATP nie będzie możliwa.

.....

.....

.....

? WYJAŚNIJ DLACZEGO ... ?



Wyjaśnij dlaczego po przerwaniu ciągłości błony wewnętrznej mitochondrium synteza ATP nie będzie możliwa.

Uszkodzenie błony wewnętrznej mitochondrium uniemożliwi powstanie gradientu protonowego (protony będą swobodnie wracać do matrix) i nie dojdzie do aktywacji syntazy ATP, przez co ATP nie będzie produkowane.

FOSFORYLACJA OKSYDACYJNA



ATP na łańcuchu oddechowym powstaje w wyniku **fosforylacji oksydacyjnej - źródłem energii do jego syntezy jest transport elektronów, redukujących ostatecznie tlen.**

Sumaryczny zapis równania reakcji:

$$ADP + P_i + NADH + H^+ + FADH_2 + O_2 \longrightarrow \mathbf{ATP} + \mathbf{NAD^+} + \mathbf{FAD} + \mathbf{2\ H_2O}$$

BILANS ENERGETYCZNY ODDYCHANIA TLENOWEGO



Aby obliczyć zysk energetyczny z oddychania tlenowego podczas utlenienia **jednej cząsteczki glukozy**, należy:

- zliczyć cząsteczki **ATP**, które powstały podczas glikolizy i cyklu Krebsa (na drodze fosforylacji substratowej)
- zliczyć cząsteczki zredukowanych przenośników **$NADH+H^+$** i **$FADH_2$**, które powstały podczas glikolizy, reakcji pomostowej i cyklu Krebsa

Na uwadze trzeba mieć fakt, że **reakcja pomostowa** zachodzi **dwa razy**, bo w glikolizie powstały dwie cząsteczki pirogronianu z jednej cząsteczki glukozy. **Cykl Krebsa** także ma **dwa obroty**, co wynika z powstania dwóch cząsteczek acetylo-CoA w reakcjach pomostowych.

BILANS ENERGETYCZNY ODDYCHANIA TLENOWEGO



- **glikoliza** = 2 cząsteczki ATP, 2 cząsteczki NADH + H^+
- **reakcja pomostowa** = 2 cząsteczki NADH + H^+
- **cykl Krebsa** = 2 cząsteczki ATP, 6 cząsteczek NADH + H^+, 2 cząsteczki $FADH_2$

NADH + H^+ = 2,5 cząsteczki ATP **$FADH_2$ = 1,5 cząsteczki ATP**

Razem = 4 cząsteczki ATP + 10 cząsteczek NADH + H^+ + 2 cząsteczki $FADH_2$ =

= 4 + 10 x 2,5 + 2 x 1,5 = 4 + 25 + 3 = **32 cząsteczki ATP**

ODDYCHANIE BEZTLENOWE

ODDYCHANIE BEZTLENOWE

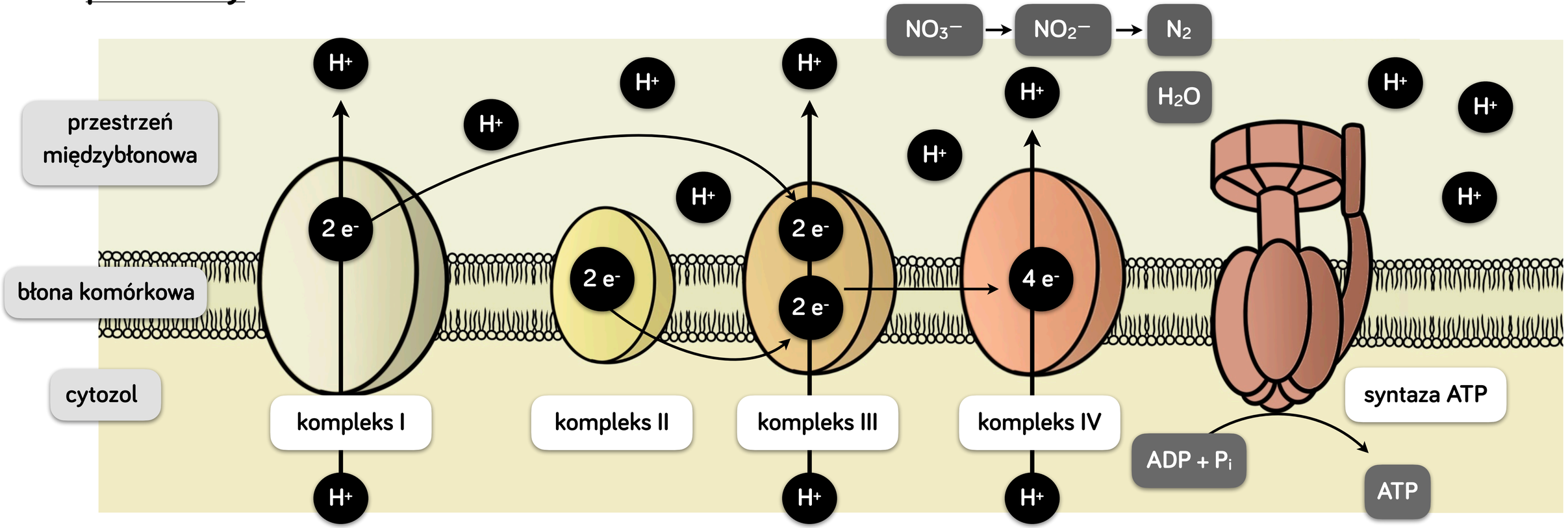


Oddychanie beztlenowe polega na **całkowitym utlenieniu** substratu organicznego w warunkach **beztlenowych**.

W procesie tym zachodzi glikoliza, cykl Krebsa oraz reakcje łańcucha oddechowego. Występuje więc transport elektronów i wytwarzany jest **gradient protonowy**.

CO SIĘ DALEJ DZIEJE Z PROTONAMI?

Protony są transportowane na drodze **transportu aktywnego** z **cytozolu** do **przestrzeni międzybłonowej**. Energia niezbędna w tym transporcie pochodzi z transportu elektronów przez łańcuch przenośników. Protony gromadząc się w przestrzeni międzybłonowej tworzą **gradient protonowy**.





Ostatnim akceptorem elektronów **nie jest jednak tlen** (różnica z oddychaniem tlenowym), a **siarczany**, **azotany** lub inne cząsteczki, najczęściej **nieorganiczne**.

W efekcie **produktami oddychania beztlenowego** są: dwutlenek węgla, woda, związek nieorganiczny oraz ATP.

Przykładem oddychania beztlenowego jest **denitryfikacja**, czyli proces redukcji **azotanów do azotu.**

ORGANIZMY PRZEPROWADZAJĄCE ODDYCHANIE BEZTLENOWE

Oddychanie beztlenowe przeprowadzają wyłącznie niektóre bakterie, np. **bakterie denitryfikacyjne** żyjące w glebie.

Proces ten u bakterii zachodzi w **cytozolu** oraz w **błonie komórkowej**.



na zdjęciu lotniczym wód przybrzeżnych widoczne są zielone smugi, które wskazują na przerost bakterii redukujących siarczany.

FERMENTACJA

CZYM JEST FERMENTACJA?



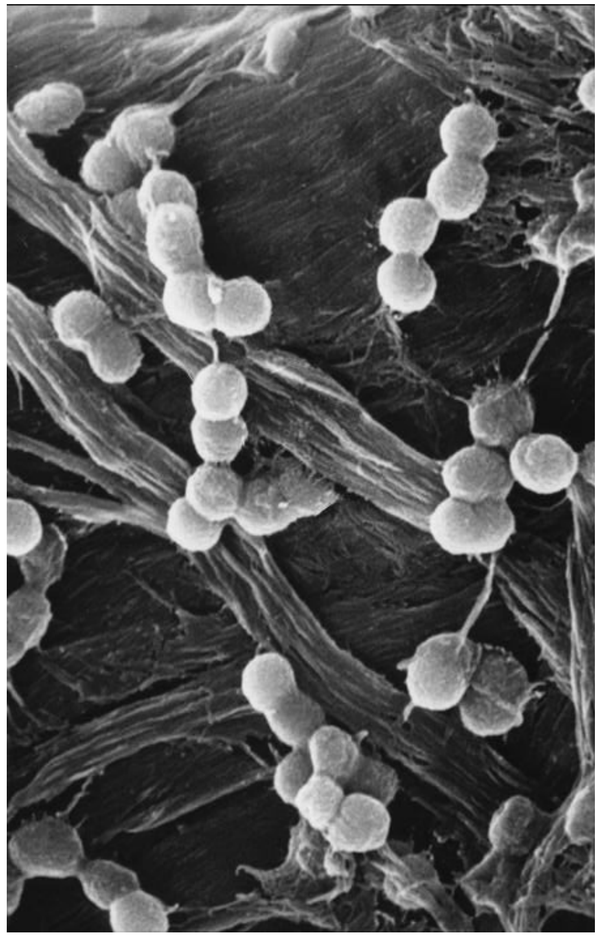
Fermentacja polega **na niecałkowitym utlenieniu substratu organicznego - glukozy w warunkach beztlenowych.**

Podczas fermentacji **nie zachodzi transport elektronów, nie jest wytwarzany gradient protonów.** ATP powstaje więc tylko w wyniku **fosforylacji substratowej**.

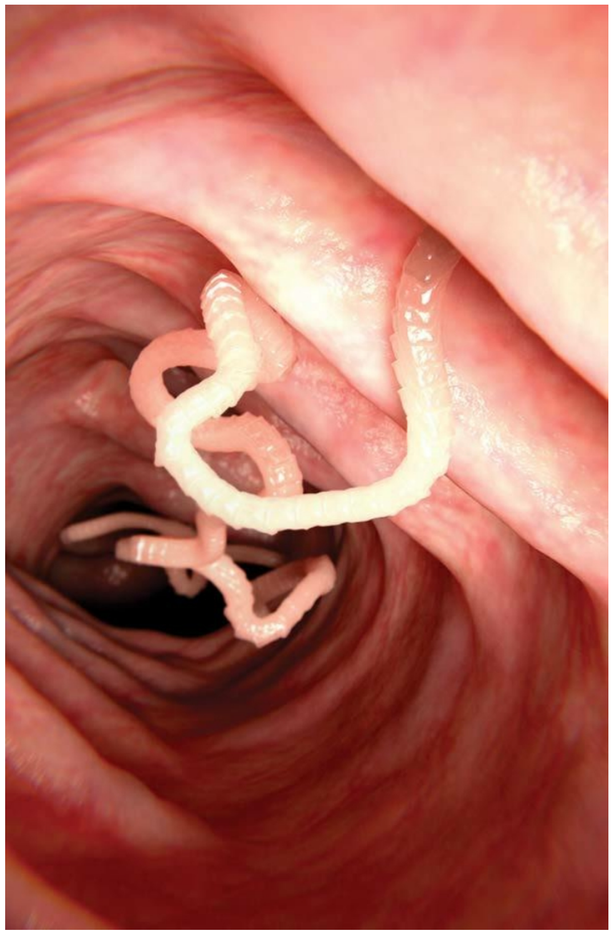
W zależności od produktu ostatecznego wyróżnia się m.in.:

- fermentację **alkoholową**: $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$ + energia
- fermentację **mleczanową / mlekową**: $C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ CH_3CHOHCOOH$ + energia

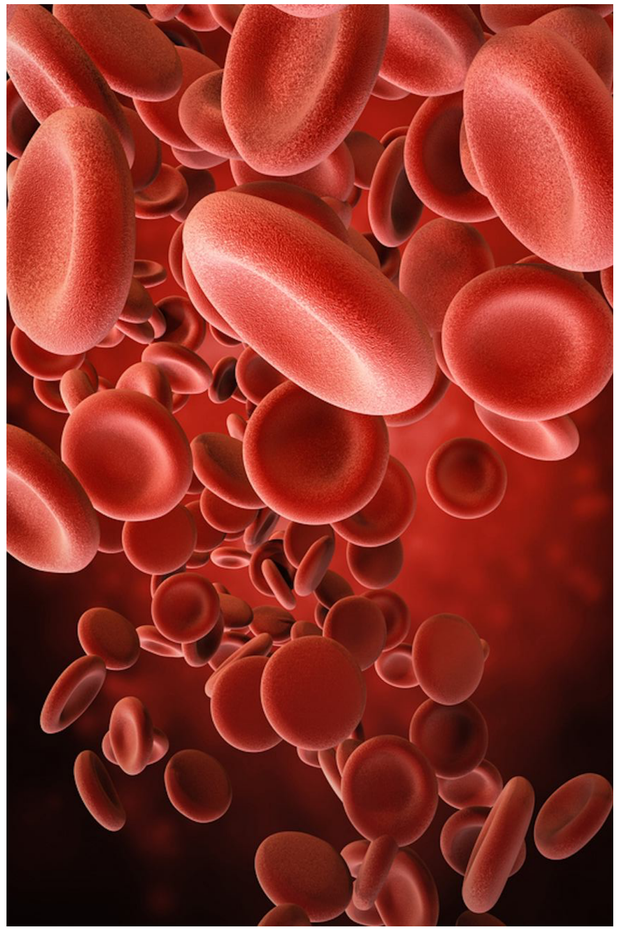
FERMENTACJA



mikroorganizmy obecne w żołądku przeżuwaczy



pasożyty układu pokarmowego człowieka



erytrocyty ssaków

LOKALIZACJA I PRZEBIEG FERMENTACJI



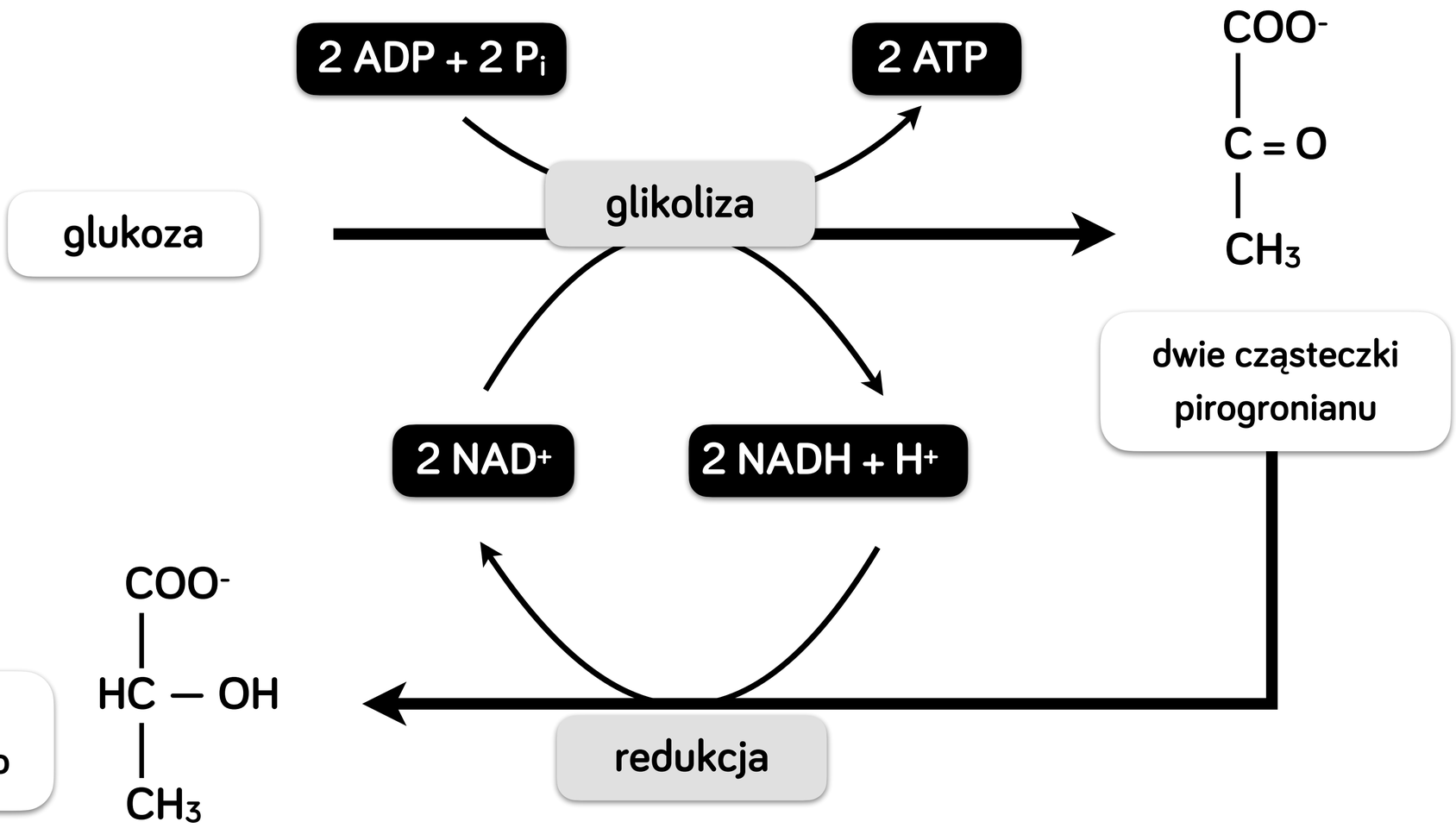
Fermentacja zachodzi w całości w **cytozolu**.

Fermentacja składa się z **dwóch etapów**:

1. **glikoliza** - polega na rozkładzie glukozy do 2 cząsteczek **pirogronianu**, powstają też 2 cząsteczki **ATP** i 2 cząsteczki **NADH + H^+** (jej przebieg jest identyczny jak w oddychaniu tlenowym)

2. **redukcja** - polega na redukcji **pirogronianu do mleczanu** (w fermentacji mleczanowej) lub redukcji **etanalu do etanolu** (w fermentacji alkoholowej); podczas niej **dochodzi do odtworzenia NAD^+** niezbędnego do zajścia etapu 1.

PRZEBIEG FERMENTACJI MLECZANOWEJ



ORGANIZMY PRZEPROWADZAJĄCE FERMENTACJĘ MLECZANOWĄ

Fermentację mleczanową przeprowadzają niektóre **bakterie (Lactobacillus)** oraz **grzyby (Penicillium glaucum)** Organizmy te są wykorzystywane w **przemyśle mleczarskim** przy produkcji jogurtów i serów pleśniowych, czy też **do kiszenia warzyw** (ogórków, kapusty).

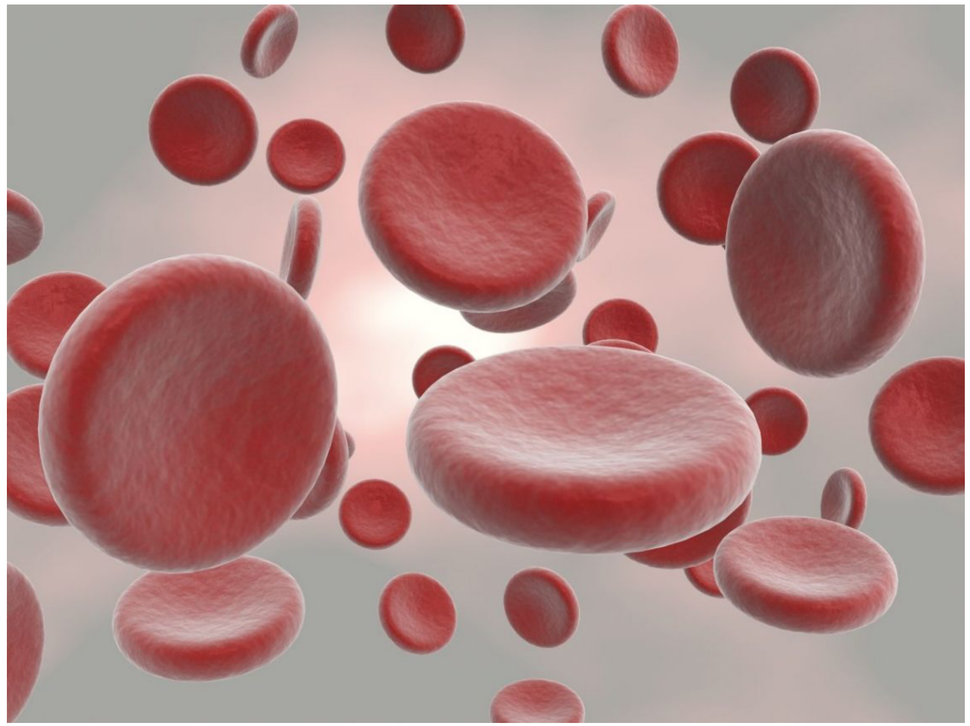


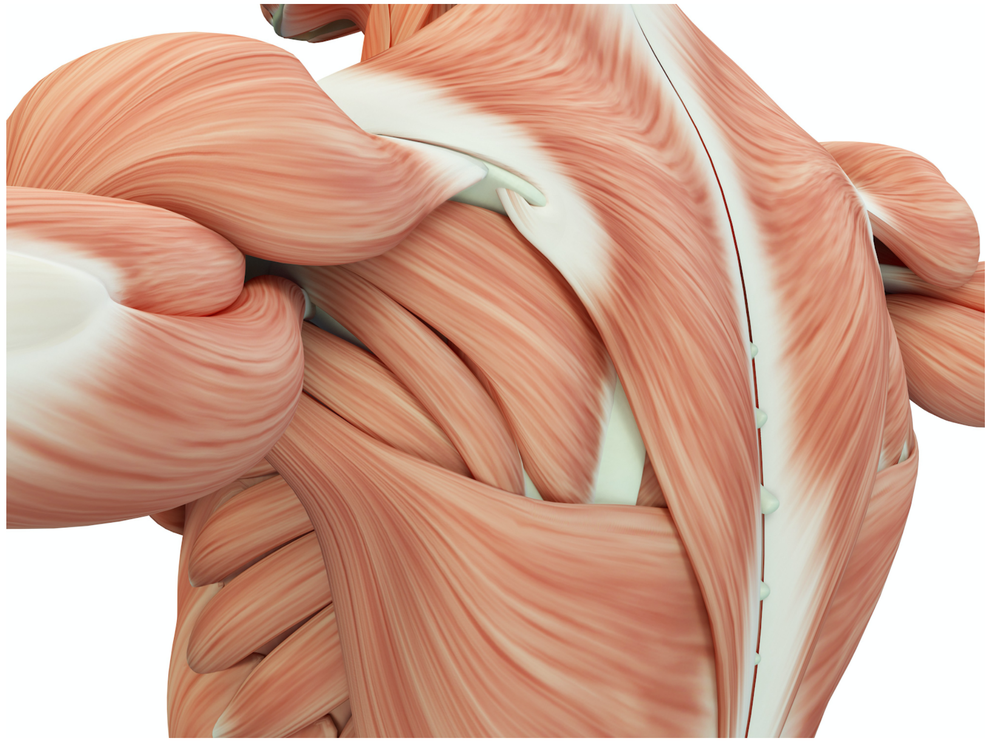


cukry obecne w serach i warzywach są rozkładane przez grzyby i bakterie do mleczanu

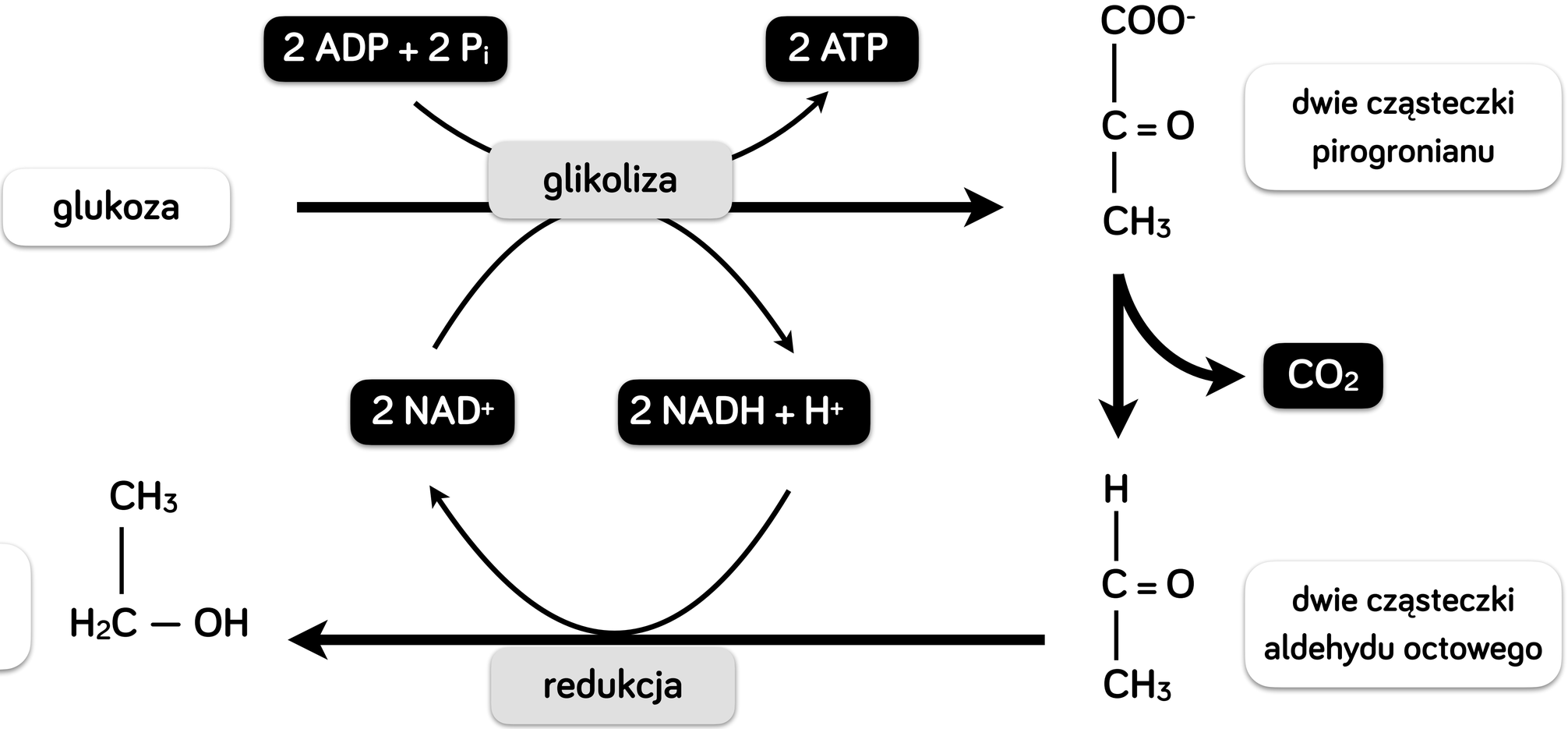
FERMENTACJA MLECZANOWA U CZŁOWIEKA

U człowieka fermentacja mleczanowa zachodzi w **erytrocytach**, które nie mają mitochondriów i przez to nie mogą przeprowadzać oddychania tlenowego - energię uzyskują więc na drodze beztlenowej. **Mięśnie szkieletowe**, w sytuacji deficytu tlenowego, także przeprowadzają fermentację mleczanową.





PRZEBIEG FERMENTACJI ALKOHOLOWEJ



ZASTOSOWANIE FERMENTACJI ALKOHOLOWEJ

Fermentacje alkoholowa jest wykorzystywana w przemyśle spożywczym do produkcji **ciast** czy **alkoholu** - wina, piwa.



drożdże spożywcze



ciasto do wyrobu chleba

! POD KLUCZ !



Dlaczego błędne jest sformułowanie:

„erytrocyty oddychają beztlenowo,

czyli przeprowadzają fermentację mlekową”?

Jak już wiemy, oddychanie beztlenowe a fermentacja to zupełnie różne procesy i nie wolno ich używać zamiennie.

Poprawne sformułowanie brzmi:

„erytrocyty uzyskują energię na drodze beztlenowej -

przeprowadzają fermentację mlekową”.

DROGI PRZEMIANY PIROGRONIANU



PIROGRONIAN

ODDYCHANIE TLENOWE

jest przekształcany
w reakcji pomostowej
do acetylo-CoA, który
wchodzi do cyklu Krebsa

FERMENTACJA MLEKOWA

jest przekształcany
do kwasu mlekowego
(mleczanu)

FERMENTACJA ALKOHOLOWA

jest przekształcany
do aldehydu octowego,
a potem do alkoholu
etylowego (etanolu)

PORÓWNANIE WYDAJNOŚCI ENERGETYCZNEJ



ODDYCHANIE TLENOWE	ODDYCHANIE BEZTLENOWE	FERMENTACJA
największa wydajność energetyczna	**średnia** wydajność energetyczna*	**mała** wydajność energetyczna
32 cząsteczki ATP	mniej cząsteczek ATP niż w oddychaniu tlenowym, ale więcej niż w fermentacji	**2** cząsteczki ATP

*zależy od gatunku i szczepu bakterii

GLIKOGENOLIZA

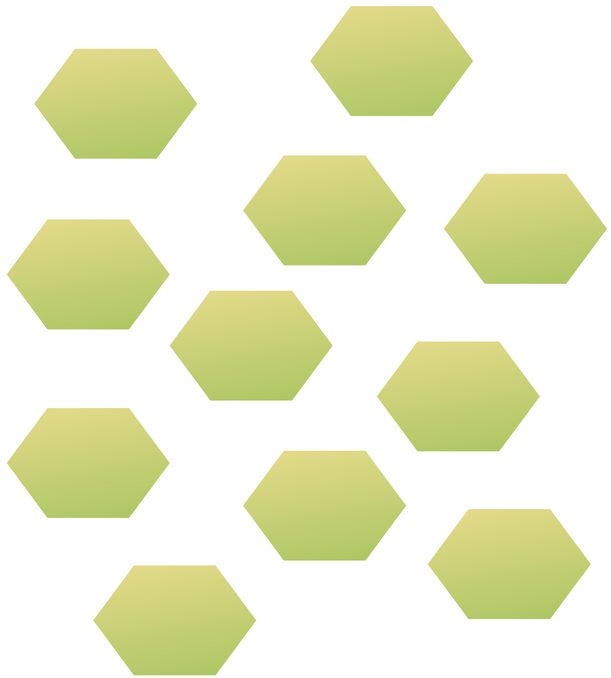
GLIKOGENOLIZA



Glikogenoliza to proces rozkładu **glikogenu** do **glukozy**. Proces ten zachodzi w **wątrobie** i **mięśniach szkieletowych**.

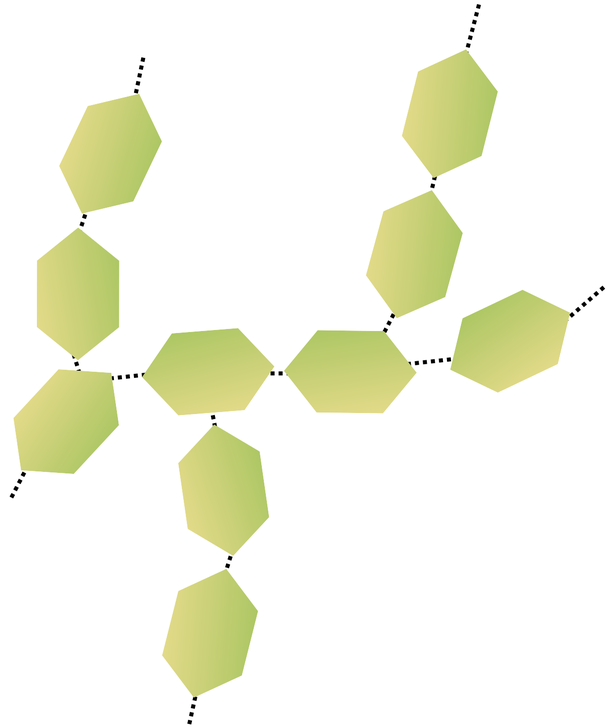
Glikogen to polisacharyd (cukier złożony), który ma rozgałęzione łańcuchy. W jego cząsteczce występują dwa rodzaje wiązań, stąd w glikogenolizie udział bierze kilka enzymów:

- w odcinkach **prostych** reszty glukozy połączone wiązaniami **α-1,4-glikozydowymi**
- w **punktach rozgałęzienia** reszty glukozy połączone są wiązaniami **α-1,6-glikozydowymi**.



GLIKOGENOGENEZA

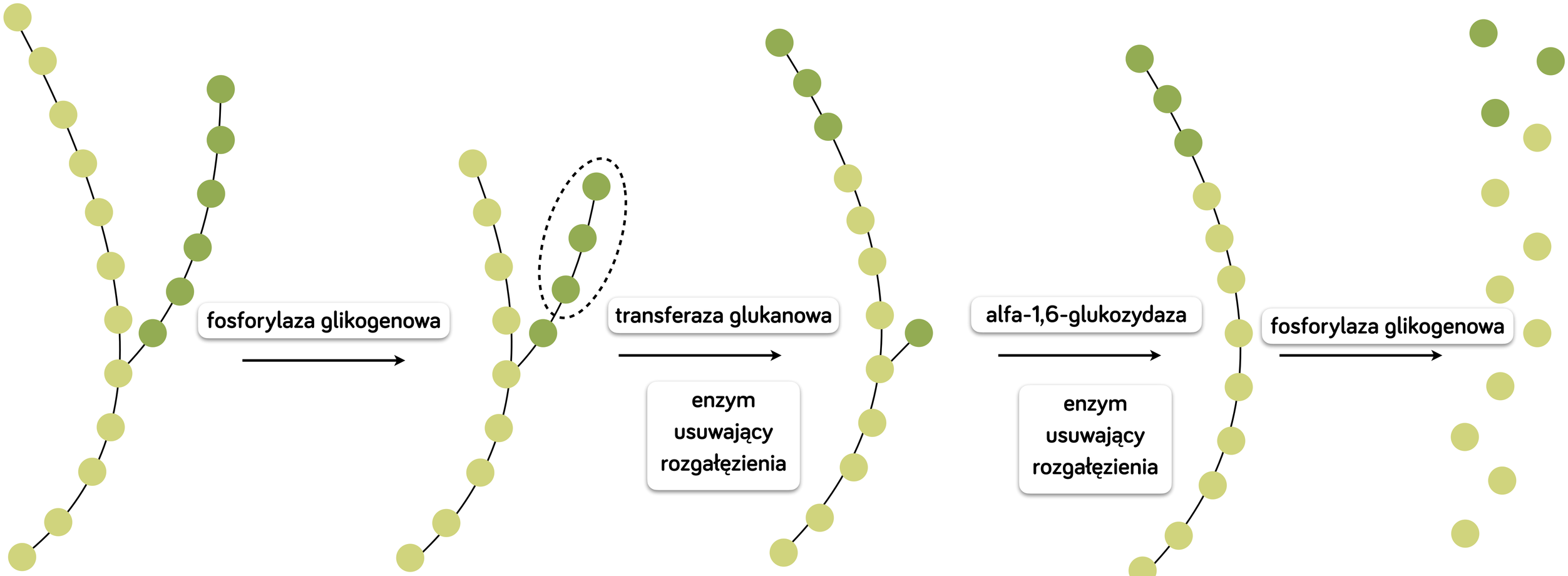
GLIKOGENOLIZA



glukoza

glikogen

PRZEBIEG GLIKOGENOLIZY



ZNACZENIE GLIKOGENOLIZY



Glikogenoliza jest ważnym procesem, który może szybko dostarczyć organizmowi glukozę lub jej fosforan w odpowiedzi na nagłe zapotrzebowanie na energię.

Glikogenoliza nasila się, gdy **maleje stężenie ATP i glukozy w komórce** – w wątrobie w okresie **głodu**, a w mięśniach w okresie **intensywnego wysiłku**.

Proces pobudzany jest również przez hormony: przez **adrenalinę**, **glukagon** i **trójjodotyroninę**.