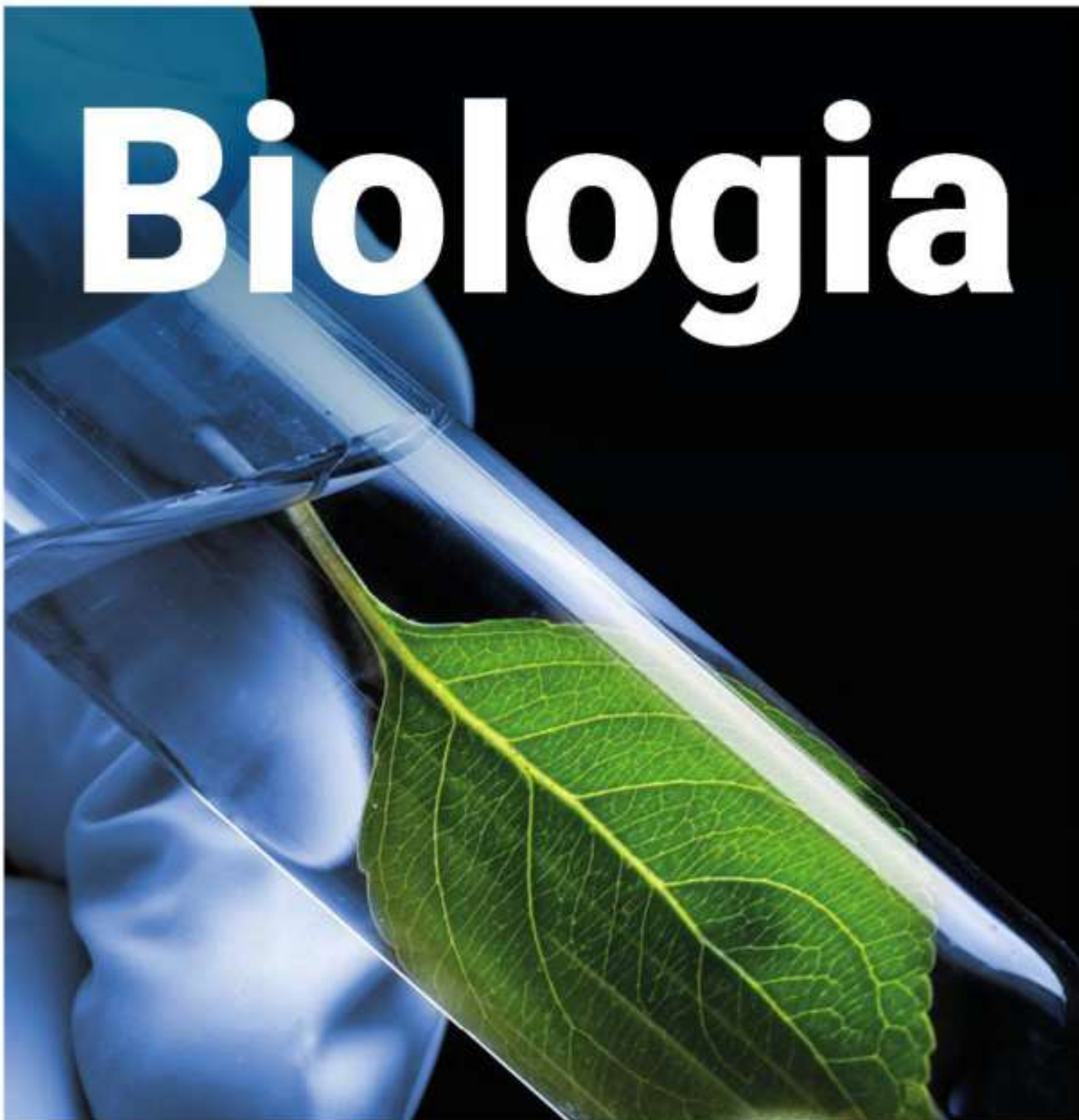


Biologia



Zmiana MEN 2024



Oznaczono usunięte
i zmienione treści

1

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**

Beata Jakubik
Renata Szymańska

Biologia

Podręcznik dla **szkół ponadpodstawowych**



ZAKRES ROZSZERZONY

 **OPERON**
Edukacja jest podróżą

2019

Konsultacja naukowa: dr Sławomir Nowak
Projekt okładki: Paweł Kwacz
Redaktor prowadzący: Izabela Kulaszewicz
Redakcja językowa: Monika Turata
Redakcja graficzna i skład: Andrzej Puzyński, Roman Osiński
Fotoedycja: Marta Jasińska
Korekta techniczna: Katarzyna Kupracz

Zdjęcia: Shutterstock, Wikipedia/Mnolf/GFDL & CC BY-SA 2.0, Wikipedia/NEON ja/CC BY-SA 3.0

OPERON oświadcza, że z należytą starannością podjął wszelkie działania zmierzające do powiadomienia podmiotów majątkowych praw autorskich do utworów słownych i fotograficznych wykorzystanych w podręczniku o zamiarach publikacji celem uzyskania od twórców lub ich następców prawnych wymaganej zgody za przysługującym wynagrodzeniem w stosownej wysokości. Osoby, których prawa w sposób niezawiniony przez wydawnictwo zostały naruszone, prosimy o bezpośredni kontakt z wydawcą.

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania biologii w zakresie podstawowym na poziomie szkoły ponadpodstawowej, na podstawie opinii rzeczoznawców: prof. dr. hab. Jacka Bieleckiego, dr Marii Pedryc-Wrony, dr Henryki Kaczorowskiej.

Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: szkoła ponadpodstawowa
Rok dopuszczenia: 2019

Numer dopuszczenia: 1056/1/2019

© Copyright by OPERON Sp. z o.o. & Beata Jakubik i Renata Szymańska

Gdynia 2019
Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie w całości lub we fragmentach bez zgody wydawcy zabronione.
N6821

Wydawca:
OPERON Sp. z o.o.
81-212 Gdynia, ul. Hutnicza 3
tel. centrali 58 679 00 00
e-mail: info@operon.pl
www.operon.pl

ISBN 978-83-7879-961-0

Zgodnie z decyzją MEN od września 2024 r. obowiązuje zmieniona, uszczuplona o ok. 20% podstawa programowa. W związku z tym w podręczniku znalazły się stosowne oznaczenia.



Takim symbolem oznaczono treści usunięte z podstawy programowej.



Takim symbolem oznaczono treści, które zostały zmienione. Nauczyciel przedstawi uczniowi zmiany i wyjaśni, czego powinien się nauczyć.

Spis treści

Wstęp.....	4
------------	---

I. Badania biologiczne

1. Metody w badaniach biologicznych.....	8
2. Metody badawcze stosowane w biologii komórki	13

II. Chemiczne podstawy życia

1. Skład chemiczny organizmu.....	24
2. Rodzaje wiązań chemicznych	31
3. Budowa i właściwości wody	36
4. Organiczne związki węgla	42
5. Węglowodany – budowa i znaczenie.....	45
6. Lipidy – budowa i znaczenie biologiczne	58
7. Białka – najważniejszy składnik organizmu	70
8. Budowa i funkcje kwasów nukleinowych.....	85

III. Komórka – podstawowa jednostka życia

1. Komórkowa budowa organizmów.....	100
2. Porównanie komórki eukariotycznej i prokariotycznej.....	103
3. Budowa i funkcje błon biologicznych	108
4. Transport przez błony biologiczne.....	113
5. Jądro komórkowe – centrum informacji komórki	124
6. Cytoplazma – wewnętrzne środowisko komórki.....	130
7. System wewnątrzkomórkowych błon plazmatycznych.....	135
8. Organelle komórkowe otoczone dwiema błonami.....	144
9. Organelle właściwe tylko dla niektórych typów komórek. Połączenia między komórkami	152

IV. Metabolizm

1. Podstawowe zasady metabolizmu	172
2. Enzymy – biologiczne katalizatory.....	179
3. Oddychanie komórkowe.....	196
4. Oddychanie beztlenowe i fermentacja.....	206
5. Inne procesy metaboliczne.....	211
6. Fotosynteza	217
7. Chemosynteza	238

V. Podziały komórkowe

1. Przebieg cyklu komórkowego	248
2. Mitoza.....	251
3. Inne sposoby podziału jądra komórkowego	258
4. Mejoza.....	262

Słowniczek trudniejszych pojęć.....	273
-------------------------------------	-----

Indeks.....	279
-------------	-----

Wstęp

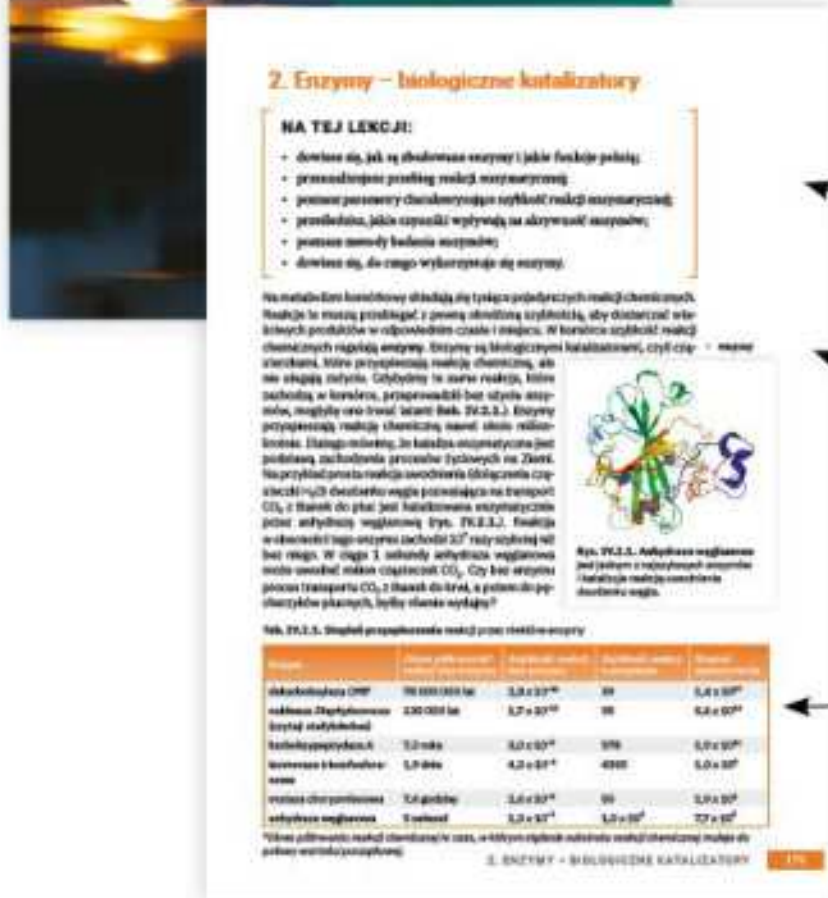
Jak jest zbudowany nasz podręcznik

Podręcznik pozwala na pełne wykorzystanie nowoczesnych metod dydaktycznych w nauczaniu biologii. Zgodnie z założeniami reformy programowej uczniowie I klasy liceów i techników rozpoczną naukę tego przedmiotu w zakresie rozszerzonym w zwiększonym wymiarze godzin.

Zanim zaczniecie korzystać z podręcznika, zapoznajcie się z jego budową i przyjrzyjcie się wszystkim jego elementom. Zostały one skonstruowane tak, by ułatwić wam naukę i pomóc w błyskawicznym znalezieniu potrzebnych informacji.



Każdy dział podręcznika otwiera **spis tematów** z danego obszaru.



Bezpośrednio pod tytułem rozdziału znajdziecie moduł **„Na tej lekcji”** – jego zadaniem jest ukierunkowanie was na cele realizowane w danym temacie.

Hasła na marginesach to treści obowiązkowe do zapamiętania z lekcji. Zostaną powtórzone w podsumowaniu lekcji. Pozostałe ważne hasła zapisano szarym kolorem.

Tabele pomogą wam usystematyzować wiedzę.

Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek. Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek. Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

Obserwacja

1. Obserwacja komórek zwierzęcych i roślinnych. Z komórek zwierzęcych (np. ludzkiej skóry) i roślinnych (np. cebuli) obserwujemy różnice w budowie i funkcjonowaniu.



2. Obserwacja komórek zwierzęcych i roślinnych. Z komórek zwierzęcych (np. ludzkiej skóry) i roślinnych (np. cebuli) obserwujemy różnice w budowie i funkcjonowaniu.



Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek. Wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

Przystępny język publikacji ułatwi wam zrozumienie treści i pozytywnie nastawi was do powtarzania materiału. W tekście pojawiają się wytłuszczenia – dzięki nim łatwiej odnajdziecie najistotniejsze zagadnienia, pojęcia i nazwy.

Obserwacje i eksperymenty to bloki zadań, w których pracujecie projektowo. Umożliwi to wam zrozumienie zagadnień biologicznych poprzez działanie. Przekonacie się, że nauka biologii jest ciekawa.

Podkreśleniem wyróżniono **trudne pojęcia**, których wyjaśnienie znajdziecie w słowniczku.

Podsumowanie przed sprawdzianem zawiera najważniejsze treści do zapamiętania z działu. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok i poszukajcie hasła na marginesie.

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

Metody badań biologicznych	METODA OBSERWACYJNA	METODA DOŚWIADCZALNA
Wzrost komórek	obserwacja pod mikroskopem	obserwacja pod mikroskopem
Przebieg choroby	obserwacja pod mikroskopem	obserwacja pod mikroskopem
Przebieg choroby	obserwacja pod mikroskopem	obserwacja pod mikroskopem
Przebieg choroby	obserwacja pod mikroskopem	obserwacja pod mikroskopem
Przebieg choroby	obserwacja pod mikroskopem	obserwacja pod mikroskopem

Etapy badania biologicznego

1. Określenie problemu badawczego
2. Postawienie hipotezy badawczej

Zadania do rozwiązania przećwiczcie w toku lekcji lub wykorzystajcie do nauki w domu albo przed kartkówką czy sprawdzianem.

Uwaga: odpowiedzi do zadań wymagających pisemnego rozwiązania zapiszcie w zeszycie.

Podsumowanie lekcji to esencja najważniejszych treści do zapamiętania. Jeśli ich nie pamiętacie, wróćcie na stronę wskazaną obok. Znajdziecie tam na marginesie odpowiednie hasło, a w treści lekcji – jego omówienie.

- 1. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
- 2. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
- 3. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
2. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
3. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- 1. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
- 2. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.
- 3. Wzrost komórek – wzrost komórek jest gwałtowny i dotyczy wszystkich w pełni rozwiniętych i zdrowych komórek.

A close-up, artistic photograph of a microscope's objective lens and stage, with a warm, golden light reflecting off the glass surfaces. The image is partially covered by a teal gradient overlay on the right side.

I. Badania biologiczne

- ▶ Metody w badaniach biologicznych
- ▶ Metody badawcze stosowane w biologii komórki

1. Metody w badaniach biologicznych

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jakie metody wykorzystuje się do badań biologicznych;
- prześledzisz etapy badań biologicznych;
- poznasz różnicę pomiędzy próbą kontrolną a badawczą.

biologia
jako nauka

- **Biologia** to fascynująca nauka, która **zajmuje się badaniem życia i organizmów żywych**. Obejmuje wiele dyscyplin, często bardzo od siebie różnych. W biologii mieści się zarówno mikrobiologia, jak i botanika, zoologia, genetyka czy ekologia. W zależności od zastosowanego kryterium można dokonać podziału biologii na różne gałęzie wiedzy (np. biologia na poziomie molekularnym obejmuje biochemię, biologię molekularną i genetykę molekularną, a na poziomie wielokomórkowym – anatomię, fizjologię czy histologię). Szeroki wachlarz dyscyplin pozwala kompleksowo zrozumieć złożoność budowy i funkcjonowania organizmów. Biologia uczy poznawać świat poprzez obserwowanie i eksperymentowanie.

metody badawcze
w biologii

- Podstawą badań naukowych jest logiczne myślenie oraz formułowanie problemów badawczych. Nauki biologiczne opierają się na dwóch metodach badawczych: **obserwacyjnej** oraz **eksperymentalnej**.

metoda
obserwacyjna

- **Metoda obserwacyjna** polega na zamierzonym i zaplanowanym prowadzeniu badań naukowych. Dzięki niej można zdobyć konkretne informacje o organizmach,



Ryc. I.1.1. Metoda obserwacyjna często jest prowadzona w warunkach polowych i polega na opisie oraz dokumentacji wybranych elementów przyrody.

procesach, zależnościach czy zjawiskach. Metoda ta jest nieinwazyjna, to znaczy nie pociąga za sobą żadnych zmian w obserwowanym obiekcie czy procesie. Obserwacja naukowa polega zwykle na opisie badanych elementów przyrody i często prowadzi się ją w warunkach naturalnych (**ryc. I.1.1.**). Metoda obserwacyjna niejednokrotnie stanowi wstęp do kolejnych badań naukowych, a także jeden z etapów doświadczenia (np. obserwacja zmiany koloru roztworu po dodaniu odczynnika, a przed kolejnym pomiarem).

metoda
eksperymentalna

- **Metoda eksperymentalna (doświadczalna)** polega na zamierzonej zmianie warunków lub czynników wpływających na badany organizm. Ma to na celu poznanie zależności przyczynowych leżących u podstaw badanych procesów. Eksperymenty najczęściej prowadzi się w specjalnie przystosowanych do tego celu pomieszczeniach, czyli w **laboratoriach** (**ryc. I.1.2.**). Laboratoria są wyposażone w instrumenty badawcze (np. wirówki, wagi analityczne, spektrofotometry czy mikroskopy), które

umożliwiają wykonanie eksperymentu. Pozwala to na kontrolę warunków przebiegu doświadczenia oraz na wielokrotne jego powtórzenia.



Ryc. I.1.2. Wyposażenie laboratorium biologicznego umożliwia przeprowadzanie badań eksperymentalnych.

Etapy prowadzenia badań biologicznych

Badania biologiczne prowadzi się według **określonego schematu** wraz z zachowaniem wszystkich zasad bezpieczeństwa i etyki. Wyróżniamy następujące etapy badań biologicznych (**tab. I.1.1.**):

◀ schemat badań biologicznych

- **sformułowanie problemu badawczego**, które najczęściej ma postać zdania pytającego. Problem badawczy określa cel badania;
- **postawienie hipotezy badawczej**, która najczęściej ma postać zdania oznajmującego. Hipoteza badawcza jest przewidywaną odpowiedzią na pytanie postawione w problemie badawczym;
- **weryfikacja hipotezy badawczej**, która polega na sprawdzeniu jej poprawności za pomocą metody obserwacyjnej lub eksperymentalnej. W tym celu należy wybrać odpowiedni obiekt badań oraz sposób wykonania eksperymentu. Eksperyment musi być prowadzony według ściśle określonej procedury (instrukcji) uwzględniającej niezbędne odczynniki w odpowiednich stężeniach, materiały oraz potrzebne urządzenia. Badania muszą być powtórzone kilkakrotnie, a uzyskane wyniki powtarzalne (wartości danych muszą być podobne). Przebieg badania wraz z wynikami należy starannie zapisać w taki sposób, aby inna osoba na ich podstawie mogła to badanie powtórzyć;
- **sformułowanie wniosków** będących potwierdzeniem lub zaprzeczeniem hipotezy. Wnioski mogą być wyciągane tylko na podstawie otrzymanych wyników.

Tab. I.1.1. Główne etapy badania biologicznego

BADANIE BIOLOGICZNE
PROBLEM BADAWCZY
HIPOTEZA
WERYFIKACJA HIPOTEZY zaplanowanie eksperymentu wykonanie badań zebranie i opracowanie wyników
WNIOSEK

Zbiorne wyniki uzyskane w trakcie badań biologicznych muszą zostać przeanalizowane i opracowane. Ważnym elementem obróbki danych jest ich **analiza statystyczna**, która pozwala na wykrycie pewnych prawidłowości w badanych zjawiskach. Opracowane dane przedstawia się w formie opisowej, tabelarycznej lub graficznej (np. wykres, diagram, zdjęcie). Tak przygotowane wyniki mogą być udostępnione szerokiemu gronu (np. w trakcie prezentacji lekcyjnych, referatów kół naukowych,

specjalistycznych konferencji czy jako publikacje naukowe). Każde wiarygodne badanie biologiczne jest cegiełką pozwalającą na rozwój nauki. W szerokim wymiarze służy ono całemu społeczeństwu.

Próba kontrolna i badawcza w eksperymentach biologicznych

próba kontrolna
i badawcza

- ▶ W eksperymencie biologicznym konieczne jest określenie próby kontrolnej i próby badawczej. **Próbie kontrolną** stanowią organizmy lub procesy, których nie poddajemy czynnościom doświadczalnym, lecz pozostawiamy w stanie naturalnym. Próba kontrolna to odniesienie dla **próby badawczej**, która obejmuje organizmy lub procesy poddane czynnościom doświadczalnym.

Materiał do badań biologicznych

materiał badawczy

- ▶ Badania biologiczne są przeprowadzane na określonym **materiale badawczym**. Materiałem tym mogą być całe organizmy (rośliny, zwierzęta, bakterie, grzyby) oraz ich części, np. organy roślinne (np. liście) czy zwierzęce (np. wątroba czy serce). Badaniom biologicznym są poddawane także komórki (roślinne lub zwierzęce) oraz wyizolowane z organizmów cząsteczki (białka, kwasy nukleinowe, lipidy).

organizmy
modelowe

- ▶ Badania biologiczne opierają się na **organizmach modelowych**. Model biologiczny jest swego rodzaju reprezentantem innych organizmów, a wyniki uzyskane w trakcie jego badania można odnieść do innych organizmów, podobnych pod względem budowy biochemicznej oraz procesów metabolicznych. Badania na organizmach modelowych zastępują m.in. badania z wykorzystaniem organów czy komórek ludzkich, organizmów chronionych czy organizmów, których np. rozmiar uniemożliwiłby pracę w laboratorium. Do najważniejszych organizmów modelowych wykorzystywanych w biologii zalicza się: mysz (rodzaj *Mus*) – jako model ssaczy (**ryc. I.1.3.**), owad muszka owocowa (*Drosophila melanogaster*, czytaj: drosophila melanogaster), nicienie *Caenorhabditis elegans* (czytaj: kenorabditis elegans), drożdże piekarnicze (*Saccharomyces cerevisiae*, czytaj: sakcharomyces cerewisje), roślina rzodkiewnik pospolity (*Arabidopsis thaliana*, czytaj: arabidopsis taliana) (**ryc. I.1.3.**), a także bakteria pałeczka okrężnicy (*Escherichia coli*, czytaj: eszerichia koli).



Ryc. I.1.3. Przykładowe organizmy modelowe wykorzystywane w biologii: (A) mysz, (B) rzodkiewnik pospolity.

Eksperyment



Przykładowy eksperyment biologiczny

Wprowadzenie: W pewnym sanatorium u 10 pacjentów przeprowadzono test oceny wydolności układu krążenia w warunkach wysiłku fizycznego znany jako próba harwardzka. Pacjentów podzielono na dwie grupy (po 5 osób): grupa I to pacjenci niepalący papierosów (**próba kontrolna**), a grupa II to pacjenci palący papierosy (**próba badawcza**). Próba harwardzka polega na wykonywaniu ćwiczeń przez badaną osobę w określonym czasie oraz następujących po tym trzech pomiarach tętna. Z uzyskanych wyników wylicza się wartość tzw. indeksu fitness (FI) według wzoru: $FI = \text{czas pracy w sekundach} \times 100/2 \times \text{suma trzech pomiarów tętna}$. Uzyskane wyniki porównuje się z tabelą opracowaną przez autorów tego testu (patrz niżej).

Problem badawczy: Czy palenie papierosów ma wpływ na wydolność układu krążenia?

Hipoteza badawcza: Palenie papierosów obniża wydolność układu krążenia.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: W pojedynczym eksperymencie brały udział dwie osoby (osoba badana oraz asystent). Badana osoba przez 5 minut wchodziła na stopień schodów i schodziła z niego w tempie 30 wejść na minutę, a osoba asystująca dyktowała tempo ćwiczenia. Po wysiłku osoba badana odpoczywała przez 1 minutę, a następnie asystent wykonywał u niej pomiar tętna na tętnicy szyjnej, który trwał 30 s (pomiar I). Po upływie 2 minut czynność tę powtórzono (pomiar II), a ostatni pomiar tętna wykonano po upływie 3 minut (pomiar III).

Wyniki: Z pomiarów tętna u każdego z pacjentów wyliczono IF. Wyniki przedstawiono w tabeli:

WYNIKI			
Pacjenci palący papierosy		Osoby niepalące papierosów	
	IF		IF
Pacjent 1	52	Pacjent 1	75
Pacjent 2	60	Pacjent 2	82
Pacjent 3	63	Pacjent 3	88
Pacjent 4	57	Pacjent 4	95
Pacjent 5	58	Pacjent 5	90

Uzyskane wyniki porównano ze skalą sprawności dla próby harwardzkiej:

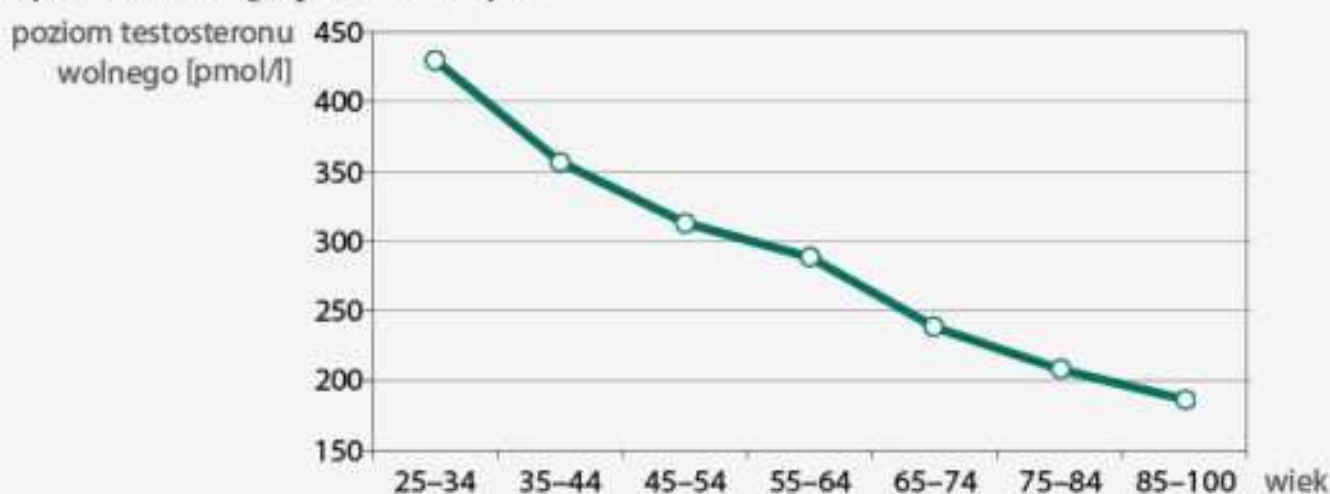
Wskaźnik FI [pkt]	Ocena sprawności
Poniżej 55	Zła
55–64	Poniżej przeciętnej
65–79	Przeciętna
80–89	Dobra
Powyżej 90	Bardzo dobra

Wniosek: Palenie papierosów wpływa na obniżenie wydolności układu krążenia u badanych pacjentów.

W kolejnych rozdziałach podręcznika znajdziesz przykłady eksperymentów i obserwacji biologicznych oznaczonych symbolami  . Ich przeprowadzenie pozwoli ci na zapoznanie się z tą metodą badawczą oraz przybliży specyfikę badań biologicznych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij różnicę pomiędzy metodą obserwacyjną a eksperymentalną.
2. Wymień etapy badania biologicznego.
3. Pewna grupa uczniów postawiła następujący problem badawczy:
Czy światło jest konieczne do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin?
Zaplanuj doświadczenie uwzględniające wszystkie etapy badania biologicznego, które pozwoli odpowiedzieć na postawiony problem badawczy.
4. W dostępnych źródłach znajdź informację na temat zwierzęcych organizmów modelowych i przygotuj krótką notatkę w zeszycie na temat jednego z nich.
5. Testosteron to podstawowy hormon steroidowy odpowiedzialny za kształtowanie się płci i rozwój męskich cech płciowych. Na rysunku przedstawiono wyniki badania poziomu testosteronu u mężczyzn w siedmiu grupach wiekowych.



5.1. Sformułuj problem badawczy do doświadczenia, którego wyniki zobrazowano na powyższym wykresie.

5.2. Wskaż, które z poniższych stwierdzeń mogą stanowić wniosek z analizy danych z wykresu. Przerysuj do zeszytu tabelę i uzupełnij prawą kolumnę.

	Wniosek	Tak/Nie
1.	Poziom testosteronu u mężczyzn zależy od wieku oraz stanu zdrowia.	...
2.	Spadek testosteronu u osób starszych wynika z ograniczonej jego syntezy w jądrach.	...
3.	Poziom testosteronu u mężczyzn zmienia się wraz z wiekiem.	...
4.	Wraz z wiekiem u ludzi dochodzi do znacznego obniżenia syntezy testosteronu.	...

6. W ostatnich latach w Ojcowskim Parku Narodowym były prowadzone dwa badania: „Ocena diety ssaków drapieżnych” oraz „Monitoring wybranych zespołów roślinnych”.

Wyjaśnij, na jakiej metodzie badawczej opierają się te projekty. Uzasadnij swoją odpowiedź.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Biologia zajmuje się **badaniem życia oraz organizmów żywych** i obejmuje wiele dyscyplin. ◀ s. 8
- Nauki biologiczne opierają się na **metodzie obserwacyjnej** oraz **metodzie eksperymentalnej**. ◀ s. 8
- **Metoda obserwacyjna** służy do zbierania danych o organizmach lub procesach i jest metodą nieinwazyjną. ◀ s. 8
- **Metoda eksperymentalna** polega na zamierzonej zmianie warunków procesu lub czynników wpływających na badany organizm. ◀ s. 8
- Badania biologiczne prowadzi się według określonego **schematu**, który obejmuje: sformułowanie problemu badawczego, postawienie hipotezy, weryfikację hipotezy oraz sformułowanie wniosków. ◀ s. 9
- **Eksperyment biologiczny** obejmuje **próbę kontrolną** (w stanie naturalnym) oraz **próbę badawczą** (poddaną czynnościom doświadczalnym). ◀ s. 10
- **Materiałem badawczym** w biologii mogą być organizmy, organy, komórki lub makrocząsteczki. ◀ s. 10
- W badaniach biologicznych wykorzystuje się **organizmy modelowe**. ◀ s. 10

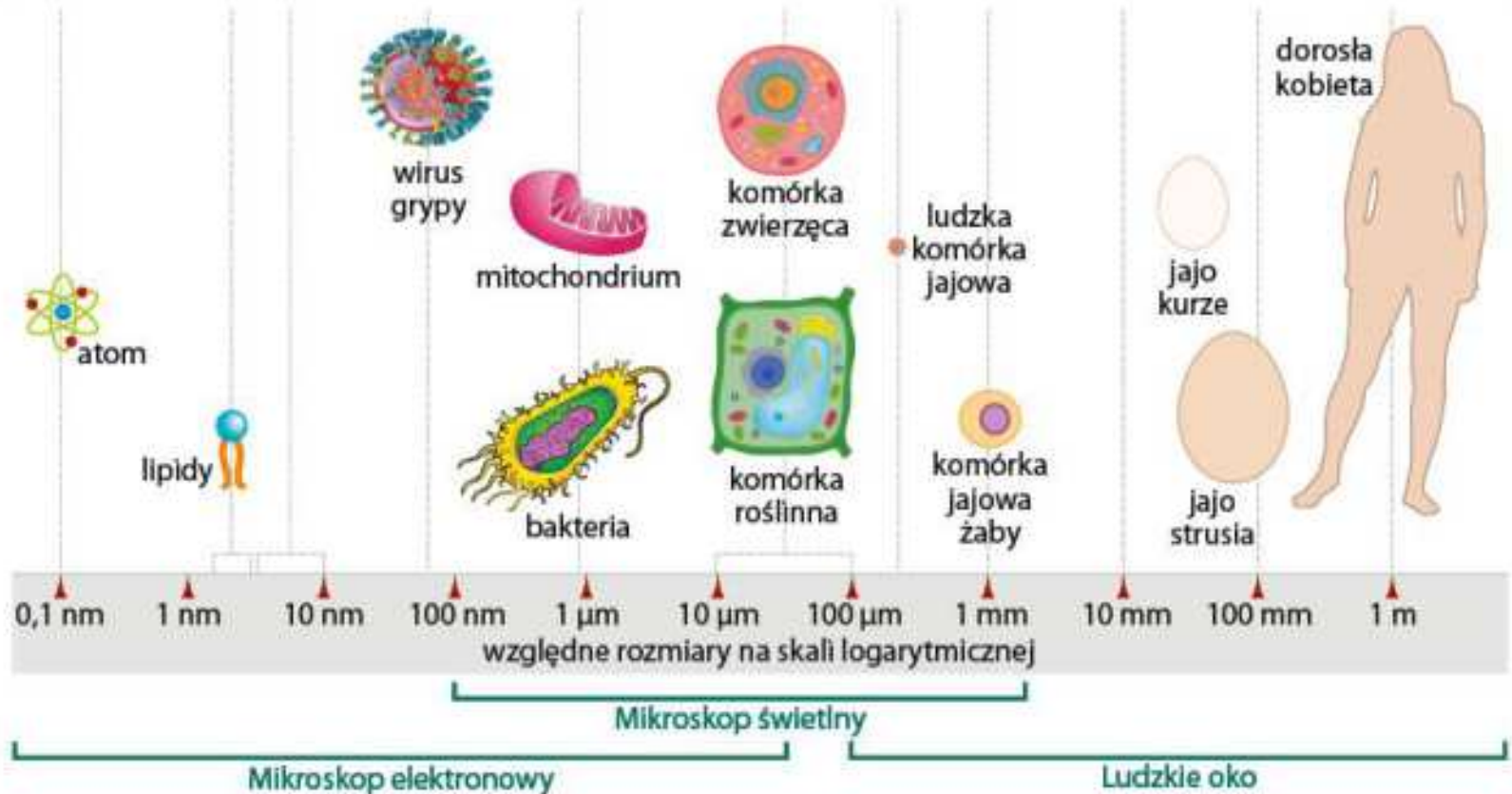
2. Metody badawcze stosowane w biologii komórki

NA TEJ LEKCJI:

- zrozumiesz zasadę działania mikroskopu;
- dowiesz się, jakie rodzaje mikroskopów służą do obserwacji różnych obiektów biologicznych;
- zapoznasz się z podstawowymi badaniami biochemicznymi struktur komórkowych.

Zrozumienie, w jaki sposób funkcjonują obiekty biologiczne, jest możliwe dzięki prowadzeniu dokładnych obserwacji. Obiekty biologiczne mają bardzo różną wielkość. Te, których wymiary mieszczą się w granicach rozdzielczości oka ludzkiego, możemy badać bezpośrednio bez użycia przyrządów optycznych. W przypadku mniejszych posługujemy się lupą, szkłem powiększającym lub mikroskopem optycznym i elektronowym (**ryc. 1.2.1.**). Granice rozdzielczości **mikroskopu świetlnego** mieszczą się w przedziale od 1 do 200 nm (nanometrów). Za jego pomocą obserwujemy komórki organizmów, a także niektóre organelle komórkowe, np. chloroplasty czy mitochondria. Natomiast obiekty takie jak wirusy, rybosomy, związki chemiczne budujące komórkę (białka czy lipidy), badamy wyłącznie za pomocą mikroskopu elektronowego.

◀ mikroskop
świetlny



Ryc. I.2.1. Porównanie rozmiarów różnych obiektów biologicznych obserwowanych gołym okiem, za pomocą mikroskopu świetlnego i elektronowego. Wielkości obiektów zostały przedstawione na skali logarytmicznej, która pozwala na dokonanie porównania od poziomu związków chemicznych do poziomu organizmów ($1 \text{ nanometr (nm)} = 10^{-3} \mu\text{m}$, $1 \text{ mikrometr } (\mu\text{m}) = 10^{-3} \text{ mm}$, $1 \text{ milimetr (mm)} = 10^{-3} \text{ m}$, $1 \text{ centymetr (cm)} = 10^{-2} \text{ m}$).

mikroskop
optyczny

W **mikroskopie optycznym** jako źródło światła wykorzystuje się wiązkę światła widzialnego, która zostaje skupiona na oglądanym preparacie (**ryc. I.2.2.**). Standardowy mikroskop optyczny jest zbudowany z dwóch układów: optycznego i mechanicznego. Wiązka światła ulega skupieniu za pomocą soczewki kondensora na przygotowanym preparacie, powstały obraz dzięki współpracy soczewek obiektywu i okularu zostaje powiększony, odwrócony, rzeczywisty i zogniskowany w oku badacza. Pozwala to na osiągnięcie ponad tysiąckrotnego powiększenia.

elementy optyczne

okular

obiektyw

kondensor

źródło światła

elementy mechaniczne

tubus

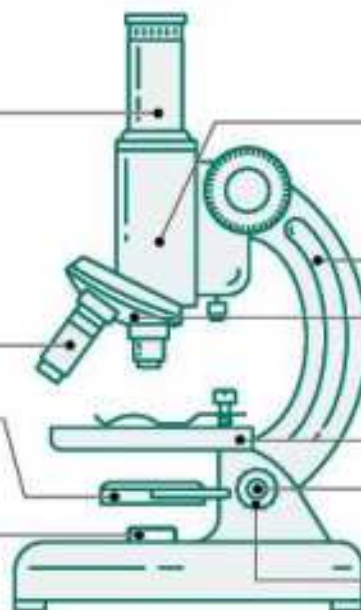
statyw

rewolwer

stolik

śruba mikrometryczna

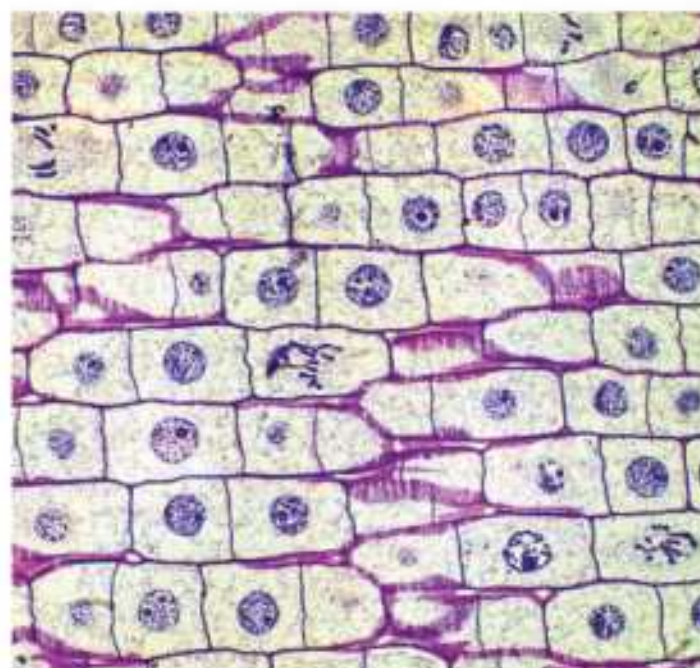
śruba makrometryczna



Ryc. I.2.2. Schemat budowy mikroskopu optycznego z podziałem na elementy optyczne i mechaniczne.

Mikroskop optyczny umożliwia oglądanie zarówno żywych, jak i martwych komórek. W celu zaobserwowania dokładnych szczegółów budowy czy czynności życiowych żywych komórek stosuje się czasami barwienie odpowiednimi barwnikami, które nie są toksyczne dla nich, tzw. barwienie przyżyciowe. Najczęściej technika barwienia wiąże się z preparatami martwymi, w których wybarwia się tylko odpowiednie struktury komórkowe (**ryc. 1.2.3.**).

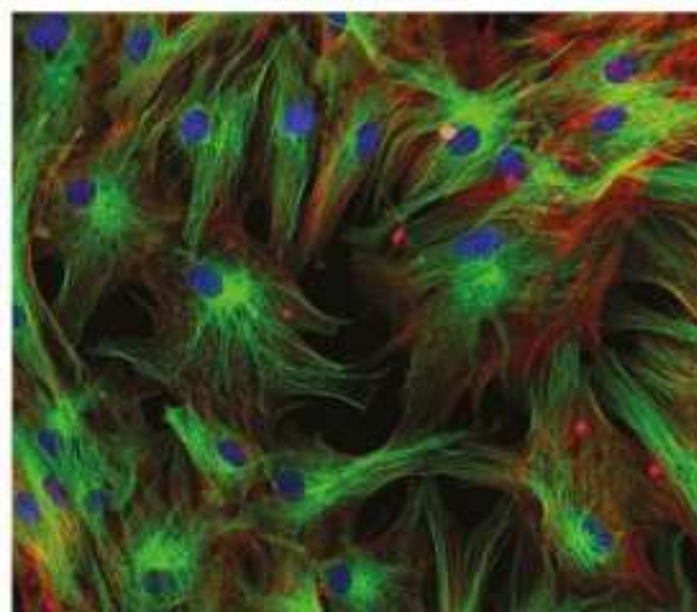
Ryc. 1.2.3. Mikrofotografia komórek stożka wzrostu korzenia cebuli w różnych stadiach podziału – komórki barwione hematoksyliną, organicznym barwnikiem wybarwiającym zasadochłonne struktury komórkowe.



Na przeprowadzenie szczegółowych obserwacji żywych struktur komórkowych bez barwienia pozwalają **mikroskopy kontrastowo-fazowe**, które wykorzystują zjawisko interferencji fal świetlnych.

Natomiast **mikroskop fluorescencyjny** jest bardziej zaawansowanym mikroskopem świetlnym. Jego działanie opiera się na wykorzystaniu zjawiska fluorescencji, czyli emisji światła widzialnego w wyniku naświetlania preparatów promieniami ultrafioletowymi, niebieskimi lub zielonymi (**ryc. 1.2.4.**). Powstały obraz jest negatywem obrazu z typowego mikroskopu świetlnego. Na ciemnym tle widoczne są świecące się struktury.

Ryc. 1.2.4. Zjawisko fluorescencji, na fotografii dobrze widoczne jądra komórkowe zaznaczono kolorem niebieskim, włókna aktyny – czerwonym, a włókna tubuliny – zielonym.



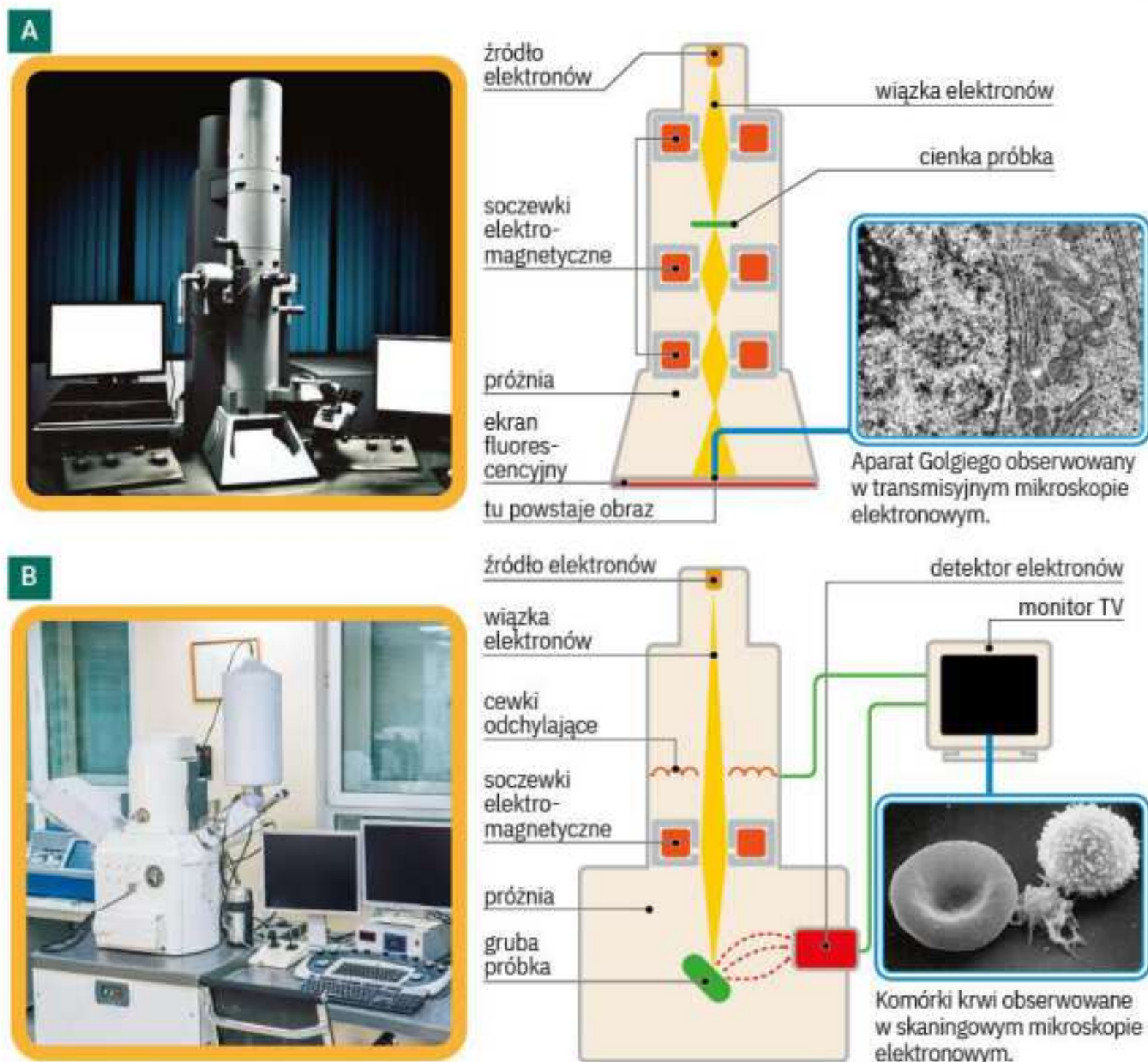
Obserwacje szczegółów budowy komórki nawet na poziomie atomowym umożliwia **mikroskop elektronowy**. Zamiast wiązki światła wykorzystuje on wiązkę elektronów, a zamiast soczewek szklanych – soczewki elektromagnetyczne (do skupiania wiązki elektronów). Wiązka elektronów przechodzi przez kolumnę mikroskopu, w której panuje próżnia. Wyróżniamy dwa rodzaje mikroskopów elektronowych: transmisyjny mikroskop elektronowy (TEM) i skaningowy mikroskop elektronowy (SEM). W **mikroskopie transmisyjnym** możemy uzyskać **1 000 000 razy** powiększony obraz, a zdolność rozdzielcza wynosi **0,2 nm**. Preparaty do obserwacji są bardzo cienkie i przechodząca przez nie wiązka elektronów daje dwuwymiarowy obraz. W **mikroskopie skaningowym** wiązka elektronów nie przechodzi przez preparat (próbkę), ale odbija się od jego powierzchni, co pozwala na uzyskanie trójwymiarowego obrazu. Jedynym ograniczeniem SEM jest mniejsze powiększenie obrazu do **500 000 razy** oraz mniejsza zdolność rozdzielcza do **1 nm** (**ryc. 1.2.5.**).

◀ mikroskop kontrastowo-fazowy

◀ mikroskop fluorescencyjny

◀ mikroskop elektronowy

◀ mikroskop skaningowy



Ryc. 1.2.5. Schemat działania mikroskopu elektronowego: (A) transmisyjnego (TEM), (B) skaningowego (SEM).

Mikroskopy elektronowe pomimo tak dużego powiększenia i zdolności rozdzielczej pozwalają tylko na obserwacje martwych obiektów biologicznych, co nie zawsze daje pełny obraz ich funkcjonowania. Jednak ta ujemna cecha nie ma wpływu na wszechstronne zastosowanie mikroskopów elektronowych. W biologii umożliwiają one szczegółowe poznanie ultrastruktury zarówno najmniejszych organizmów (np. bakterii), jak i struktur komórek roślinnych, zwierzęcych, ludzkich czy grzybowych. Wiedza ta jest szczególnie ważna w medycynie i farmacji. W obliczu wielu chorób cywilizacyjnych, w tym nowotworowych czy nieuleczalnych chorób o często nieznanym etiologii (pochodzeniu), diagnostyka oparta na mikroskopii elektronowej daje duże możliwości nowoczesnego sposobu leczenia.

Inną dziedziną korzystającą z mikroskopów elektronowych jest elektronika, w której mikroskopy umożliwiają poznawanie właściwości i budowy różnych materiałów.

Współczesna biologia nie mogłaby się rozwijać bez postępu nauk informatycznych. Spowodowało to powstanie nowej dziedziny nauki – bioinformatyki, która ułatwia interpretację wyników wielu obserwacji, przeprowadzanie symulacji procesów przyrodniczych czy nawet udzielanie prostych informacji medycznych.

Wybrane techniki biofizyczne i biochemiczne badania struktur komórkowych

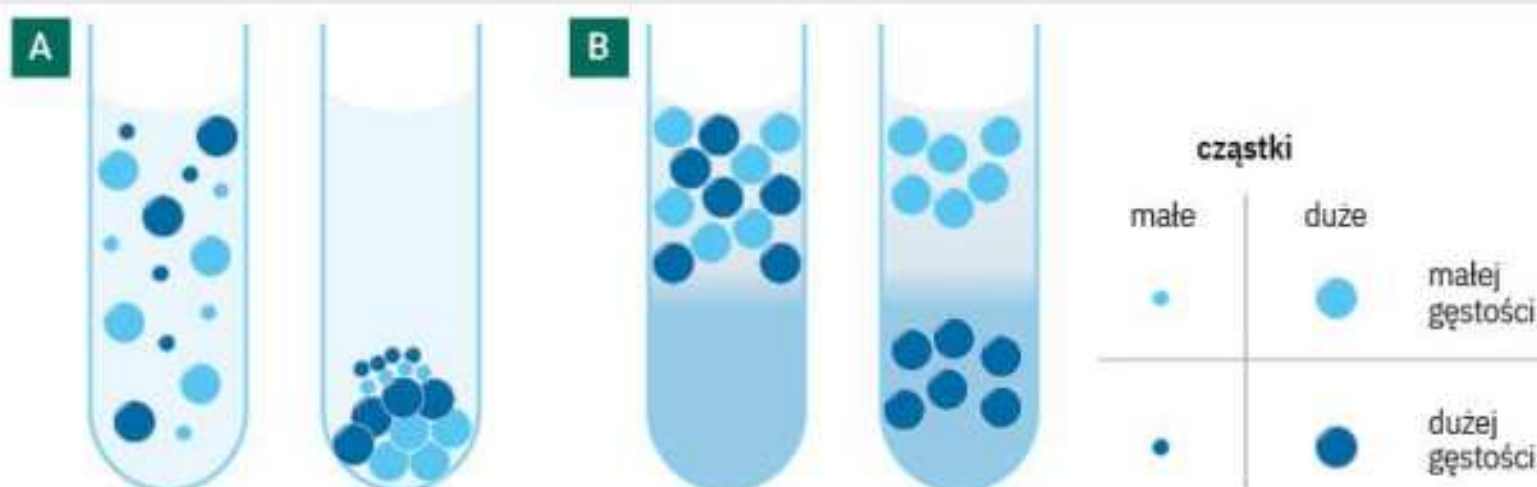
Aby można było dokładnie poznać budowę i funkcjonowanie komórki, należy dokonać analizy biochemicznej jej poszczególnych struktur. Jedną z takich metod jest frakcjonowanie komórek.

W tym celu materiał komórkowy zostaje homogenizowany, czyli rozdrabniany przez ucieranie, krojenie, wytrząsanie lub stosowanie odpowiednich enzymów. Materiał umieszczamy w roztworze z detergentem lub mechanicznie rozcieramy w moździerzu bądź homogenizatorze (jego funkcję może pełnić mikser kuchenny). Podczas tego procesu z komórek zostają uwolnione struktury komórkowe. Następnym etapem jest oddzielenie od siebie poszczególnych struktur podczas **wirowania różnicowego**, w którym badany homogenat jest poddawany działaniu siły odśrodkowej (**ryc. I.2.6.**). Do jego przeprowadzenia używa się wirówek, w których ustala się określoną częstotliwość obrotów (nawet do 100 tysięcy obrotów na minutę). Podczas wirowania następuje przemieszczanie się organelli – cięższe opadają na dno, tworząc osad, a lekkie pozostają na powierzchni, tworząc roztwór. Roztwór zlewa się do probówki i nadal poddaje się wirowaniu aż do całkowitego rozdzielenia struktur komórkowych. Proces ten zachodzi w określonych warunkach – w niskiej temperaturze, przy pH 7,4 i w obecności inhibitorów enzymów rozkładających białka. Otrzymane frakcje komórkowe można dalej rozdzielać za pomocą **wirowania w gradiencie gęstości**. W tej metodzie otrzymany osad zostaje nałożony na powierzchnię roztworu sacharozy czy chlorku cezu, którego gęstość rośnie w stronę dna probówki. Tak przygotowany materiał jest poddawany wirowaniu, podczas którego struktury komórkowe przemieszczają się do części o gęstości takiej, jak własna, i tworzą warstwy. Najczęściej na dnie gromadzą się całe komórki, wyżej jądro komórkowe, następnie mitochondria, wyżej siateczka śródplazmatyczna i najwyżej roztwór z cytozolem.

◀ frakcjonowanie komórek

◀ wirowanie różnicowe

◀ wirowanie w gradiencie gęstości



Ryc. I.2.6. Schemat frakcjonowania struktur komórkowych przez wirowanie: (A) różnicowe, (B) w gradiencie stężeń. Pierwsza probówka w obu metodach oznacza stan przed wirowaniem, a druga – po nim.

autoradiografia ▶ Inną metodą badania komórek jest **autoradiografia**. Metoda ta pozwala obserwować miejsce pierwiastków i związków chemicznych w komórce czy śledzić zachodzące procesy metaboliczne za pomocą izotopów promieniotwórczych (**ryc. I.2.7.**). Do najczęściej używanych izotopów w tej metodzie należy tryt (^3H) i węgiel (^{14}C). Po ich zastosowaniu z materiału biologicznego wykonuje się preparat mikroskopowy, który może być analizowany w mikroskopie świetlnym lub elektronowym. Preparat pokrywa się emulsją fotograficzną zawierającą bromek srebra i pozostawia na kilka dni przy obserwacji w mikroskopie świetlnym i na kilka miesięcy przy obserwacjach



Ryc. I.2.7. Autoradiogram szczegółowo przedstawiający obraz położenia składników radioaktywnych.

w mikroskopie elektronowym. Związek ten pod wpływem promieniowania wysyłanego przez izotop promieniotwórczy wytrąca metaliczne srebro, które jest widoczne w postaci czarnych, kulistych struktur. Na podstawie wywołanego autoradiogramu można dokładnie określić lokalizację znakowanego związku chemicznego lub śledzić dynamikę przemian metabolicznych. Autoradiografia jest często stosowana w biotechnologii do sekwencjonowania kwasu DNA i klonowania genów.

Metoda hodowli *in vitro* komórek i tkanek

- obserwacja *in vivo* ▶ Obserwacje komórek w żywym organizmie, czyli ***in vivo***, nie zawsze pozwalają na poznanie wszystkich aspektów ich funkcjonowania. Często bardzo trudnych technicznie doświadczeń nie można przeprowadzić na żywym organizmie, np. obserwacji wędrówki pojedynczych komórek czy kontroli cyklu komórkowego i zaprogramowanej śmierci komórek. Takie możliwości dają eksperymenty i obserwacje
- obserwacja *in vitro* ▶ prowadzone poza żywym organizmem, czyli ***in vitro***.

Materiał do hodowli pochodzi z komórek pobranych z fragmentu organizmu, w zależności od wcześniej założonego celu hodowli, np. podczas porodu z komórki śródbłonna naczyń żyły pępowinowej czy podczas zabiegów operacyjnych tkanek prawidłowych lub patologicznych (nowotworowych). Jeśli czynności życiowe pobranych komórek zostają utrzymane przez 24 godziny, to stan ten nazywamy **inkubacją**, a jeśli dłużej, wówczas określamy jako **hodowlę**. Hodować możemy komórki (np. komórki nabłonkowe, limfocyty) oraz tkanki lub narządy. Pobrane komórki zostają umieszczone w odpowiedniej pożywce, w skład której wchodzi wszystkie składniki niezbędne do prawidłowego namnażania się i wzrostu (np. sole mineralne, aminokwasy, węglowodany, tłuszcze, witaminy, antybiotyki). Komórki bardzo

szybko się dzielą i tworzą **hodowlę pierwotną**. Dzielące się komórki różnicują się, część z nich obumiera i hodowla pierwotna zwiększa swoją liczbę. W związku z tym część zostaje przeniesiona do innego naczynia hodowlanego, czyli zostaje dokonany pasaż komórek z hodowli pierwotnej i utworzenie **linii komórkowej**. Komórki linii komórkowej różnią się od hodowli pierwotnej – niektóre z nich dzielą się nieustannie, a część może ulegać obumieraniu. Aby zapobiec utracie linii komórkowej, część komórek jest zamrażana.

◀ linia komórkowa

Hodowle *in vitro* komórek i tkanek roślinnych oraz zwierzęcych są jedną z najczęściej stosowanych we współczesnej cytologii i histologii technik laboratoryjnych. Dają one możliwości stałego kontrolowania warunków doświadczenia oraz regulowania czynników wpływających na obserwowane procesy czy zjawiska, np. hormonów, enzymów, leków, substancji toksycznych czy wzrostowych. Hodowle *in vitro* pozwalają także na badanie aparatu genetycznego komórki.

Hodowle *in vitro* komórek roślinnych są wykorzystywane do rozmnażania wegetatywnego roślin, do uzyskiwania roślin transgenicznych czy uwalniania roślin od wirusów i patogenów.

W dobie rozwijającej się biotechnologii hodowle *in vitro* znalazły szerokie zastosowanie w medycynie, farmacji (np. do analizy wchłaniania leków przez błony biologiczne) oraz transplantologii (uzyskiwanie sztucznych tkanek i narządów), co zostanie szczegółowo omówione w dalszym etapie kształcenia.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

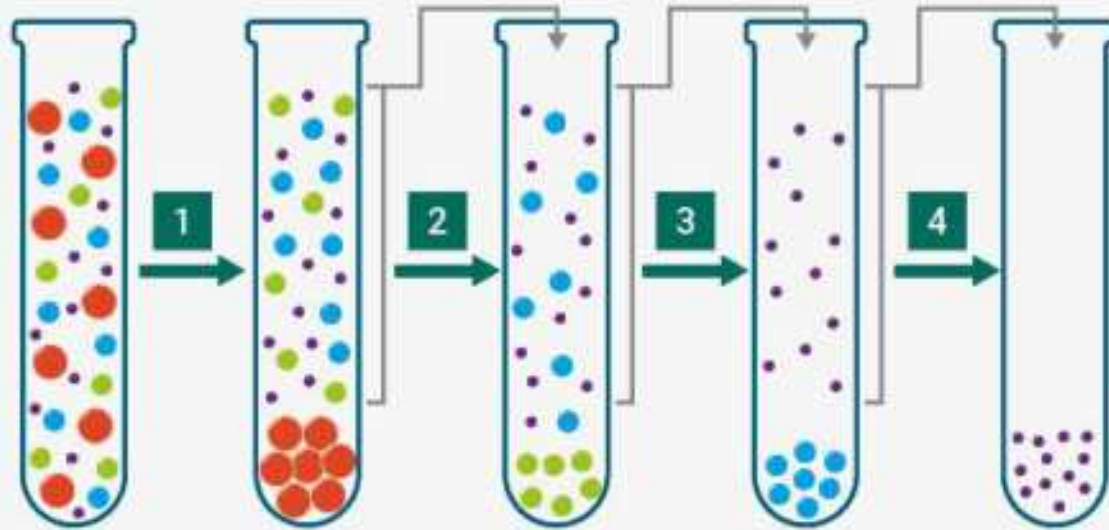
1. Wyjaśnij, jakie znaczenie dla uzyskania właściwego obrazu w mikroskopie optycznym ma układ mechaniczny.
2. Wyjaśnij pojęcie zdolności rozdzielczej mikroskopu. Wymień mikroskopy o największej i najmniejszej zdolności rozdzielczej.
3. Wskaż rodzaj mikroskopu, za którego pomocą możesz dokonać obserwacji następujących obiektów przyrodniczych: cząsteczka białka, wnętrze mitochondrium, komórka eugleny zielonej.
4. Określ, jakie znaczenie w rozwoju współczesnej medycyny, farmacji i biotechnologii mają hodowle *in vitro* komórek i tkanek.
5. Do badania biologii komórek, których średnica wynosi od 1 do 100 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), biolodzy wykorzystują mikroskopy. Zarówno pierwsze mikroskopy, jak i obecnie powszechnie stosowane to mikroskopy świetlne (zwane optycznymi). Preparaty oglądane przy użyciu mikroskopów świetlnych są barwione różnymi rodzajami barwników. Pozwala to na wzmocnienie kontrastu, czyli różnic, między fragmentami preparatu. Natomiast w konfokalnych mikroskopach świetlnych uzyskuje się obrazy 3D.

Wyjaśnij, jakie obrazy uzyskujemy, stosując zwykły mikroskop świetlny i konfokalny mikroskop świetlny.





6. Jedną z metod badania komórek jest ich frakcjonowanie. Komórki są homogenizowane w mikserze (pozbawiane ścian i błon komórkowych), a następnie powstały homogenat komórkowy jest rozdzielany na poszczególne elementy za pomocą wirowania (organelle cięższe opadają na dno, natomiast lekkie pozostają na powierzchni). Stosując wirowanie różnicujące, w miarę zwiększania prędkości wirowania uzyskujemy osad zawierający coraz mniejsze składniki komórki.



Schemat przedstawia etapy frakcjonowania metodą wirowania różnicującego: 1 – frakcja jądrowa, 2 – frakcja mitochondrialna, 3 – frakcja cytoplazmatyczna, 4 – frakcja rybosomalna.

Wyjaśnij, jakie znaczenie dla biologów ma frakcjonowanie komórek.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 13 ▶ • Do badania komórek oraz wchodzących w ich skład organelli i struktur komórkowych **wykorzystuje się mikroskopy**.
- s. 14 ▶ • Podstawowym typem mikroskopu jest **mikroskop optyczny**, który pozwala na obserwację zarówno żywych, jak i martwych komórek. Barwienie preparatów mikroskopowych umożliwia obserwację szczegółów budowy komórki.
- s. 15 ▶ • Na szczegółowe obserwacje żywych struktur komórkowych bez barwienia pozwalają **mikroskopy kontrastowo-fazowe**, które wykorzystują zjawisko interferencji fal świetlnych.
- s. 15 ▶ • **Mikroskop fluorescencyjny** jest bardziej zaawansowanym mikroskopem świetlnym. Jego działanie opiera się na wykorzystaniu zjawiska fluorescencji.
- s. 15 ▶ • Obserwacje szczegółów budowy struktur komórkowych, a nawet makrocząsteczek, umożliwiają **mikroskopy elektronowe**: transmisyjny mikroskop elektronowy o powiększeniu obrazu do miliona razy i elektronowy mikroskop skaningowy o nieco mniejszym powiększeniu, ale trójwymiarowym obrazie.
- s. 17 ▶ • Do badania komórek służy **frakcjonowanie**, w którym podczas wirowania następuje rozdzielenie poszczególnych struktur i organelli komórkowych, a także **autoradiografia**, która dzięki izotopom promieniotwórczym pozwala obserwować miejsce pierwiastków i związków chemicznych w komórce oraz śledzić zachodzące procesy metaboliczne.
- s. 18 ▶ • Obserwacje komórek w żywym organizmie, czyli **in vivo**, nie zawsze pozwalają na poznanie wszystkich aspektów ich funkcjonowania. Takie możliwości dają eksperymenty i obserwacje prowadzone poza żywym organizmem, czyli **in vitro** – hodowle komórek, tkanek i narządów.

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

Metody badań biologicznych

◀ s. 8

Cecha	METODA OBSERWACYJNA	METODA EKSPERYMENTALNA
Warunki prowadzenia badań	najczęściej polowe (naturalne)	najczęściej w laboratorium (sztuczne)
Czynności doświadczalne	występują, ale są niezależne od badacza	występują i są zależne od badacza (celowa zmiana jednego lub kilku czynników)
Powtarzalność procesu badania	najczęściej niemożliwe w tych samych warunkach	możliwe w tych samych warunkach
Czas trwania	tygodnie, a nawet lata	krótki (zależy od rodzaju badania)

Etapy badania biologicznego

◀ s. 9

1.	Sformułowanie problemu badawczego
2.	Postawienie hipotezy badawczej
3.	Weryfikacja hipotezy badawczej
4.	Sformułowanie wniosków

Próby w eksperymentach biologicznych

◀ s. 10

Próby	
Próba kontrolna	Próba badawcza
Pozostaje w stanie niezmiennym (naturalnym).	Poddana zostaje czynnościom eksperymentalnym.

Obserwacje mikroskopowe

◀ s. 14

Typ mikroskopu	Źródło światła	Soczewki	Preparat	Rodzaj obrazu	Zdolność rozdzielcza	Maksymalne powiększenie
optyczny	wiązka światła widzialnego	szklane	żywe lub martwe komórki	dwuwymiarowy	0,2 μm	do 1000 razy
transmisyjny mikroskop elektronowy	wiązka elektronów	elektromagnetyczne	martwe komórki utwardzane i impregnowane substancjami chemicznymi	dwuwymiarowy	0,2 nm	do 1 000 000 razy
skaningowy mikroskop elektronowy	wiązka elektronów	elektromagnetyczne	martwe komórki pokryte warstwą złota lub grafitu	trójwymiarowy	1 nm	do 500 000 razy

BLOK ĆWICZENIOWY

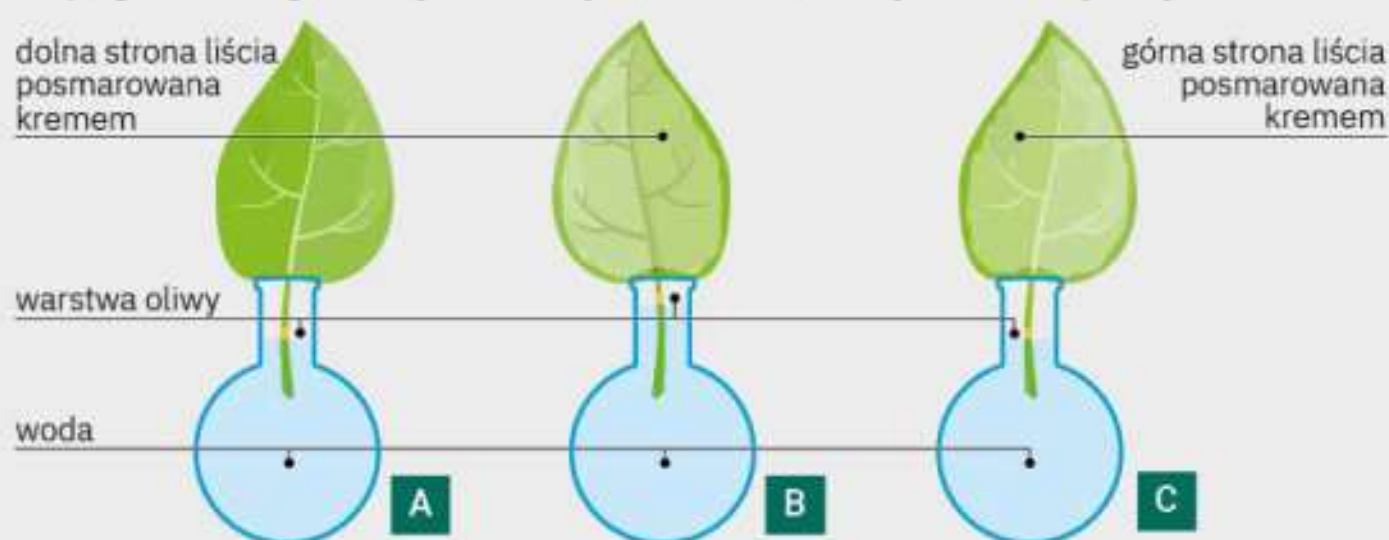
1. (0–1 pkt)

Z podanych poniżej przykładów projektów badawczych wybierz te, które opierają się na metodach obserwacyjnych.

- A. Liczenie gniazd bocianów na obszarze Wigierskiego Parku Narodowego w latach 2016–2018.
- B. Wpływ metali ciężkich na wydajność fotosyntezy u moczarki kanadyjskiej.
- C. Porównanie wzrostu i masy ciała uczniów pierwszych klas liceów w województwie małopolskim.
- D. Wpływ czasu przechowywania olejów na zawartość w nich witaminy E.
- E. Spis gatunków drzew iglastych rosnących w parkach miejskich Poznania.

2. (0–1 pkt)

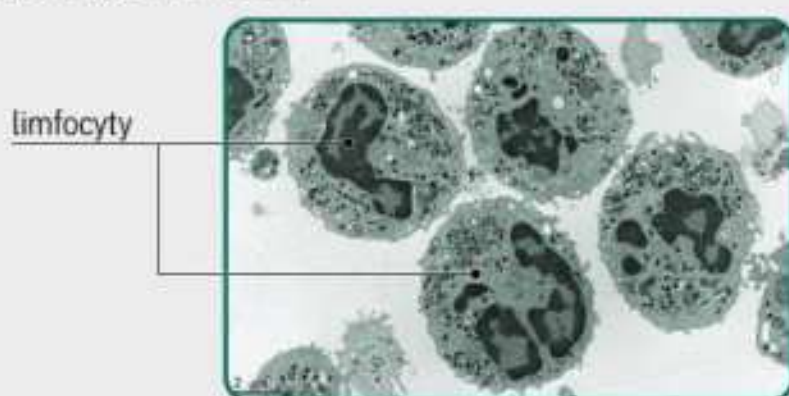
Na poniższej rycinie przedstawiono wynik doświadczenia, które miało na celu wykazanie lokalizacji aparatów szparkowych w obrębie blaszek liściowych roślin lądowych.



Wskaż zestaw będący próbą kontrolną w tym doświadczeniu. Odpowiedź uzasadnij.

3. (0–2 pkt)

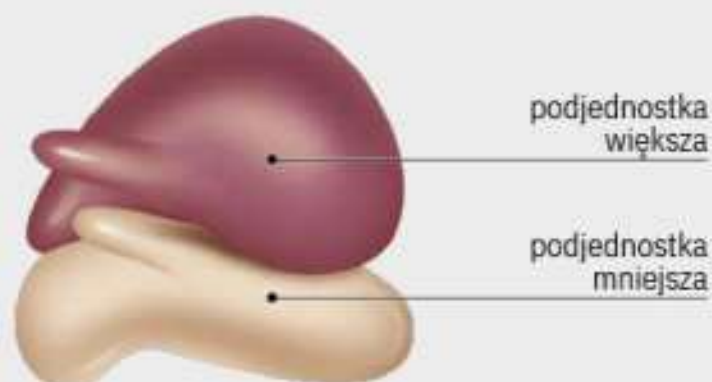
Na podstawie przedstawionego obrazu spod mikroskopu wskaż, jaki rodzaj mikroskopu został użyty. Uzasadnij swoją odpowiedź.

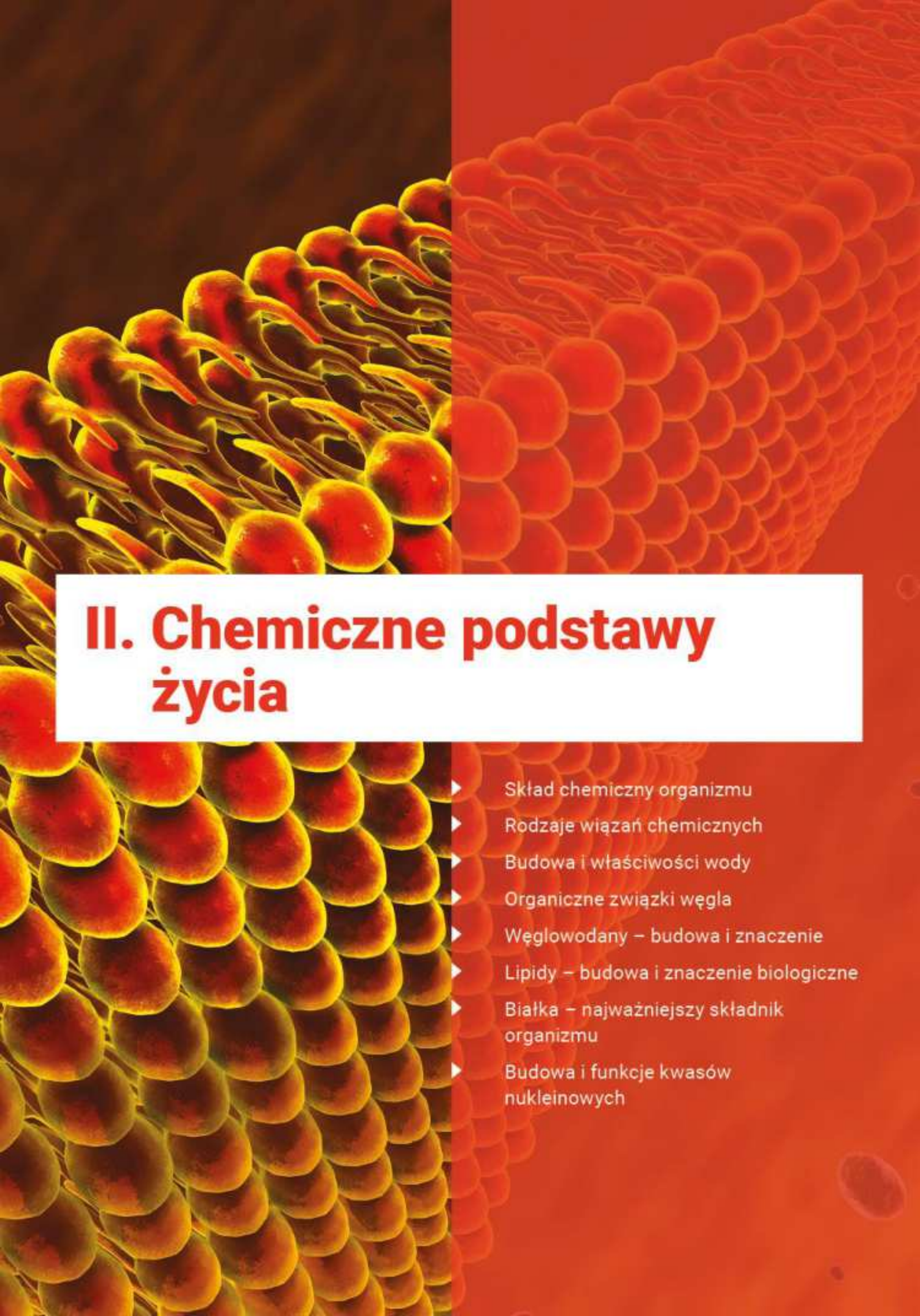


4. (0–1 pkt)

Rybosomy to struktury występujące w komórkach zwierzęcych i roślinnych. Składają się z dwóch podjednostek o różnej wielkości i masie. Uczestniczą w procesie biosyntezy białka.

Wskaż, za pomocą której metody zostaną te podjednostki wyizolowane z komórki.





II. Chemiczne podstawy życia

- ▶ Skład chemiczny organizmu
- ▶ Rodzaje wiązań chemicznych
- ▶ Budowa i właściwości wody
- ▶ Organiczne związki węgla
- ▶ Węglowodany – budowa i znaczenie
- ▶ Lipidy – budowa i znaczenie biologiczne
- ▶ Białka – najważniejszy składnik organizmu
- ▶ Budowa i funkcje kwasów nukleinowych

1. Skład chemiczny organizmu

NA TEJ LEKCJI:

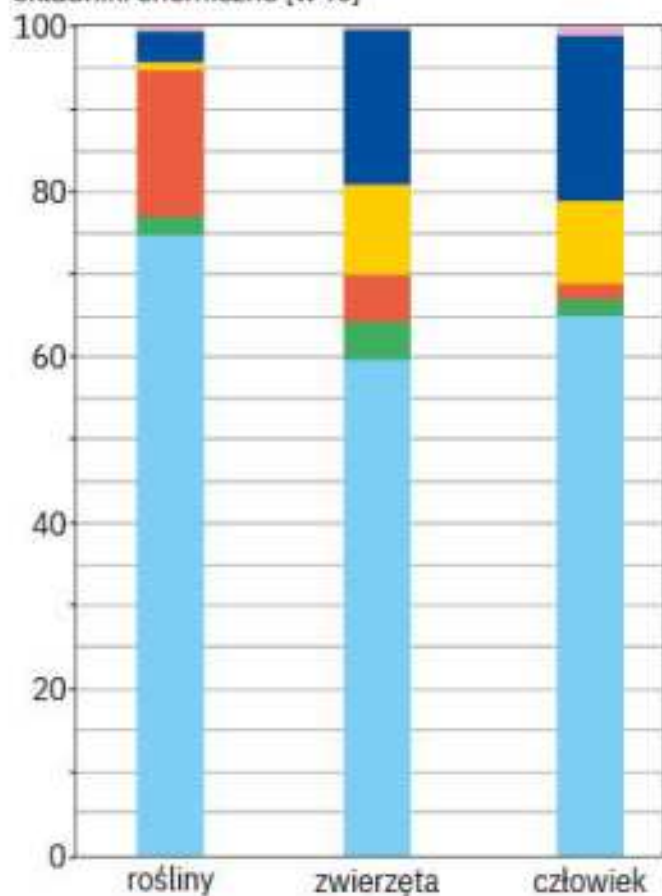
- dowiesz się, jakie pierwiastki chemiczne wchodzą w skład organizmu;
- poznasz związki chemiczne budujące organizm;
- zrozumiesz, jakie znaczenie mają makroelementy, mikroelementy i ultraelementy;
- przeanalizujesz budowę i właściwości wody.

związki chemiczne

Wszystkie organizmy są zbudowane z pierwiastków chemicznych, które tworzą związki chemiczne lub występują w organizmach w postaci jonów. **Związki chemiczne** dzielimy na nieorganiczne i organiczne. Związki nieorganiczne to substancje, w których budowie nie występuje atom węgla (wyjątki: dwutlenek węgla CO_2 , kwas węglowy H_2CO_3 i jego sole). Najważniejszymi związkami nieorganicznymi występującymi w żywych organizmach są woda i sole mineralne.

Poza wodą i solami mineralnymi dominują złożone związki organiczne: białka, tłuszcze (lipidy), cukry (węglowodany) i kwasy nukleinowe (ryc. II.1.1.). Ich podstawowym składnikiem jest węgiel. Część z nich ma złożoną budowę, a wielkość cząsteczek jest dość duża.

składniki chemiczne [w %]



Skład chemiczny organizmów

związki organiczne

- białka
- węglowodany
- tłuszcze
- kwasy nukleinowe

związki nieorganiczne

- woda
- sole mineralne

- woda
- związki nieorganiczne
- związki organiczne
- tłuszcze
- kwasy nukleinowe
- białka
- węglowodany

Ryc. II.1.1. Udział procentowy składników organicznych i nieorganicznych w komórkach roślin, zwierząt i człowieka.

Pierwiastki chemiczne

Materia, czyli cały świat nieożywiony (np. skały, woda, powietrze) i organizmy żywe (np. grzyby, zwierzęta, rośliny, człowiek) składa się z małych cząstek będących w nieustannym ruchu – atomów. Zbiór atomów o takiej samej liczbie protonów w jądrze atomowym nazywamy **pierwiastkiem chemicznym**.

◀ pierwiastek chemiczny

Spośród 92 pierwiastków obecnie występujących na Ziemi (skorupa ziemska, morza, oceany, powietrze) około 25 ma istotne znaczenie dla funkcjonowania organizmów. Zawartość pierwiastków w środowisku nie jest odzwierciedleniem ich udziału w żywych organizmach (**tab. II.1.1.**).

Tab. II.1.1. Porównanie występowania niektórych pierwiastków w skorupie ziemskiej i żywych organizmach

Pierwiastki chemiczne			
pospolite		rzadkie	
skorupa ziemska	żywe organizmy	skorupa ziemska	żywe organizmy
tlen (O)	wodór (H)	wapń (Ca)	sód (Na)
krzem (Si)	tlen (O)	żelazo (Fe)	wapń (Ca)
glin (Al)	węgiel (C)	magnez (Mg)	fosfor (P)
sód (Na)	azot (N)	fosfor (P)	siarka (S)
		węgiel (C)	potas (K)
		azot (N)	chlor (Cl)
			magnez (Mg)

Tylko niektóre z nich występują u prawie wszystkich organizmów, a cztery pierwiastki: węgiel, wodór, tlen i azot stanowią do 96% suchej masy organizmu (masa wszystkich składników organizmu po usunięciu wody). Należą one do **makroelementów**, których zawartość procentowa w suchej masie organizmu wynosi powyżej 0,01%.

Makroelementy są niezbędne do prawidłowego rozwoju i funkcjonowania organizmów. Są to pierwiastki, których organizm potrzebuje w dużych ilościach. Sześć spośród nich: węgiel (C), wodór (H), tlen (O), azot (N), siarka (S) i fosfor (P) budują związki organiczne wszystkich żywych organizmów (białka, węglowodany, tłuszcze i kwasy nukleinowe) (**tab. II.1.2.**). Nazywamy je **pierwiastkami biogennymi** lub budulcowymi (z gr. *bios* – życie, gr. *gennom* – rodzić; w dosłownym tłumaczeniu życiodajne).

◀ makroelementy

◀ pierwiastki biogenne

Tab. II.1.2. Pierwiastki biogenne – podstawowe funkcje, źródła i skutki niedoboru w organizmie

Pierwiastek	Najważniejsza rola w organizmie	Główne źródło	Niektóre skutki niedoboru	
			u człowieka i zwierząt	u roślin
węgiel (C) tlen (O) wodór (H)	podstawowe pierwiastki budulcowe wszystkich związków organicznych, tlen bierze udział w oddychaniu i z wodorem tworzy wodę	wszystkie produkty pokarmowe	• zahamowanie procesów życiowych i śmierć organizmu	• zahamowanie procesów życiowych i śmierć organizmu
azot (N)	składnik aminokwasów, białek, kwasów nukleinowych, nośników energii (ATP, ADP), barwników fotosyntetycznych i fitohormonów, główny składnik zbędnych metabolitów wydalanych przez zwierzęta	produkty białkowe zwierzęce (mięso, nabiał, ryby, owoce morza) i roślinne (nasiona strączkowe, orzechy i pestki, pełne nasiona zbóż)	• zahamowanie procesów życiowych (wychudzenie, osłabiony wzrost u dzieci, ogólne osłabienie, zmiany skórne, choroby wątroby)	• zahamowanie wzrostu rośliny, żółknięcie liści (chloroza – brak chlorofilu) zwłaszcza starszych, drewnienie tkanek • wzrost syntezy antocyjanów (fioletowe i czerwone zabarwienie liści)
siarka (S)	składnik niektórych aminokwasów, tworzy wiązania dwusiarczkowe podtrzymujące strukturę przestrzenną białka, składnik białka keratyny (budującej włosy, paznokcie i naskórek), enzymów i hormonów, składnik koenzymu A (uczestniczy w oddychaniu komórkowym)	jaja, mleko i jego przetwory, mięso, rośliny strączkowe, czosnek, cebula, kapusta, papryka, niektóre owoce (truskawki, awokado, morele)	• pogorszenie stanu włosów, paznokci i naskórka • pogorszenie wchłaniania innych pierwiastków (magnez, żelazo, potas, wapń) • zaburzenia pracy wątroby	• zahamowanie wzrostu liści i żółknięcie nerwów liści, czerwone plamy na liściach • zahamowanie kwitnienia i wzrostu całej rośliny
fosfor (P)	składnik nukleotydów, kwasów nukleinowych, związków wysokoenergetycznych (ATP, ADP) i niektórych białek, składnik kości, zębów	otręby pszenne, sery, mleko, orzechy, pełne nasiona zbóż, wątroba wieprzowa	• zaburzenia wzrostu • osłabienia i bóle mięśni, kości • zaburzenia oddychania i zaburzenia neurologiczne	• podobne objawy jak w przypadku niedoboru azotu, ponadto słabe kwitnienie i wykształcanie nasion, obumieranie młodych liści, zrzucanie liści

Oprócz pierwiastków biogennych do makroelementów zaliczamy także: wapń (Ca), magnez (Mg), sód (Na), potas (K), chlor (Cl) (**tab. II.1.3.**).

Tab. II.1.3. Makroelementy – podstawowe funkcje, źródła i skutki niedoboru w organizmie

Pierwiastek	Najważniejsza rola w organizmie	Główne źródło	Niektóre skutki niedoboru	
			u człowieka i zwierząt	u roślin
wapń (Ca)	składnik budulcowy kości, zębów, bierze udział w skurczu mięśni i procesie krzepnięcia krwi, odpowiada za prawidłowe przewodnictwo impulsów nerwowych	mleko i produkty mleczne, ryby, natka pietruszki, szpinak, orzechy	• u dzieci i młodzieży: zmniejszenie masy kostnej, krzywica • u dorosłych: osteoporoza • drgawki i silne skurcze mięśni szkieletowych (tężyczka) • zaburzenia procesu krzepnięcia krwi	• martwica organów roślinnych • zahamowanie wzrostu roślin • śluzowacenie korzeni • żółto-brązowe plamy na liściach • rozpad błon plazmatycznych
magnez (Mg)	stabilizuje strukturę rybosomów, składnik kości, zębów i mięśni, składnik chlorofilu; aktywator wielu enzymów fotosyntetycznych i oddechowych odgrywa istotną rolę w przemianach węglowodanów i gospodarce fosforem	szpinak, kasza gryczana, ciemne pieczywo, warzywa strączkowe, owoce morza, kakao, gorzka czekolada	• zwiększenie pobudliwości nerwowo-mięśniowej • zaburzenia rytmu serca, ogólne osłabienie organizmu • bóle i zawroty głowy • rozdrażnienie	• żółknięcie liści (chloroza – brak chlorofilu) • zahamowanie procesu fotosyntezy • zahamowanie wzrostu rośliny
sód (Na)	uczestniczy w przewodzeniu impulsów nerwowych, reguluje ciśnienie osmotyczne płynów ustrojowych	sól kuchenna, ryby, owoce morza	• utrata pobudliwości komórek nerwowych • zanik różnicy potencjałów (napięcia elektrycznego) • skurcze mięśni • obniżone ciśnienie krwi • odwodnienie (suchość skóry i błon śluzowych)	• zanik różnicy potencjałów (napięcia elektrycznego) • utrata pobudliwości komórek

Tab. II.1.3. Makroelementy – podstawowe funkcje, źródła i skutki niedoboru w organizmie

Pierwiastek	Najważniejsza rola w organizmie	Główne źródło	Niektóre skutki niedoboru	
			u człowieka i zwierząt	u roślin
potas (K)	uczestniczy w przewodzeniu impulsów nerwowych, reguluje gospodarkę wodno-elektrolitową i pracę nerek, bierze udział w skurczu mięśni	nasiona roślin strączkowych, kakao, orzechy (zwłaszcza arachidowe i włoskie), suszone owoce (głównie morele, rodzynki, jabłka, figi), niektóre warzywa (np. pomidory, ziemniaki, brokuły, buraki, seler) i owoce (np. banany, brzoskwinie, morele, owoce cytrusowe)	• osłabienie pracy mięśni • choroby serca i nerek • nadciśnienie • ogólne osłabienie organizmu • apatia	• zahamowanie wzrostu korzenia i pędu • na wierzchołkach i brzegach starszych liści chloroza, a następnie martwica (nekroza)
chlor (Cl)	reguluje gospodarkę wodno-elektrolitową i równowagę kwasowo-zasadową (aktywuje enzymy trawienne w układzie pokarmowym), niezbędny do rozkładu wody w czasie fotosyntezy	sól kuchenna, owoce morza, ryby, wędliny, wszystkie produkty, do których jest dodawana sól	• osłabienie pracy mięśni • zaburzenia procesu trawienia	w warunkach naturalnych brak objawów niedoboru (stężenie w roztworze glebowym jest dużo większe niż w komórce roślinnej)

mikroelementy ➤ **Mikroelementy** to pierwiastki, które występują w organizmie w niewielkich ilościach (poniżej 0,01% w suchej masie) w porównaniu z makroelementami. Należą do nich np. żelazo (Fe), miedź (Cu), cynk (Zn), kobalt (Co), fluor (F) i jod (I) (**tab. II.1.4.**). Są one niezbędne do życia i prawidłowego rozwoju organizmu.

Tab. II.1.4. Mikroelementy – podstawowe funkcje, źródła i skutki niedoboru w organizmie

Pierwiastek	Najważniejsza rola w organizmie	Główne źródło	Niektóre skutki niedoboru	
			u człowieka i zwierząt	u roślin
żelazo (Fe)	składnik białek złożonych magazynujących (mioglobina) lub transportujących (hemoglobina) tlen, składnik enzymów przenoszących elektrony w procesach oddychania i fotosyntezy	podroby (wątroba, nerki), mięso, jaja, nasiona roślin strączkowych (soja, fasola), korzeń pietruszki, niektóre suszone owoce (morele, śliwki, figi), prażone nasiona sezamu, dyni i słonecznika	• anemia i osłabienie organizmu, apatia • zaburzenia procesu oddychania komórkowego i pracy serca	• chloroza (żółknięcie) młodych liści • zaburzenie oddychania komórkowego i fotosyntezy

Tab. II.1.4. Mikroelementy – podstawowe funkcje, źródła i skutki niedoboru w organizmie

Pierwiastek	Najważniejsza rola w organizmie	Główne źródło	Niektóre skutki niedoboru	
			u człowieka i zwierząt	u roślin
miedź (Cu)	składnik wielu enzymów, uczestniczy w syntezie hemoglobiny i transporcie żelaza we krwi, bierze udział w syntezie chlorofilu	wątroba, zarodki i otręby pszenne, płatki owsiane, orzechy, kakao, nasiona słonecznika, zielone warzywa liściaste, ostrygi, nasiona roślin strączkowych	• niedobory występują bardzo rzadko • anemia, obniżona odporność	• więdnienie młodych liści • zamieranie wierzchołków pędu • obniżenie turgoru
cynk (Zn)	składnik insuliny (hormon obniżający poziom cukru we krwi), składnik około 300 enzymów działających w roślinie, niezbędny do syntezy związków pobudzających wytwarzanie hormonów wzrostu u roślin, uczestniczy w przemianach białek, lipidów i węglowodanów	mięso, ostrygi, ryby, orzechy, produkty zbożowe, nasiona słonecznika, pestki dyni, otręby, rośliny strączkowe, zioła: pokrzywa, szalwia, rumianek, mniszek lekarski	• spowolnione gojenie ran • łamliwość włosów i paznokci • choroby skóry • zaburzenia rozwoju i czynności gonad	• chloroza starszych liści • karłowacenie roślin • zahamowanie syntezy hormonów wzrostu
kobalt (Co)	składnik witaminy B ₁₂ (odpowiada za wytwarzanie czerwonych krwinek), niezbędny dla roślin motylkowych żyjących w symbiozie z bakteriami brodawkowymi	wątroba, nerki, mięso, niektóre owoce morza, np. ostrygi, mleko, szpinak, sałata, ziarna zbóż	• anemia • zaburzenia krzepnięcia krwi	• zaburzenia wiązania azotu atmosferycznego przez rośliny motylkowe
fluor (F)	składnik kości i szkliwa zębów	woda wodociągowa, herbata, ryby, produkty pełnoziarniste, sery żółte, pleśniowe i topione	• próchnica zębów • łamliwość kości u dzieci • osteoporoza	• nie stwierdzono
jod (I)	składnik hormonów tarczycy (odpowiadają za pracę serca, układu nerwowego i przemianę materii)	sól jodowana, owoce morza, glony, niektóre ryby, np. dorsz, fasola, borówki, ziemniaki, truskawki	• opóźnienie rozwoju umysłowego • powiększenie tarczycy (wole) • zwolnienie tempa metabolizmu	• nie stwierdzono

ultraelementy ▶ Niekiedy z mikroelementów wyodrębnia się **ultraelementy** – złoto (Au), srebro (Ag), selen (Se), platynę (Pt), chrom (Cr), molibden (Mo) i nikiel (Ni). W organizmach pierwiastki te występują w minimalnych ilościach. Wchodzą w skład budowy komórki, są składnikami enzymów lub aktywują procesy metaboliczne.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przedstaw kryterium podziału pierwiastków na mikro-, makro- i ultraelementy.
2. Spośród wymienionych pierwiastków: Ca, Mg, O, H, Na, Si, C wybierz pierwiastki zaliczane do biogennych. Uzasadnij swój wybór.
3. Wyjaśnij, dlaczego rośliny motylkowe wykazują duże zapotrzebowanie na kobalt.



fasola



koniczyna



groszek



soczewica



orzech ziemny

4. Niedobór tego pierwiastka prowadzi do słabego wzrostu kości, powoduje ich pękanie i łamanie. Skutkiem braku tego pierwiastka są również drgania mięśni i słaba krzepliwość krwi. Podaj nazwę opisanego pierwiastka i wskaż jego źródła występowania.
5. Azot jest pierwiastkiem budującym białka, odpowiedzialnym za wzrost organizmów. Wyjaśnij, jak brak tego pierwiastka wpływa na funkcjonowanie roślin.
6. W organizmach żywych w dużych ilościach występują: tlen (65%), węgiel (20%), wodór (10%), azot (3%). Przedstaw udział wymienionych pierwiastków w postaci wykresu słupkowego. Wyjaśnij pojęcie *pierwiastki biogenne* oraz podaj ich cechę wspólną.
7. Dobierz w pary nazwy pierwiastków z pełnionymi przez nie funkcjami. Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

I. jod	a) wchodzi w skład szkieletu kręgowców i barwnika chlorofilu
II. siarka	b) jest składnikiem kości, odpowiada za skurcz mięśni
III. wapń	c) buduje włosy, rogi, kopyta
IV. sód	d) jest składnikiem barwnika krwi hemoglobiny
V. żelazo	e) buduje hormony tarczycy
VI. magnez	f) zwiększa wchłanianie wody

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 24 ▶ • Podstawowymi składnikami wszystkich organizmów są **związki chemiczne**: nieorganiczne i organiczne.
- s. 25 ▶ • Spośród **92 pierwiastków** około 25 ma istotne znaczenie dla funkcjonowania organizmów.

- Pierwiastki budujące organizmy występują w nich w różnych ilościach. Dzielimy je na **makroelementy**, **mikroelementy** i **ultraelementy** (pierwiastki śladowe). ◀ s. 25
- Sześć spośród makroelementów – węgiel, wodór, tlen, azot, fosfor i siarka – to **pierwiastki biogenne** budujące związki organiczne wszystkich organizmów. ◀ s. 25

2. Rodzaje wiązań chemicznych

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jakie wyróżnia się wiązania chemiczne;
- poznasz właściwości wiązań chemicznych.

Atomy jednego lub kilku pierwiastków mogą łączyć się ze sobą **wiązaniami chemicznymi**. W każdym wiązaniu zawarta jest pewna ilość energii chemicznej. Miarą **energii wiązania** jest ilość energii niezbędna do jego zerwania. Najczęściej energię wiązania wyrażamy w kilodżulach przypadających na mol danej substancji (kJ/mol).

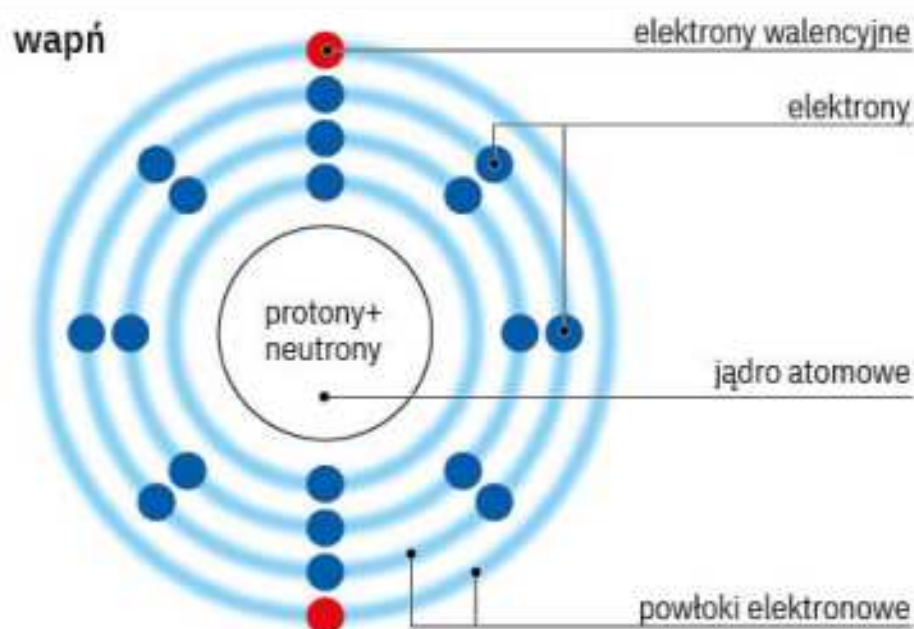
◀ wiązanie chemiczne

Wiązania chemiczne dzielimy na:

◀ podział wiązań chemicznych

- **silne**, dla których energia wiązania mieści się w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset kJ/mol. Należą tu wiązania: **kowalencyjne** i **jonowe**;
- **słabe**, dla których energia wiązania wynosi kilka lub kilkanaście kJ/mol. Do tego typu wiązań należą: **wodorowe**, **hydrofobowe** i **siły van der Waalsa**.

W tworzeniu wiązania chemicznego biorą udział **elektrony walencyjne**, które leżą na ostatniej powłoce elektronowej, tzn. znajdują się najdalej od jądra atomu i są przez nie najslabiej przyciągane (**ryc. II.2.1.**).



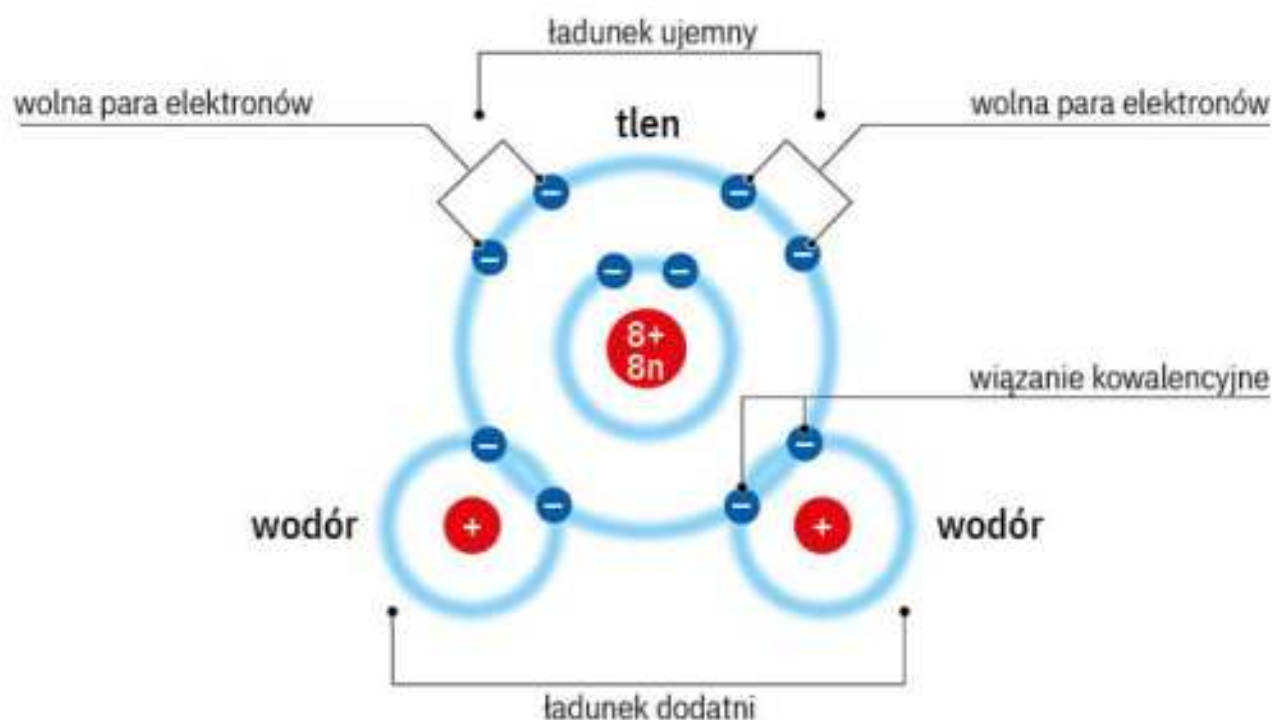
Ryc. II.2.1. Elektrony walencyjne znajdują się na ostatniej powłoce – najdalej od jądra atomu.

► **Wiązanie kowalencyjne** tworzy się w wyniku współniwania jednej lub kilku par elektronów należących do różnych atomów. Tego typu wiązanie występuje np. w cząsteczce gazowego wodoru (H_2) (**ryc. II.2.2.**), tlenu (O_2), a także w związkach organicznych.



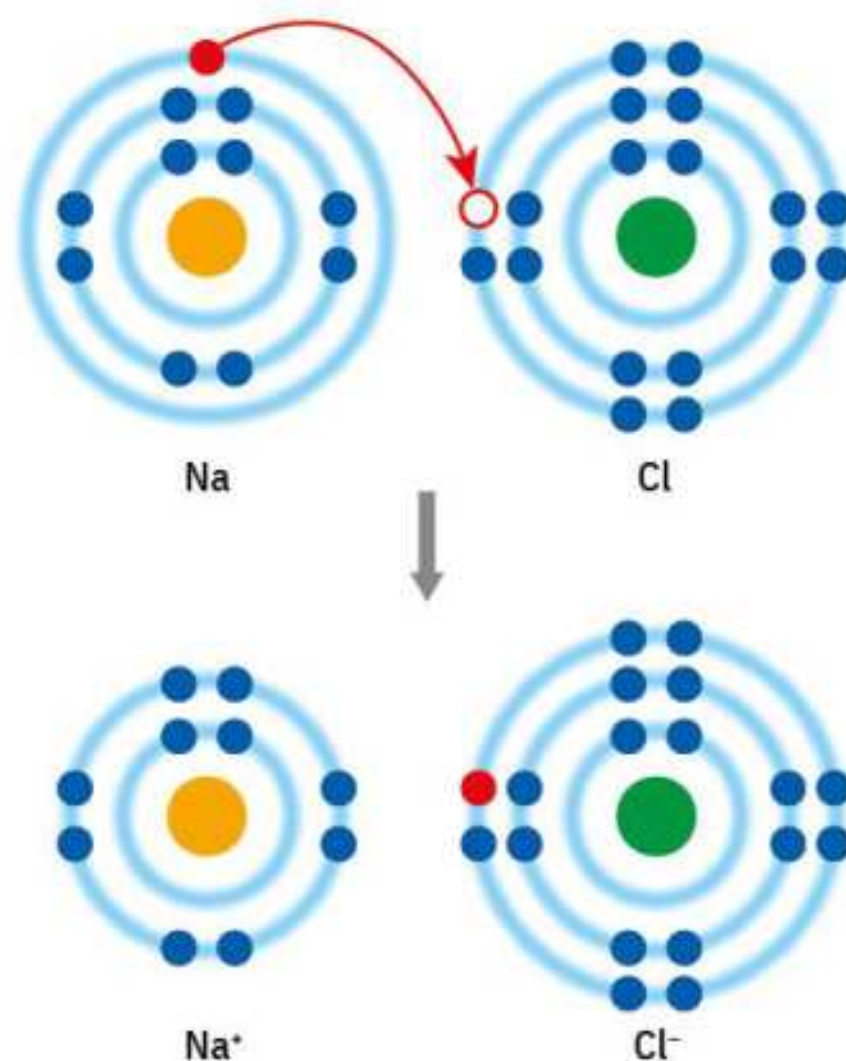
Ryc. II.2.2. W cząsteczce wodoru wiązanie kowalencyjne powstaje w wyniku współniwania jednej pary elektronowej.

W cząsteczce wodoru (H_2) każdy atom „poświęcił” jeden elektron na wytworzenie wiązania kowalencyjnego. Oba elektrony są przyciągane z jednakową siłą przez jądro atomu, w związku z tym wspólna para elektronowa jest rozmieszczona równomiernie pomiędzy atomami. Tego typu wiązanie kowalencyjne nazywamy **niepolarnym**. Natomiast gdy wspólna para elektronowa jest bardziej przesunięta w stronę jednego z tworzących wiązanie atomów, mówimy o **wiązaniu kowalencyjnym spolaryzowanym** (**ryc. II.2.3.**). Tego typu wiązanie występuje w cząsteczce wody, w której tlen ma większe powinowactwo do elektronów i przyciąga je silniej (mówimy, że tlen jest bardziej **elektroujemny** niż wodór). Taka cząsteczka ma dwa bieguny i staje się **dipolem**.



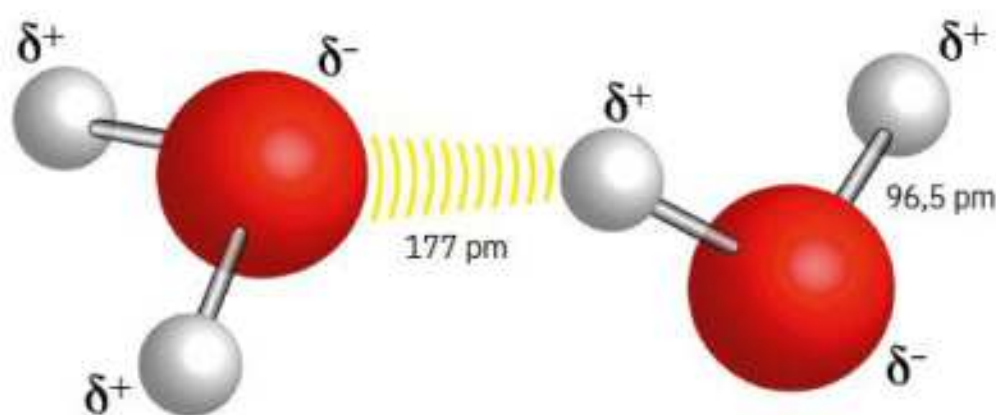
Ryc. II.2.3. W cząsteczce wody występuje wiązanie kowalencyjne spolaryzowane. Jądro atomu tlenu silniej przyciąga elektrony niż jądro wodoru – po stronie tlenu dominuje ładunek ujemny, a po stronie wodoru – dodatni.

Wiązanie jonowe należy do silnych wiązań chemicznych i bazuje na oddziaływaniach **elektrostatycznych**. Powstaje w wyniku przyciągania się różnoimiennych ładunków. Częstkę obdarzoną ładunkiem nazywamy **jonem**. Atom mający 1, 2 lub 3 elektrony może je przekazać innemu atomowi i zyskać ładunek dodatni. Dodatnio naładowane jony nazywamy **kationami**. Atomy, które mają 5, 6 lub 7 elektronów walencyjnych, wykazują tendencję do przyjmowania elektronów. Po ich przyjęciu stają się ujemnie naładowanymi **anionami**. W wyniku oddziaływania między kationem a anionem powstaje wiązanie jonowe. Przykładem związku chemicznego, w którym występuje wiązanie jonowe, jest chlorek sodu (NaCl) (**ryc. II.2.4.**). Wiązanie jonowe powstaje wskutek przyciągania się jonów sodu (Na^+) i chloru (Cl^-).



Ryc. II.2.4. Powstawanie wiązania jonowego.

Przykładem słabego wiązania chemicznego jest **wiązanie wodorowe** (**ryc. II.2.5.**). Powstaje ono pomiędzy obdarzonym dodatnim ładunkiem atomem wodoru jednej cząsteczki a innym atomem, który jest obdarzony ładunkiem dodatnim (najczęściej jest to atom tlenu lub azotu). Wiązania wodorowe łatwo powstają i równie łatwo ulegają zerwaniu. O ile jedno wiązanie wodorowe jest słabe, to w dużej liczbie sumują się i decydują o silnym oddziaływaniu cząsteczek. Wiązania wodorowe występują w cząsteczce wody, a także pełnią istotną rolę w utrzymywaniu struktury przestrzennej makrocząsteczek w komórce, takich jak białka czy kwasy nukleinowe.



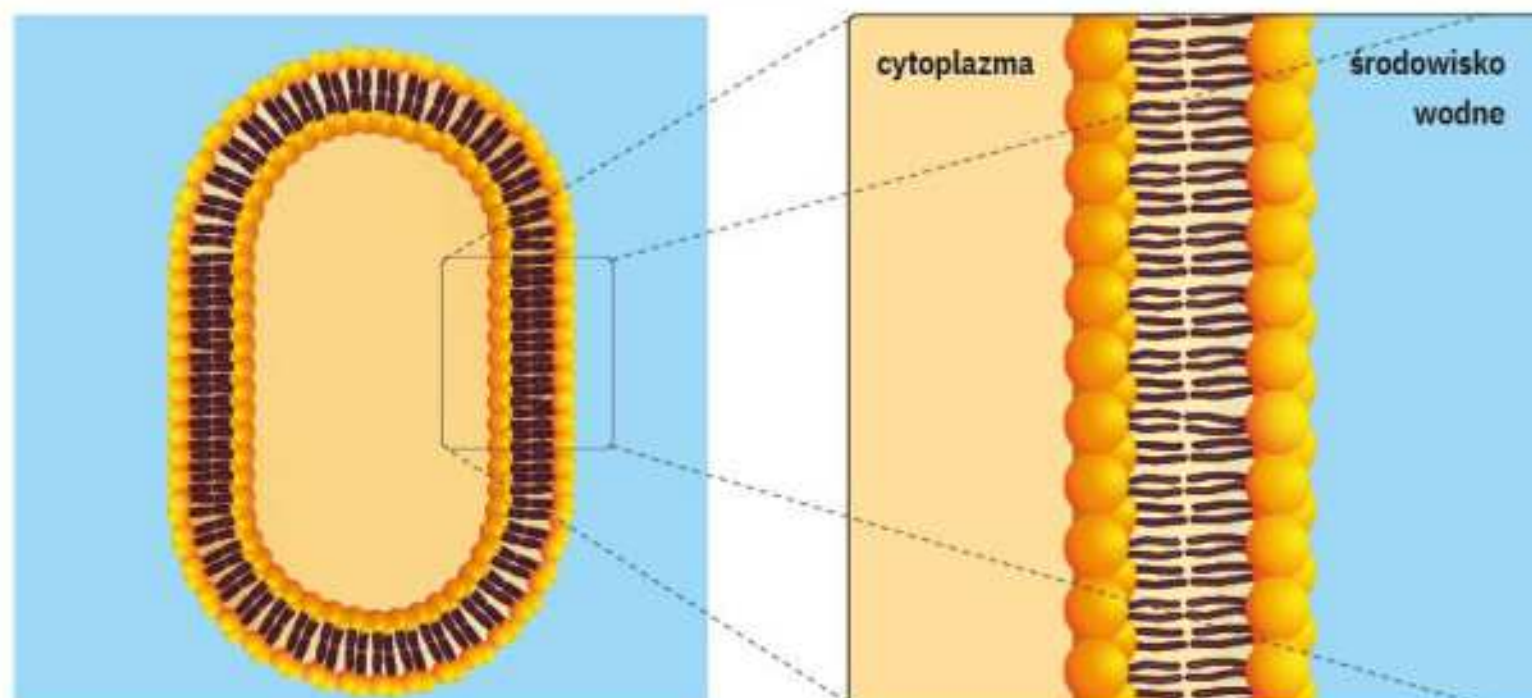
Ryc. II.2.5. Wiązania wodorowe w cząsteczce wody.

oddziaływanie
van der Waalsa

Do słabych oddziaływań należą także **siły van der Waalsa**. W pozbawionych ładunku cząsteczkach na skutek ciągłego przemieszczania się elektronów mogą się pojawić lokalne obszary z dodatnimi i ujemnymi ładunkami. Taka chwilowa polarność sąsiadujących różnoimiennych ładunków może doprowadzić do ich przyciągania. Pojedyncze oddziaływania tego typu są bardzo słabe i występują lokalnie. W dużych cząsteczkach mają duże znaczenie, gdyż łączna ich siła przyciągania jest znaczna.

oddziaływania
hydrofobowe

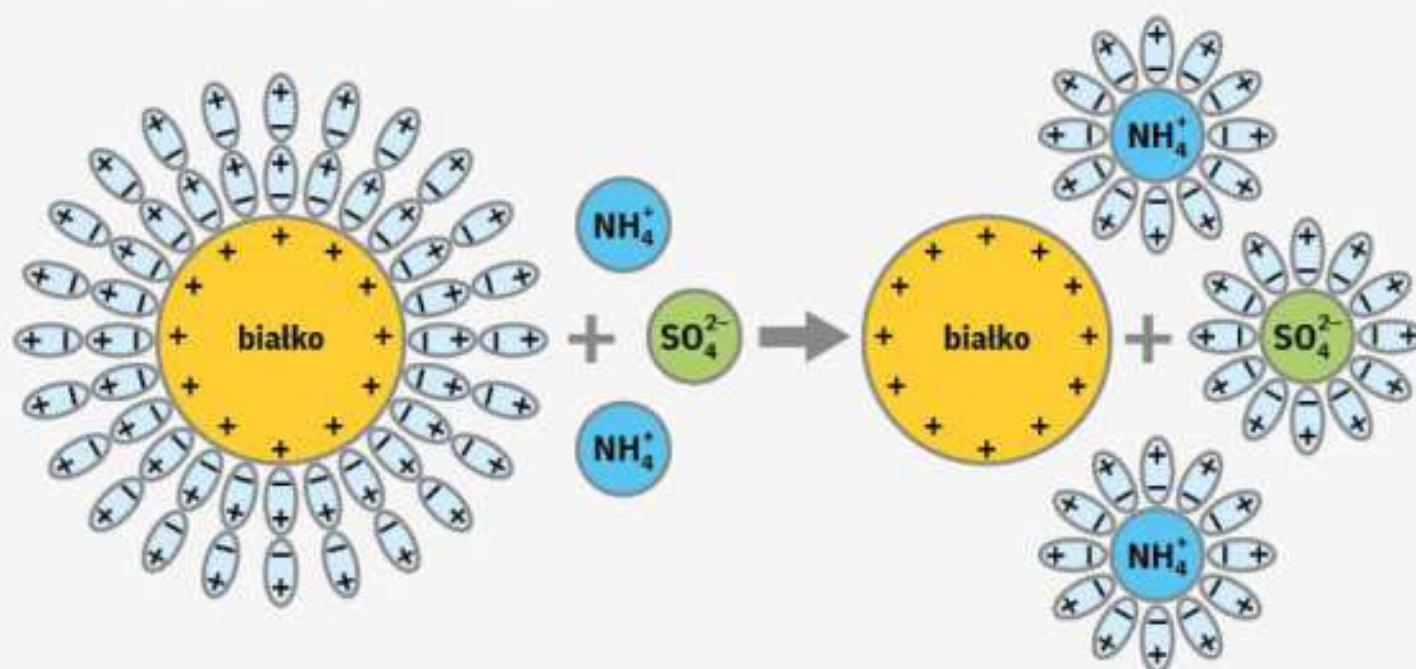
Oddziaływania hydrofobowe należą do słabych oddziaływań między cząsteczkami. Powstają wtedy, gdy w środowisku wodnym znajdują się związki niebędące dipolami. Takimi związkami są tłuszcze, które w roztworze wodnym ustawiają się w taki sposób, aby jak najbardziej ograniczyć kontakt z wodą. Oddziaływania hydrofobowe mają niebywale znaczenie w procesie formowania się błon biologicznych (ryc. II.2.6.).



Ryc. II.2.6. Model błony biologicznej.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Przedstaw podział wiązań chemicznych i podaj ich przykłady.
2. Wyjaśnij różnicę pomiędzy wiązaniem kowalencyjnym spolaryzowanym a niepolarnym.
3. Wymień dwa rodzaje słabych wiązań chemicznych, które mają znaczenie w stabilizacji struktury makrocząsteczek biologicznych.
4. Na poniższym rysunku przedstawiono zasadę wysalania białek, tzn. odciągania przez sole (np. siarczanu amonu) cząsteczek wody, które tworzą na powierzchni białek tzw. otoczkę hydratacyjną. Białka pozbawione tej otoczki wytrącają się w postaci osadu. Usunięcie soli i dodanie wody przywraca otoczkę hydratacyjną białek.



4.1. Jaki rodzaj wiązania umożliwia tworzenie otoczki hydratacyjnej białka?

4.2. Wyjaśnij rolę obecności tego wiązania w makrocząsteczkach biologicznych.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Atomy pierwiastków łączą się ze sobą **wiązaniami chemicznymi**. ◀ s. 31
- **Wiązania dzielimy na silne**, np. kowalencyjne lub jonowe, oraz słabe, np. wodorowe. ◀ s. 31
- **Wiązanie kowalencyjne** powstaje w wyniku uwspólniania jednej lub kilku par elektronów różnych atomów. ◀ s. 32
- **Wiązania kowalencyjne** dzielimy na niepolarne i spolaryzowane. ◀ s. 32
- **Wiązanie jonowe** bazuje na oddziaływaniach elektrostatycznych. ◀ s. 33
- **Wiązanie wodorowe** powstaje pomiędzy obdarzonym ładunkiem dodatnim atomem wodoru jednej cząsteczki a obdarzonym ładunkiem dodatnim atomem drugiej cząsteczki. ◀ s. 33
- **Wiązania wodorowe** warunkują unikatowe właściwości wody oraz stabilizują strukturę makrocząsteczek (np. białek czy DNA). ◀ s. 33
- **Oddziaływania van der Waalsa** należą do oddziaływań słabych i odpowiadają za stabilizację makrocząsteczek. ◀ s. 34
- **Oddziaływania hydrofobowe** odgrywają kluczową rolę w formowaniu się błon biologicznych. ◀ s. 34

3. Budowa i właściwości wody

NA TEJ LEKCJI:

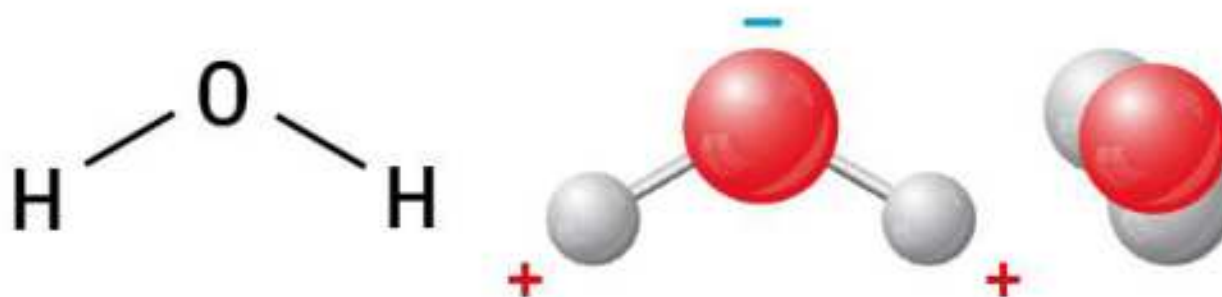
- poznasz budowę i właściwości wody;
- dowiesz się, jakimi właściwościami charakteryzują się sole mineralne.

Woda jest podstawowym składnikiem nieorganicznym wszystkich organizmów. Decyduje o prawidłowym funkcjonowaniu organizmów oraz stanowi ponad połowę masy ich komórek i tkanek. **Średnia zawartość wody** wynosi od 65 do 75% masy ciała i może się zmieniać w zależności od wieku lub stanu aktywności. U noworodka woda stanowi około 85% masy ciała, a u dorosłego człowieka – około 70%. Intensywnie pracujące mięśnie zawierają większą ilość wody (około 75%) niż struktury o wolnym metabolizmie, jak szkliwo zębów (10%) czy kości (20%). Organy przetrwalnikowe roślin – nasiona i zarodniki – aby zahamować metabolizm i przetrwać niekorzystne warunki w stanie życia utajonego, zawierają mało wody (około 10%). Zawartość wody zależy także od środowiska życia, np. w ciałach meduz czy glonów, organizmów wodnych dochodzi do 95%.

woda ▶ **Woda** pełni szereg funkcji, jest m.in. rozpuszczalnikiem dla związków organicznych i nieorganicznych, w którym zachodzą reakcje biochemiczne. Woda jest również substratem (np. reakcja hydrolizy) lub produktem (np. oddychanie tlenowe) istotnych reakcji chemicznych. Stanowi także zewnętrzne środowisko życia organizmów wodnych.

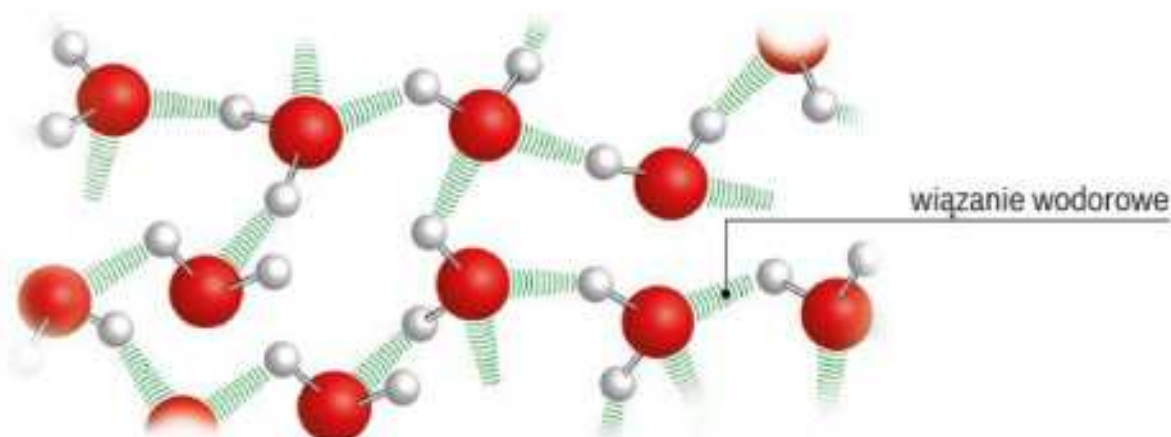
Szczególne role wody wynikają z jej specyficznych właściwości chemicznych i fizycznych. Cząsteczka wody jest zbudowana z dwóch atomów wodoru związanych kowalencyjnie z jednym atomem tlenu. Można w niej wyróżnić dwie części: o cząstkowym ładunku dodatnim, związanym z atomami wodoru, i cząstkowym ładunku ujemnym, przemieszczonym w stronę atomu tlenu (**ryc. II.3.1.**). Cząsteczki o takiej budowie nazywamy **polarnymi** lub dipolami (cząsteczka polarna – dipol).

polarność
cząsteczek



Ryc. II.3.1. Uproszczony model budowy cząsteczki wody.

Dzięki polarnej budowie cząsteczki wody mogą łączyć się ze sobą (**zjawisko asocjacji**) lub z innymi cząsteczkami za pomocą wiązań wodorowych (**ryc. II.3.2.**).



Ryc. II.3.2. Asocjacja cząsteczek wody za pomocą wiązań wodorowych.

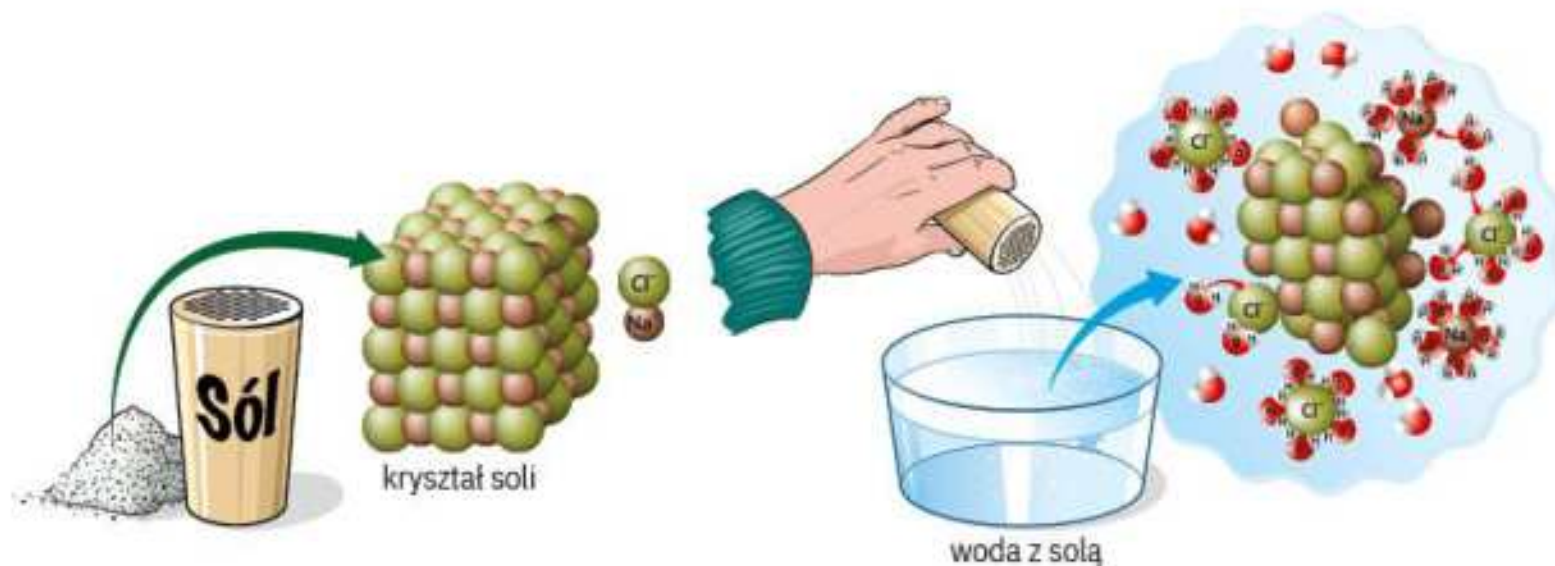
Zdolność wody do tworzenia wiązań wodorowych decyduje o następujących jej **właściwościach**: zdolności do rozpuszczania innych substancji, wysokiej temperaturze topnienia i wrzenia, dużym cieple właściwym, dużym napięciu powierzchniowym oraz tworzeniu lodu.

◀ **właściwości wody**

Uniwersalny rozpuszczalnik

Dzięki **budowie polarnej** cząsteczki wody mogą przyłączać się do cząsteczek innych substancji lub do jonów. Cząsteczki wody rozrywają wiązania wodorowe między cząsteczkami innej substancji polarnej i zastępują je wiązaniami wodorowymi, które same tworzą. Taki proces nazywamy hydratacją (**ryc. II.3.3.**). Wówczas cząsteczki substancji rozpuszczają się w wodzie. Ma to istotne znaczenie dla komórki, w której większość reakcji chemicznych zachodzi w roztworze wodnym. W wodzie rozpuszczają się nie tylko związki jonowe, ale także te, które nie są jonami, np. cukry. Szereg związków polarnych rozpuszcza się w wodzie wchodzącej w skład płynów biologicznych, jak krew czy soki roślinne. Tym samym woda jest uniwersalnym rozpuszczalnikiem.

◀ **budowa polarna wody**



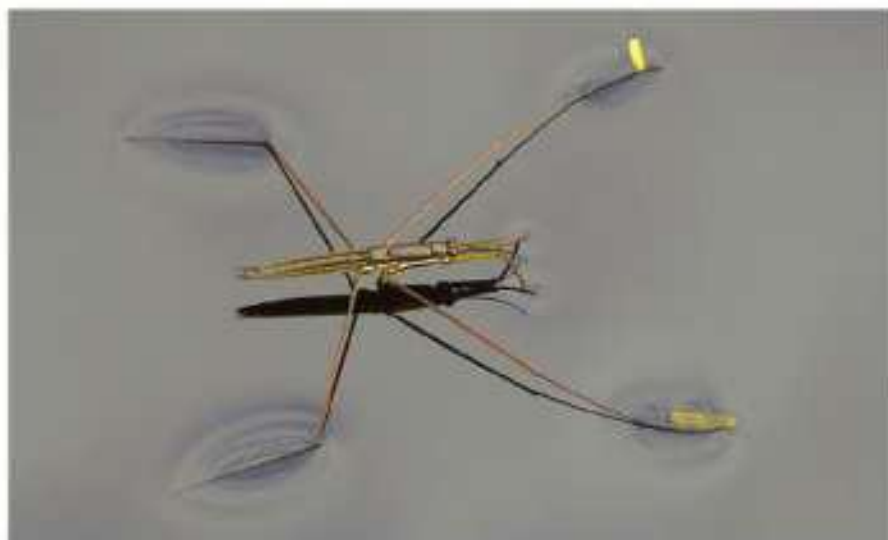
Ryc. II.3.3. Proces hydratacji chlorku sodu NaCl, w którym kation i anion są otoczone przez cząsteczki wody.

Substancje hydrofilowe i hydrofobowe

Wszystkie substancje, które wykazują powinowactwo z wodą, nazywamy hydrofilowymi (z gr. *hydro* – woda, *phileo* – lubię – lubiące wodę). Zaliczamy do nich substancje o charakterze polarnym i jonowym, np. część węglowodanów, kwasy nukleinowe, niektóre sole nieorganiczne (NaCl). Pewne substancje są hydrofilowe, ale nie rozpuszczają się w wodzie. Wśród nich znajdują się duże cząsteczki, np. białka, które są tylko zawieszone w roztworze wodnym komórki. Mieszaninę cieczy, w której są umieszczone cząsteczki, nazywamy **koloidem**. Wszystkie substancje, które nie rozpuszczają się w wodzie, czyli niejonowe i niepolarne, nazywamy hydrofobowymi (z gr. *hydro* – woda, *phobos* – lęk). Przykładem takich substancji są tłuszcze, węglowodory, część białek.

Duże napięcie powierzchniowe

Duże napięcie powierzchniowe wody wynika z tendencji cząsteczek do skupiania się i łączenia za pomocą wiązań wodorowych. Przyciąganie się cząsteczek wody



Ryc. II.3.4. Duże napięcie powierzchniowe wody pozwala na poruszanie się owadów o stosunkowo niewielkiej masie ciała, takich jak nartnik (*Gerris lacustris*). Owady te ślizgają się po wodzie dzięki szeroko rozstawionym środkowym (źródło napędu) i tylnym (funkcja steru) odnóżom, pokrytym niezwilżanymi włoskami, między którymi gromadzą się pęcherzyki powietrza służące do oddychania w zanurzeniu. Przednie odnóża są wyraźnie oddalone od środkowych do przodu tułowia i służą do chwytania zdobyczy.

na granicy wody z powietrzem jest znacznie silniejsze niż w głębi cieczy. Warstwa powierzchniowa wody składa się ze ściśle ułożonych cząsteczek i jest trudna do rozerwania. Stosunkowo duże napięcie powierzchniowe wody pozwala na utrzymanie się na jej powierzchni obiektów cięższych od niej. Takim przykładem są różne gatunki chrząszczy i wodnych pluskwiaków, które mogą po niej „biegać” (ryc. II.3.4.).

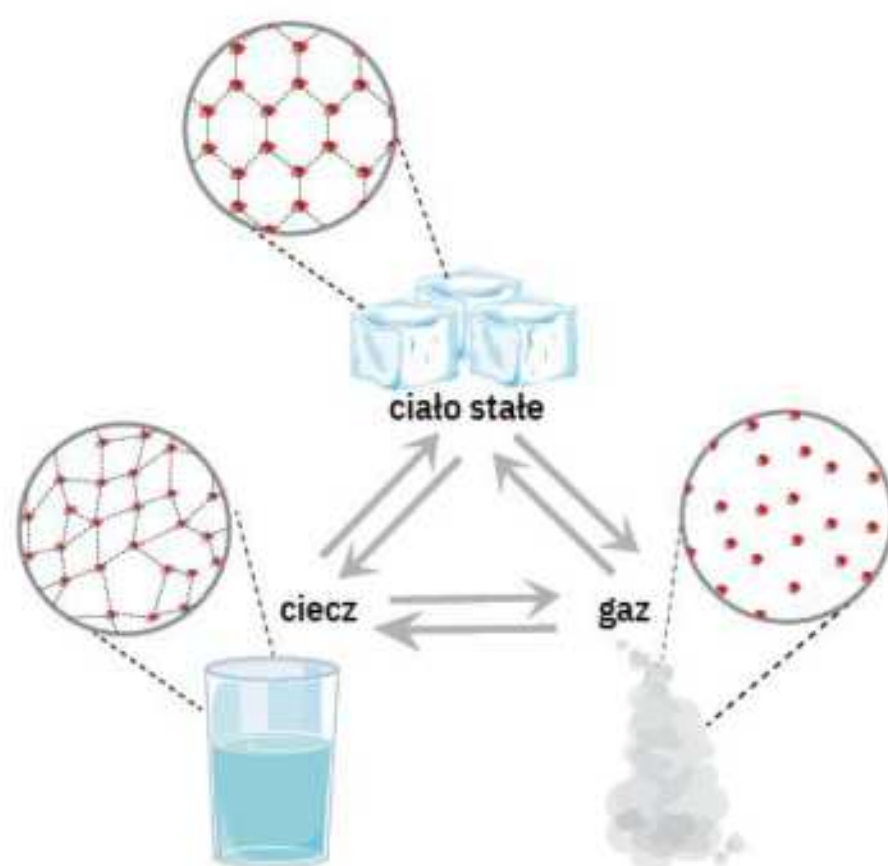
Wzajemne przyciąganie się cząsteczek wody dzięki wiązaniom wodorowym powoduje powstanie sił **kohezji** (spójności). Dzięki tym siłom woda i rozpuszczone w niej substancje odżywcze mogą być transportowane przez komórki tkanki przewodzącej wbrew działaniu siły grawitacji.

Inną cechą wody jest zdolność przyciągania jej cząsteczek przez powierzchnie naładowane elektrycznie, czyli **adhezja**. Woda odznacza się zdolnością przylegania do różnych substancji, np. dobrze przylega do grudek gleby, skał, gliny, a nie przykleja się np. do powierzchni parafiny. Dzięki siłom adhezji cząsteczki wody w tkance przewodzącej nie odrywają się od ścian komórkowych, co umożliwia zachowanie ciągłości słupa wody.

Siły adhezji i kohezji ułatwiają nie tylko transport wody i rozpuszczonych w niej substancji odżywczych w roślinie, lecz także krążenie wody w glebie i krwi w organizmach zwierzęcych.

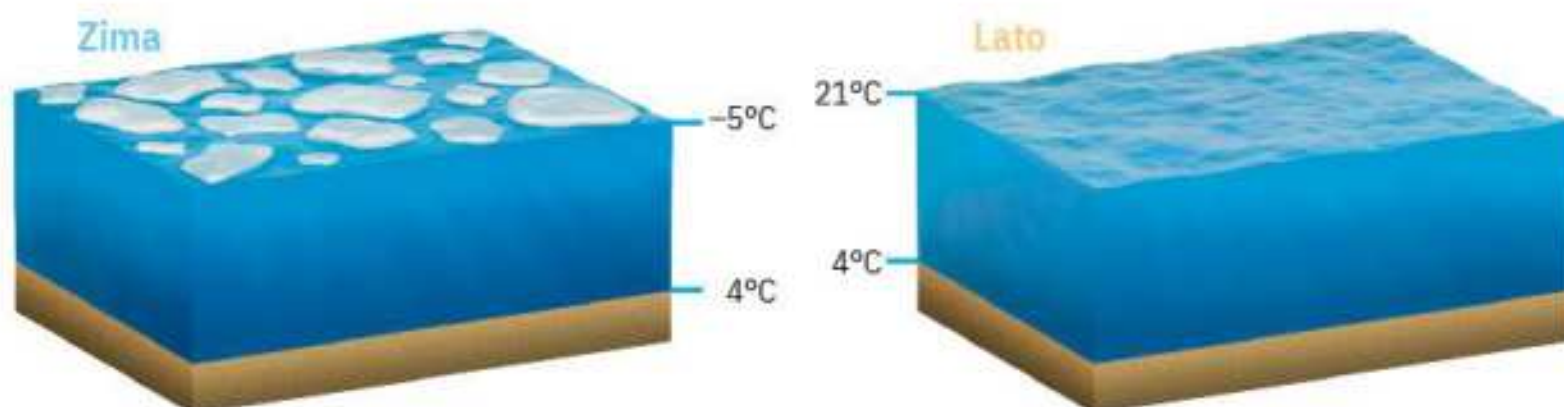
Anomalia cieplna wody

Wraz z obniżeniem temperatury wzrasta objętość wody, a maleje jej gęstość. Największą gęstość ma woda w temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$, a przy dalszym spadku temperatury jej wartość maleje. Wynika to ze zwiększania się odległości między cząsteczkami wody na skutek powstawania regularnie rozmieszczonych wiązań wodorowych. W temperaturze 0°C woda ze stała się w lód i powiększa swoją objętość o mniej więcej jedną dziesiątą. W strukturze krystalicznej lodu dzięki wiązanom wodorowym cząsteczki wody znajdują się w znacznej odległości od siebie i tworzą uporządkowaną strukturę krystaliczną w porównaniu z wodą w stanie płynnym, gdzie wiązania wodorowe między cząsteczkami wody tworzą się losowo (ryc. II.3.5.).



Ryc. II.3.5. Struktura wody w różnym stanie skupienia.

W efekcie gęstość lodu jest mniejsza od gęstości wody w temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$. Lód unosi się na powierzchni zimnej wody i izoluje głębsze jej warstwy przed wpływem niskich temperatur. Pozwala to na przetrwanie zimy organizmom żyjącym pod lodem (ryc. II.3.6.).



Ryc. II.3.6. Głębokie zbiorniki wodne mają przy dnie temperaturę zbliżoną do $+4^{\circ}\text{C}$, ponieważ woda o największej gęstości opada na dno. Latem na dnie zbiornika jest najniższa temperatura, a zimą – najwyższa, co pozwala, np. rybom, przeżyć zimę.

Zmiany gęstości wody wraz ze zmianą temperatury powodują ruch wody, co wpływa korzystnie na przenoszenie substancji wykorzystywanych przez organizmy żyjące w wodzie.

Wysokie ciepło parowania



Ryc. II.3.7. Przeciętnie podczas doby człowiek traci razem z potem 800–1000 ml wody. Ta ilość może wzrosnąć nawet do 10 l podczas intensywnego treningu czy silnego stresu.

Wysokie ciepło parowania wody oznacza, że przejście wody ze stanu ciekłego w stan gazowy pochłania dużą ilość energii. Dostarczona energia cieplna przyspiesza ruch cząsteczek wody i powoduje rozerwanie wiązań wodorowych. W trakcie tej przemiany niektóre zwierzęta usuwają nadmiar ciepła z potem, który zawiera około 99% wody, lub w postaci pary wodnej (w wydychanym powietrzu). Podobnie rośliny obniżają swoją temperaturę, kiedy podczas transpiracji tracą ciepło wraz z wodą wyparowywaną przez aparaty szparkowe, kutykulę lub przetchlinki.

Duże ciepło właściwe

Duże ciepło właściwe wody oznacza, że dla podwyższenia lub obniżenia temperatury wody potrzeba dużej ilości energii cieplnej lub znacznego jej ubytku. Dostarczona energia jest wykorzystywana głównie do rozerwania wiązań wodorowych. Dzięki temu woda zawarta w organizmie chroni go przed nagłymi zmianami temperatury. Zapewnia także stabilne warunki do życia organizmom wodnym.

Duże ciepło właściwe również w istotny sposób kształtuje klimat Ziemi. Ciepło oddawane przez duże zbiorniki wodne takie jak morza czy oceany powoduje, że klimat w strefach nadmorskich jest łagodny, a różnice temperatur między dniem i nocą są mniejsze.

sole
mineralne

► Sole mineralne

Poza wodą istotną rolę w funkcjonowaniu organizmów odgrywają **sole mineralne**. Udział soli mineralnych w suchej masie organizmu wynosi 2–4%. W większości są rozpuszczone w wodzie i występują w postaci kationów i anionów w soku komórkowym i płynach ustrojowych. Część soli mineralnych nie rozpuszcza się w wodzie i ma postać np. kryształów. Związki te są pobierane przez organizmy z pokarmem.

Główne funkcje soli mineralnych to:

- **budulcowa** – fosforan wapnia $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ i węglan wapnia CaCO_3 są głównymi składnikami kości i zębów, fosforany PO_4^{3-} wchodzi w skład kwasów nukleinowych (DNA, RNA) i nukleotydów, węglany i fosforany wapnia w stanie stałym stanowią budulec szkieletów wewnętrznych i zewnętrznych zwierząt, a krzemionka SiO_2 buduje ściany komórkowe skrzypów, traw, turzyc i niektórych protistów;

- **biochemiczna** – warunkują prawidłowy przebieg procesów chemicznych, np. jony sodu Na^+ uczestniczą w powstawaniu i przewodzeniu impulsów nerwowych, jony potasowe K^+ i magnezowe Mg^{2+} są niezbędne do prawidłowej pracy mięśni i do działania wielu enzymów;
- **osmotyczna** – wpływają na kierunek przemieszczania się wody i utrzymanie równowagi wodno-mineralnej u roślin (jony potasu K^+) i zwierząt (jony chlorkowe Cl^- i sodowe Na^+);
- **buforowa** – odpowiadają za utrzymanie na stałym poziomie stężenia jonów wodorowych pH roztworów komórkowych i pozakomórkowych – jony wodorowęglanowe HCO_3^- i wodorofosforanowe(V) H_2PO_4^- .

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, jaki wpływ mają wiązania wodorowe na właściwości wody.
2. Przedstaw właściwości wody, które wynikają z jej budowy dipolowej.
3. Podaj, w jakich stanach skupienia występuje woda. Dlaczego mają one duże znaczenie dla organizmów żywych?
4. Podaj przykłady soli mineralnych pełniących następujące funkcje w organizmach:
 - a. strukturalne,
 - b. biochemiczne,
 - c. osmotyczne i buforujące.
 Wyjaśnij rolę każdej z wymienionych funkcji.
5. *Powierzchnie ciała wielu organizmów są hydrofobowe, co umożliwia na przykład funkcjonowanie „fizycznego skrzela”, a więc korzystanie pod wodą z zasobów tlenu pochodzącego z pęcherza powietrza przyczepionego do powierzchni ciała. Pająk topik (Argyroneta) gromadzi pod wodą zapas powietrza w dzwonie z pajęczyny.*

W. Lampert, U. Sommer, *Ekologia wód śródlądowych*,
Wydawnictwo PWN, Warszawa 1996, s. 75.

Na podstawie przedstawionego tekstu wyjaśnij, jaka cecha wody pozwala na wykorzystanie przez wiele organizmów błonki powierzchniowej do przyczepiania się lub przemieszczania się.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Podstawowym związkiem nieorganicznym każdego organizmu jest **woda**. ◀ s. 36
- Polarne cząsteczki wody łączą się wiązaniami wodorowymi, co decyduje o takich jej **właściwościach** jak: duże napięcie powierzchniowe, maksymalna gęstość w temperaturze 4°C , wysokie ciepło właściwe i parowania, co ma niezwykle istotne znaczenie dla funkcjonowania organizmów. ◀ s. 37
- Woda dzięki **polarności cząsteczek** jest dobrym rozpuszczalnikiem i środowiskiem zachodzenia reakcji chemicznych. ◀ s. 37
- **Sole mineralne** pełnią liczne funkcje, między innymi budulcowe, biochemiczne oraz osmotyczne i buforujące. ◀ s. 40

4. Organiczne związki węgla

NA TEJ LEKCJI:

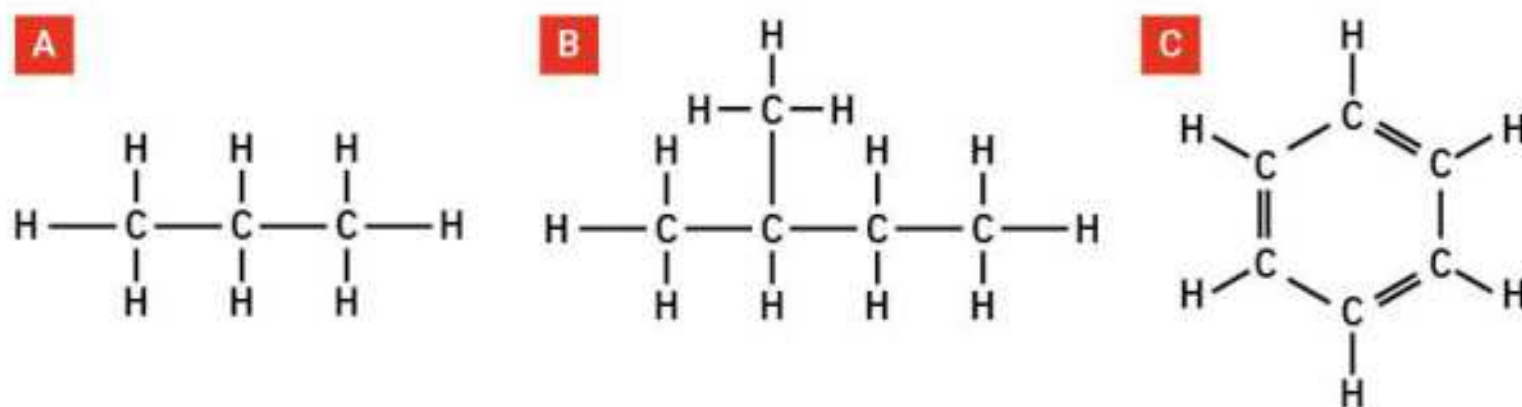
- dowiesz się, jak różnorodne są związki węgla;
- poznasz grupy funkcyjne i ich właściwości;
- przeanalizujesz sposób powstawania polimerów i makrocząsteczek.

organiczne
związki węgla

właściwości
atomów węgla

► **Organiczne związki węgla** są szeroko rozpowszechnione w przyrodzie. Nazwa „organiczne” to ślad dawnego poglądu, że substancje te mogą być wytwarzane tylko w organizmach żywych. Znamy ponad 5 milionów organicznych związków węgla. Na ich różnorodność wpływają następujące **cechy tego pierwiastka**:

- atom węgla może tworzyć cztery wiązania kowalencyjne z innymi atomami;
- atom węgla może łączyć się wiązaniami chemicznymi z innymi atomami węgla, a także z wieloma innymi atomami (m.in. tlenem, azotem, fosforem, siarką);
- zależnie od liczby wspólnych par elektronowych, między atomami węgla w tej samej cząsteczce związku mogą tworzyć się pojedyncze, podwójne lub potrójne wiązania. Jedna cząsteczka może mieć jednocześnie różne z nich (**ryc. II.4.1C**);
- związki organiczne mogą mieć formę prostego lub rozgałęzionego łańcucha oraz pierścienia (**ryc. II.4.1.**);



Ryc. II.4.1. Związki węgla mogą mieć formę prostego (A), rozgałęzionego (B) łańcucha lub pierścienia (C).

izomery

- związki o takim samym wzorze strukturalnym, a innej strukturze, nazywamy **izomerami**. Izomery różnią się między sobą właściwościami chemiczno-fizycznymi, pełnią często inne funkcje;

grupy
funkcyjne

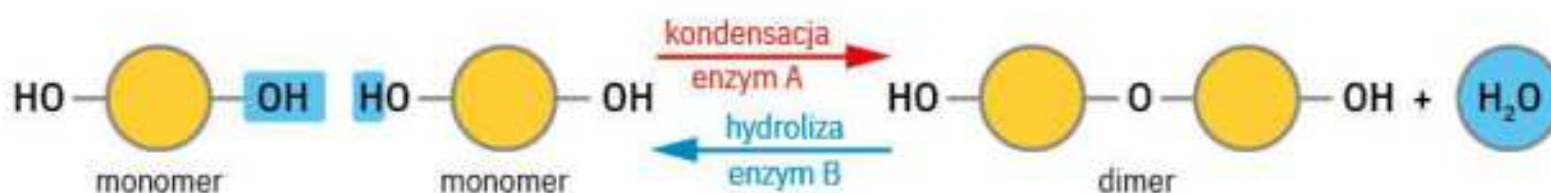
- związki węgla przyłączają dodatkowe grupy atomów – tzw. **grupy funkcyjne**, które nadają tym cząsteczkom charakterystyczne właściwości fizyko-chemiczne oraz warunkują sposób oddziaływania z innymi cząsteczkami (**tab. II.4.1.**).

Tab. II.4.1. Najważniejsze grupy funkcyjne organicznych związków węgla

Grupa funkcyjna	Wzór	Właściwości	W jakich związkach występuje
hydroksylowa	–OH	polarna	alkohole
• aldehydowa	–CHO	polarna	aldozy
• ketonowa	$\begin{array}{c} \diagup \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagdown \end{array}$		ketozy
karboksylowa	–COOH	słabo kwaśna, może odłączać się jon H^+	kwasy tłuszczowe, tłuszcze
aminowa	–NH ₂	słabo zasadowa, może przyłączać jon H^+	aminokwasy, białka
fosforanowa	–PO ₄ ³⁻	słabo kwaśna, może odłączać się jeden lub dwa jony H^+	kwasy nukleinowe
tiolowa	–SH	łatwo ulega utlenieniu, tworzy <u>mostki disiarczkowe</u>	aminokwasy siarkowe (np. cysteina), białka

Wiązanie pomiędzy atomami węgla w cząsteczkach organicznych jest silne i niełatwo ulega zerwaniu, z drugiej strony jest na tyle słabe, że może ulec rozerwaniu w komórce i tym samym ulegać dalszym przemianom. Wiązania węgiel-węgiel stanowią „szkielet” wszystkich związków organicznych, w tym makrocząsteczek w komórce, m.in. białek czy węglowodanów. Związki te nazywane są zwyczajowo **biopolimerami**, czyli połączeniami powtarzających się mniejszych jednostek zwanych **monomerami**. Powstają one w procesie zwanym polimeryzacją kondensacyjną (**ryc. II.4.2**). Monomery wszystkich komórkowych makrocząsteczek (jest ich w sumie 40) łączą się ze sobą w różnych kombinacjach, dając w efekcie ogromną ich liczbę. Na przykład monomerami białek jest tylko 20 różnych aminokwasów, a liczbę białek z nich utworzonych liczymy w tysiącach (samiych enzymów znanych jest ponad 4000).

◀ polimery i monomery



Ryc. II.4.2. Powstawanie i rozpad dimerów. Dołączanie dużej liczby kolejnych monomerów prowadzi do powstania biopolimerów (związków makrocząsteczkowych).

Organicznymi związkami komórki (**makrocząsteczkami**) są białka, węglowodany, lipidy i kwasy nukleinowe (**tab. II.4.2**). Inne substancje organiczne stanowią mniejszy procent masy komórki, co nie oznacza, że mają mniejsze znaczenie biologiczne.

◀ makrocząsteczki

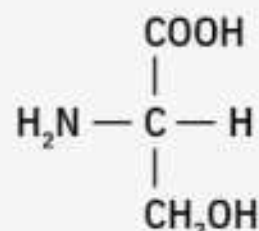
Tab. II.4.2. Względna liczba cząsteczek różnych substancji w przeciętnej komórce zwierzęcej

Związek chemiczny	Zawartość w świeżej masie [%]	Przeciętny ciężar cząsteczkowy pojedynczej cząsteczki
woda	85	18
białka	10	36 000
DNA	0,4	1 000 000
RNA	0,7	40 000
lipidy	2,0	700
pozostałe związki organiczne	0,4	250
związki nieorganiczne	1,5	55

W każdej żywej komórce ilość białek zwykle przewyższa ilość lipidów, węglowodanów i kwasów nukleinowych. Istnieją jednak komórki wyspecjalizowane, w których stosunki te przedstawiają się nieco inaczej, np. w komórkach tkanki tłuszczowej przeważają lipidy, a w komórkach roślin wyższych – węglowodany, z których zbudowana jest ściana komórkowa.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

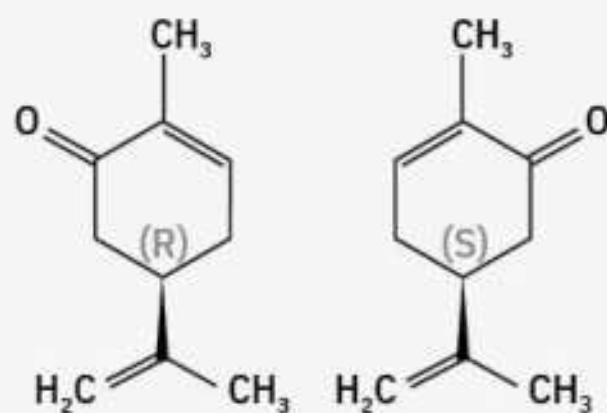
- Wyjaśnij przyczyny obserwowanej różnorodności związków organicznych.
- Jakie grupy funkcyjne zawiera związek przedstawiony obok? Jakie właściwości mają te grupy?
- Makrocząsteczki powstają w wyniku kondensacji monomerów. Ze względu na sposób ich łączenia (np. kolejność, rozgałęziania) występują w olbrzymiej liczbie. Podobnie jak słowa są tworzone z liter, tak polimery powstają z monomerów.



Utwórz jak najwięcej różnych słów z liter (wszystkich lub ich części) wchodzących w skład nazwy:

C H E M I A O R G A N I C Z N A

- Zaprezentowany obok wzór przedstawia izomery optyczne karwonu – organicznego związku węgla. Jeden z izomerów ma zapach mięty, a drugi – kminu. Na podstawie tych informacji oraz wzorów odpowiedz na pytania i wykonaj polecenia.

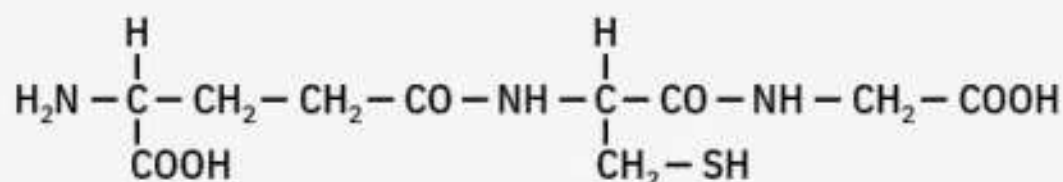


a) Jakie atomy i w jakiej liczbie wchodzą w skład obu przedstawionych związków?

b) Omów rozmieszczenie podstawników w cząsteczkach obu związków.

c) Czy różną aktywność biologiczną tych związków można powiązać z ich strukturą?

- Poniższy wzór przedstawia glutation – ważny komórkowy antyutleniacz, czyli związek mający zdolność usuwania reaktywnych form tlenowych, które mogą być przyczyną degradacji lipidów, białek czy kwasów nukleinowych.



5.1. Wskaż te cechy glutationu, na podstawie których zaliczysz go do związków organicznych lub nieorganicznych.

5.2. Przerysuj wzór do zeszytu i zaznacz na rysunku co najmniej dwie grupy funkcyjne w cząsteczce glutationu. Podaj ich charakter chemiczny.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Chemia organiczna zajmuje się badaniem **związków węgla**. ◀ s. 42
- **Atomy węgla dzięki swoim właściwościom** łączą się ze sobą oraz z atomami innych pierwiastków, tworząc cząsteczki o różnych kształtach i funkcjach. ◀ s. 42
- **Grupy funkcyjne** (hydroksylowa, karbonylowa, karboksylowa, aminowa, fosforanowa i sulfhydrylowa) nadają związkowi określone właściwości i determinują ich aktywność biologiczną. ◀ s. 42
- **Makrocząsteczki komórki** (białka, węglowodany i kwasy nukleinowe) są polimerami zbudowanymi z powtarzających się podjednostek zwanych monomerami. ◀ s. 43

5. Węglowodany – budowa i znaczenie

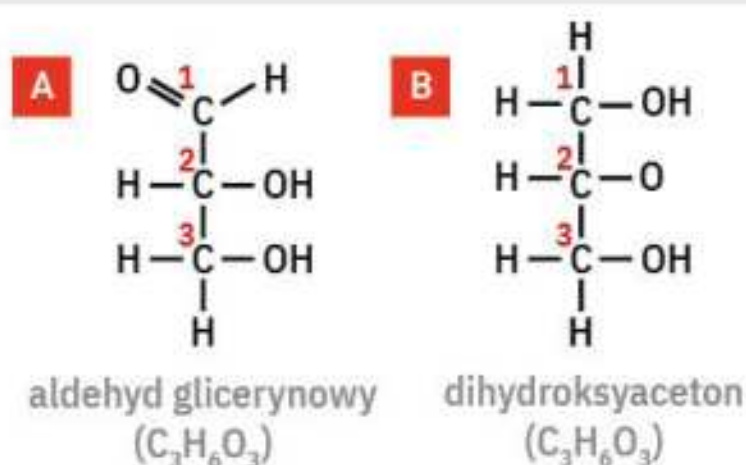
NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak są zbudowane monosacharydy i disacharydy;
- poznasz różnorodność polisacharydów;
- przeanalizujesz funkcje węglowodanów;
- prześledzisz, w jaki sposób wykrywa się węglowodany w materiale biologicznym.

Węglowodany (cukrowce, sacharydy, cukry) są zbudowane z atomów węgla, tlenu oraz wodoru, przy czym najczęściej na jeden atom węgla przypadają dwa atomy wodoru i jeden atom tlenu (określenie „węglowodan”, czyli uwodniony węgiel, wskazuje, że stosunek H : O jest taki sam, jak w wodzie, czyli 2 : 1). Węglowodany zbudowane z kilkuwęglowego łańcucha nazywamy prostymi lub **monosacharydami**. Połączenie dwóch monosacharydów wiązaniem kowalencyjnym to **disacharyd (dwucukier)**. Cząsteczki powstałe z połączenia wielu monomerów to wielocukry (**polisacharydy**). ◀ węglowodany



Ryc. II.5.1. Podział węglowodanów.



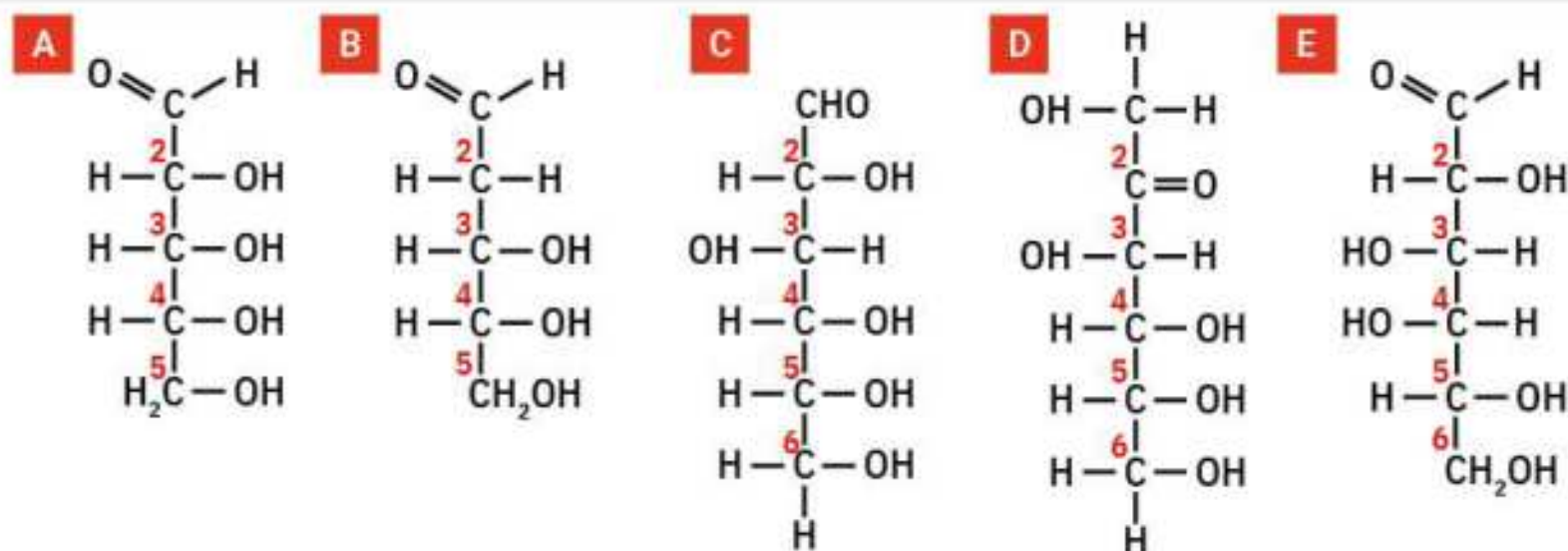
Ryc. II.5.2. Monosacharydy mogą być (A) aldozami (aldehyd glicerynowy) lub **(B) ketozami** (dihydroksyaceton). Obydwa monosacharydy są triozami, ponieważ zawierają trzy atomy węgla.

Cukry proste stanowią paliwo energetyczne komórki oraz są składnikami materii żywej (np. cukier prosty deoksyryboza wchodzi w skład szkieletu DNA). Z chemicznego punktu widzenia monosacharydy to **aldehydy** lub **ketony** zawierające dwie lub więcej grup hydroksylowych ($-\text{OH}$). Szkielet węglowy cukrów prostych może być zbudowany z od trzech do siedmiu atomów węgla. Do jednego z nich jest przyłączona grupa aldehydowa lub ketonowa, a przy pozostałych znajdują się grupy $-\text{OH}$. **Aldozy** mają grupę aldehydową, w której atom węgla połączony jest z atomem tlenu i wodoru ($-\text{CHO}$). W **ketozach**

grupa ketonowa ($=\text{CO}$) połączona jest z dwoma atomami węgla. Rozważmy przykład dwóch najprostszych, trójwęglowych monosacharydów: aldehdu glicerynowego i dihydroksyacetonu (**ryc. II.5.2.**). Aldehyd glicerynowy jest aldozą, bo ma na końcu łańcucha grupę aldehydową. Dihydroksyaceton to ketoza, ponieważ zawiera grupę ketonową. Oba te cukry proste nazywamy **triozami**, gdyż ich szkielet węglowy składa się z trzech atomów węgla (**ryc. II.5.2.**). Analogicznie, monosacharydy zawierające cztery, pięć, sześć czy siedem atomów węgla będziemy nazywać: tetrozami, pentozami, heksozami i heptozami.

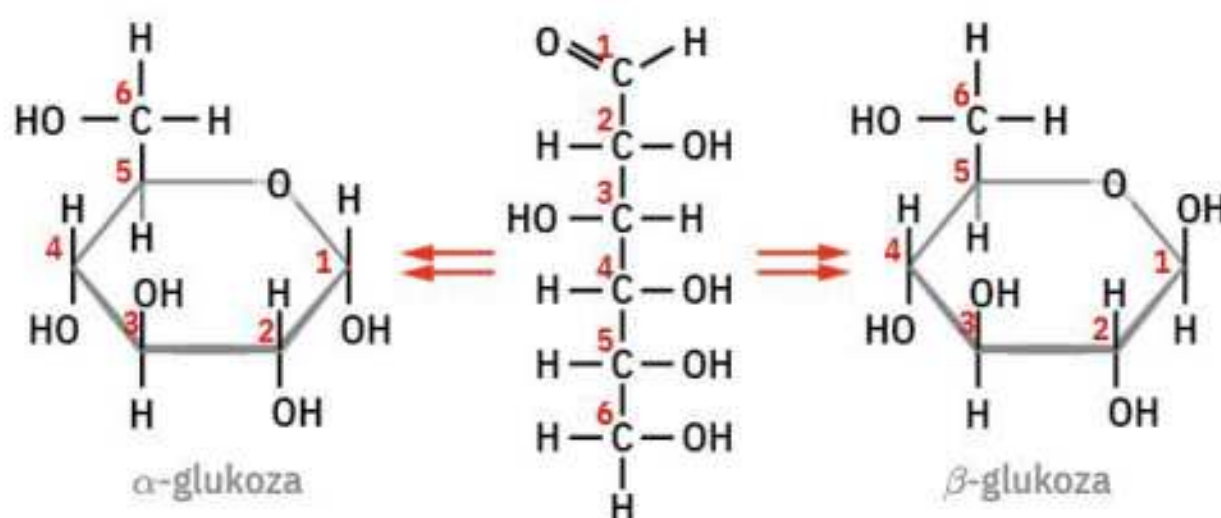
najpowszechniejsze monosacharydy

► Na **rycinie II.5.3.** przedstawiono typowe monosacharydy. Najlepiej poznanymi monosacharydami są pentozy: **ryboza** i **deoksyryboza** oraz heksozy: **glukoza** (aldoza), **fruktoza** (ketoza) oraz **galaktoza** (aldoza). Atomy węgla w cząsteczkach są ponumerowane. I tak na przykład cyfra 2 w cząsteczce glukozy oznacza drugą pozycję atomu węgla, licząc od końca z grupą aldehydową (**ryc. II.5.3.**).



Ryc. II.5.3. Powszechne monosacharydy: (A) ryboza, (B) deoksyryboza, (C) glukoza, (D) fruktoza, (E) galaktoza.

Strukturę cząsteczek monosacharydów można przedstawić w postaci łańcuchowej lub w formie pierścieniowej (**ryc. II.5.4.**). W roztworach oraz w komórce otwarte struktury cukrów prostych ulegają przekształceniu w formę pierścieniową. Na przykład glukoza ma postać sześciowęglowego pierścienia, który jest utworzony z pięciu atomów węgla oraz z atomu tlenu. Zamykanie się formy łańcuchowej glukozy i tworzenie pierścienia wynika z wewnątrzcząsteczkowego przegrupowania atomów. Ten proces może prowadzić do powstania dwóch izomerów glukozy, różniących się ułożeniem grupy hydroksylowej przy pierwszym atomie węgla (C1). Jeśli grupa $-OH$ znajdzie się po tej samej stronie pierścienia, co grupa $-CH_2OH$, to powstaje **β -glukoza**, a jeśli po przeciwnej, to będzie to **α -glukoza** (**ryc. II.5.4.**). Ta drobna różnica ma ogromne znaczenie w czasie łączenia się reszt glukozy w **polisacharydach** (patrz niżej).



Ryc. II.5.4. Forma pierścieniowa i łańcuchowa α - i β -glukozy.

■ Funkcje cukrów prostych

Pięciowęglowa **ryboza** jest aldozą i stanowi składnik szkieletu kwasu rybonukleinowego (RNA) oraz koenzymów (składników białek niezbędnych do ich aktywności). Pozbawiona jednej grupy $-OH$ **deoksyryboza** wchodzi w skład DNA. **Glukoza**, zwana cukrem gronowym, to podstawowe źródło energii wszystkich komórek. Występuje w owocach (np. w winogronach, gdzie jest jej od 10 do 30%) oraz w miodzie. To najważniejszy monosacharyd, ponieważ jest substratem do wytworzenia większości di- i polisacharydów. Roztwory glukozy są szeroko stosowane w medycynie w postaci odżywczych kroplówek (**ryc. II.5.5.**). Nie mniejsze zastosowanie glukoza ma w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym.



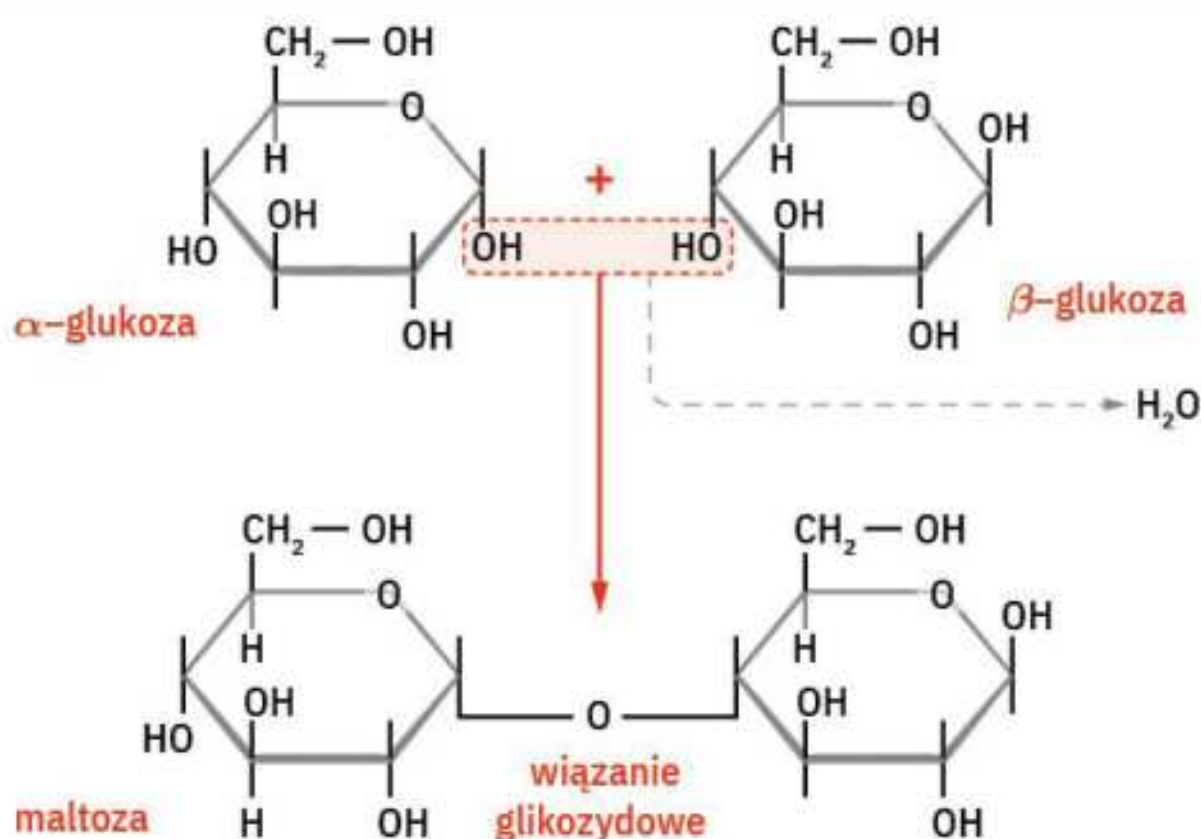
Ryc. II.5.5. Odżywcza glukoza w postaci kroplówki jest podawana pacjentom dożylnie.

fruktoza ▶ **Fruktoza** wchodzi w skład sacharozy. W stanie wolnym występuje w dużych ilościach w miodzie i w owocach, jest także powszechnie stosowana jako słodzik, a w komórkach przekształcana w pochodne glukozy. Glukoza i fruktoza mają ten sam wzór sumaryczny, ale inną strukturę, dlatego mówimy, że są one izomerami strukturalnymi. Różnica w budowie przekłada się m.in. na ich smak – fruktoza jest słodsza od glukozy. Warto zauważyć, że coraz częściej diagnozuje się problem tzw. nietolerancji fruktozy. Osoby z tym schorzeniem muszą stosować dietę eliminującą fruktozę z pokarmów.

galaktoza ▶ **Galaktoza** razem z glukozą jest składnikiem laktozy występującej w mleku. W połączeniu z glukozą i fruktozą tworzy roślinny trisacharyd – rafinozę. Galaktoza wchodzi w skład polisacharydów, wielkocząsteczkowych związków organicznych (np. agar-agar) oraz wiąże się z lipidami (w tzw. glikolipidach). Galaktoza jest mniej słodka niż glukoza i gorzej rozpuszcza się w wodzie.

Disacharydy – budowa i funkcje

disacharydy ▶ **Disacharydy (dwucukry)** stanowią połączenie dwóch reszt pierścieniowych cukrów prostych za pomocą **wiązania glikozydowego**. W tego typu wiązaniu centralnie umieszczony atom tlenu łączy się wiązaniami kowalencyjnymi z atomami węgla dwóch reszt monosacharydów (ryc. II.5.6.).



Ryc. II.5.6. Disacharydy powstają w wyniku polimeryzacji kondensacyjnej dwóch monosacharydów.

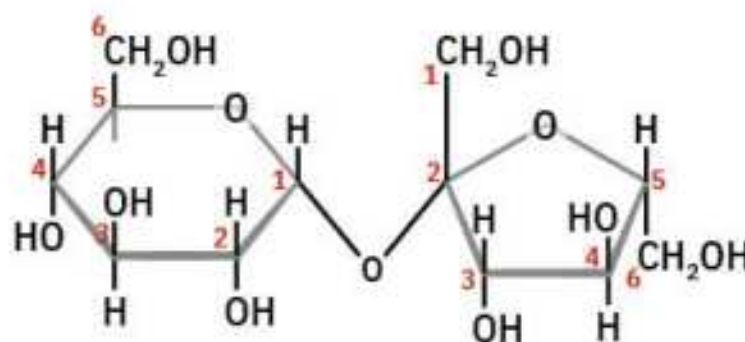
Powszechnie występującymi disacharydami są: sacharoza, maltoza oraz laktoza.

sacharoza ▶ **Sacharoza** jest zasadniczym składnikiem cukru spożywczego otrzymywanego na skalę przemysłową z trzciny cukrowej lub buraków cukrowych. Sacharoza u roślin

stanowi formę transportową cukrów. Można ją znaleźć w każdej roślinie oraz w każdym organie roślinnym (łodygach, liściach, owocach, nasionach itd.). Zawartość sacharozy w warzywach i owocach przedstawiono w **tabeli II.5.1.**

Tab. II.5.1. Zawartość sacharozy w wybranych warzywach i owocach

Produkt	Zawartość sacharozy [%]
korzeń buraka cukrowego	16–22
trzcina cukrowa	13–16
sok sorgo	~12
śliwki	9–10
melony	8
banany	5
pomarańcze	4–6
jabłka	0,5–0,6



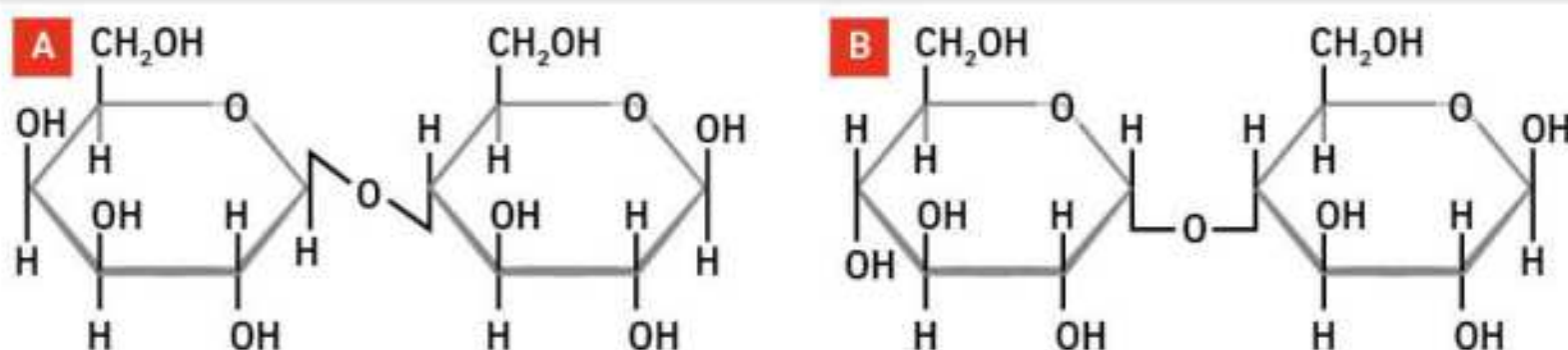
Ryc. II.5.7. Sacharoza jest zbudowana z reszt α -glukozy i β -fruktozy połączonych wiązaniem α,β -1,2-glikozydowym.

Laktoza to dwucukier występujący w mleku. Składa się z β -glukozy i β -galaktozy połączonych wiązaniem β -1,4-glikozydowym (**ryc. II.5.9.**). Dwucukier ten otrzymuje się z serwatki podczas produkcji sera. Szeroko stosuje się go jako wypełniacz w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym. Mleko ludzkie zawiera od 5,5 do 7,5% laktozy, podczas gdy krowie mniej – do 4,9%. Laktoza odgrywa ważną rolę u niemowląt, ponieważ jest źródłem cukrów prostych. Niektóre osoby nie potrafią trawić laktozy. Wynika to z niedoboru lub braku **laktazy** – enzymu rozkładającego laktozę (**ryc. II.5.8.**). Osoby te cierpią na zespół zaburzeń jelitowo-żołądkowych określanych jako **nietolerancja laktozy**. U tych osób laktoza przechodzi do jelita grubego i tam ulega fermentacji przez bakterie. W wyniku tego procesu pojawiają się dolegliwości żołądkowo-jelitowe, m.in. wzdęcia, gazy czy biegunka. To dość powszechne obecnie schorzenie (dotyczy ok. 25% Europejczyków i aż 90% Azjatów) można ograniczyć, stosując w diecie produkty wolne od

◀ laktoza

laktozy (np. mleko, sery) lub dostarczając do organizmu enzym laktaza (w postaci pastylek lub kropli).

maltoza ▶ **Maltozę** budują dwie, połączone wiązaniem α -1,4-glikozydowym, reszty α -glukozy (**ryc. II.5.8.**). Maltoza powstaje w wyniku hydrolizy polisacharydów, takich jak skrobia czy glikogen. Jest składnikiem syropu kukurydzianego oraz słodcu – zbożowego surowca wykorzystywanego do produkcji m.in. piwa.

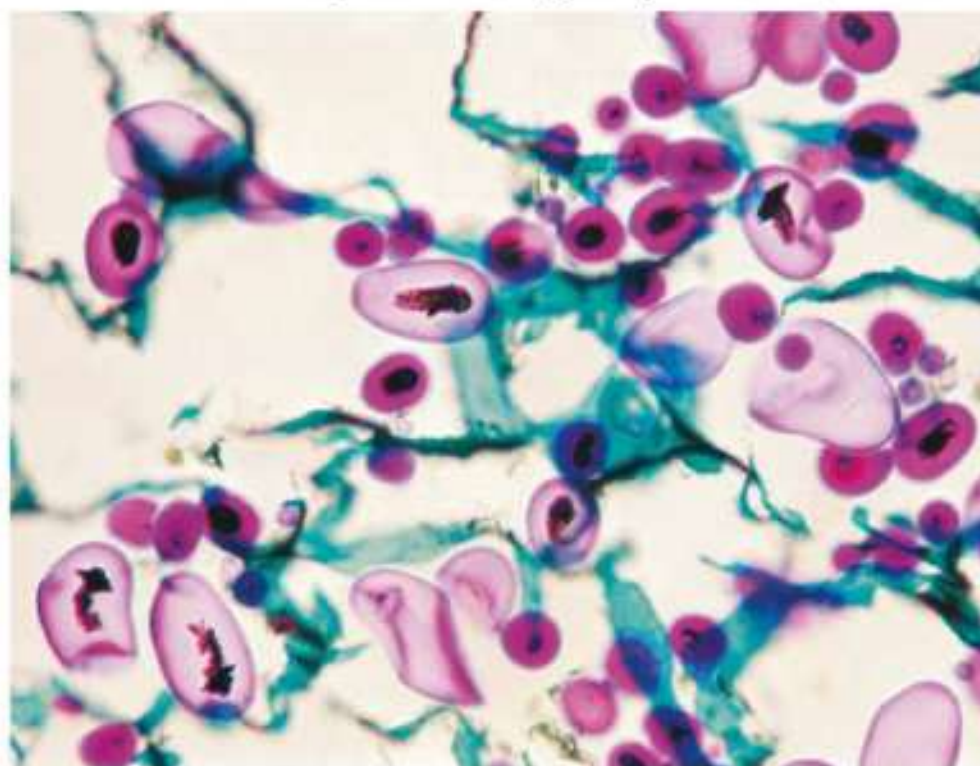


Ryc. II.5.8. Disacharydy: laktoza (A) i maltoza (B).

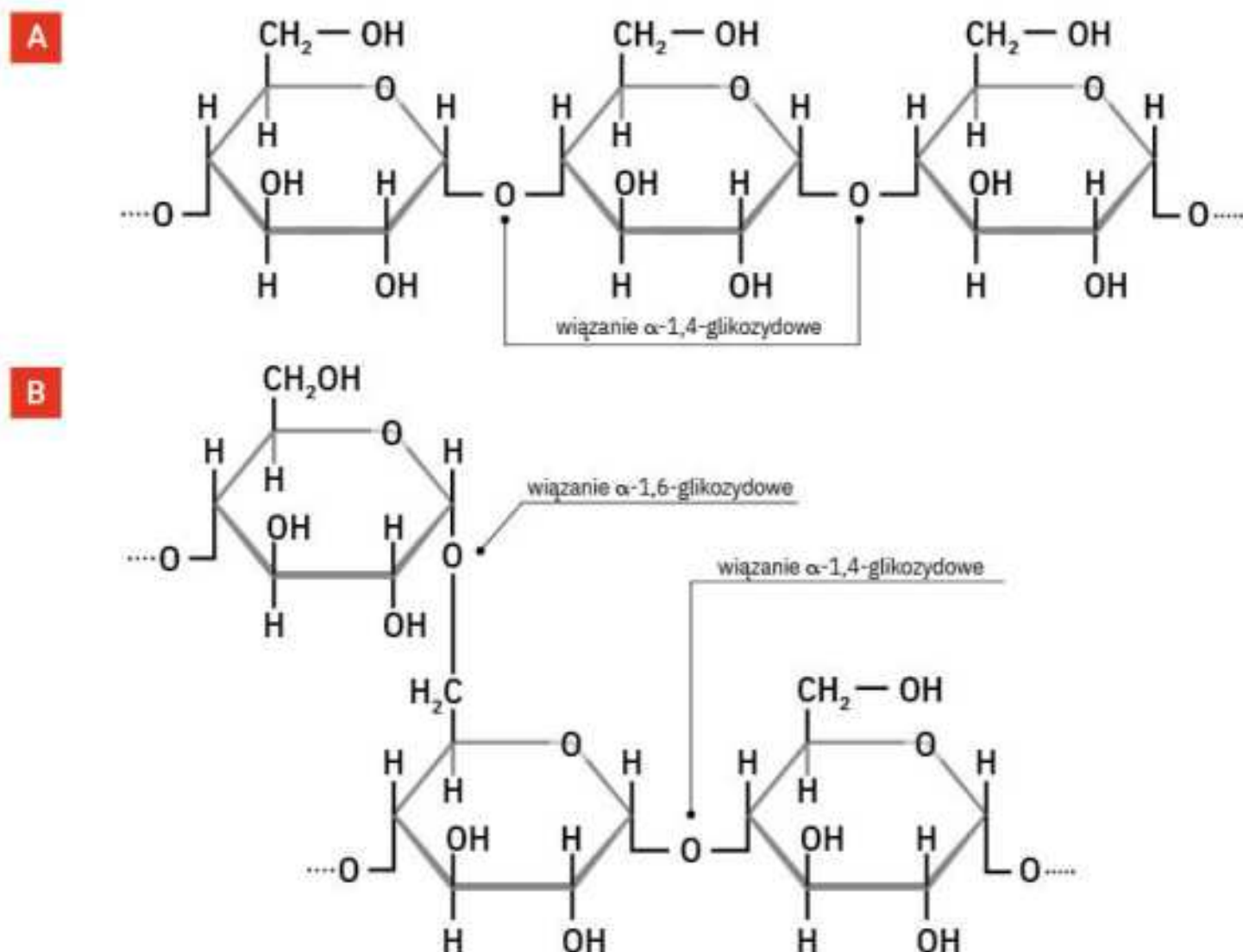
Polisacharydy

polisacharydy ▶ **Polisacharydy** (wielocukry) stanowią połączenia wielu (nawet tysięcy) reszt cukrów prostych (tych samych lub różnych). Są najbardziej rozpowszechnionymi węglowodanami w przyrodzie. Do polisacharydów zaliczamy m.in. skrobię, glikogen, celulozę czy chitynę.

skrobia ▶ **Skrobia** jest zbudowana z cząsteczek α -glukozy połączonych wiązaniami α -glikozydowymi. To typowy polisacharyd zapasowy u roślin. Występuje w dwóch postaciach – **amylozy** i **amylopektyny** (**ryc. II.5.10.**). W amylozie reszty α -glukozy (od 300 do 1000) łączą się w proste łańcuchy wiązaniem α -1,4-glikozydowym. W amylopektynie, oprócz wiązania α -1,4 pomiędzy resztami glukozy, występuje dodatkowo wiązanie α -1,6-glikozydowe, co prowadzi do rozgałęzienia cząsteczki. Na amylopektynę przypada ok. 1000 reszt glukozy, a udział tej formy skrobi jest znacznie większy niż amylozy (ok. 80–85%). Skrobia gromadzi się w postaci ziaren w nasionach (np. zbóż) lub w bulwach (np. ziemniaki, **ryc. II.5.9.**). Kształt i rozmiar tych ziaren są zależne od gatunku rośliny.

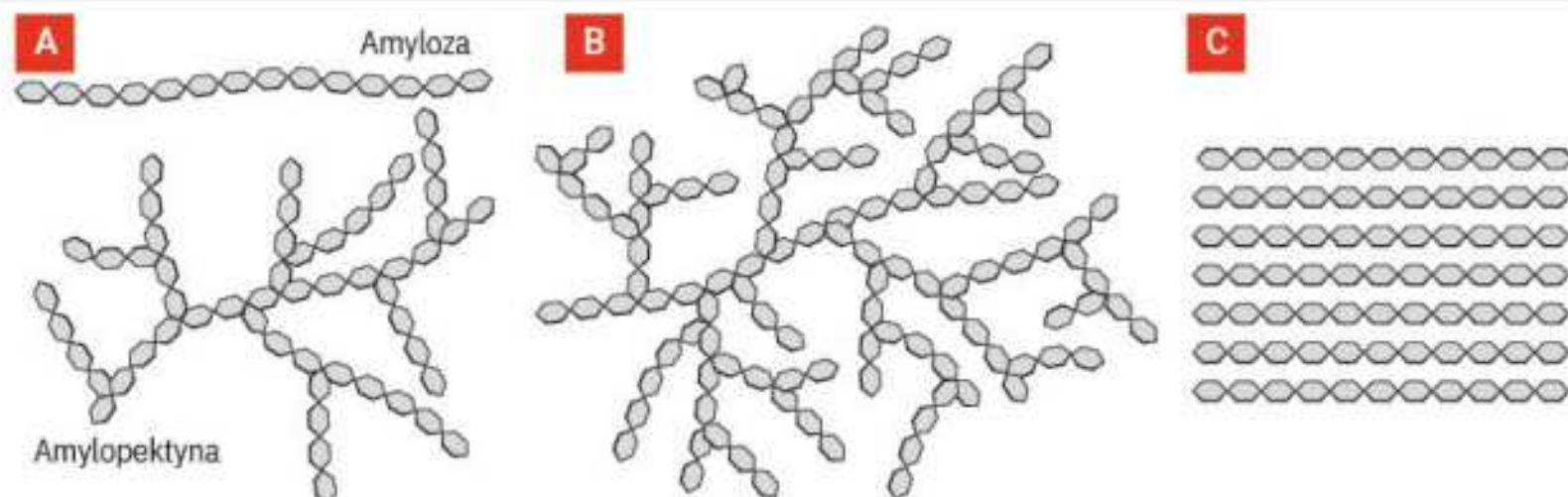


Ryc. II.5.9. Ziarna skrobi w bulwach ziemniaka (preparat mikroskopowy).



Ryc. II.5.10. Budowa skrobi. Skrobia składa się z wielu reszt glukozy i występuje w dwóch formach: (A) amylozy (proste łańcuchy) i (B) amylopektyny (rozgałęzione).

Glikogen to zapasowy polisacharyd zwierzęcy, szczególnie obficie występujący w wątrobie (ok. 5% całej masy tego narządu) i mięśniach szkieletowych (ok. 0,7%). Zbudowany z reszt α -glukozy (nawet do 60 000 w mięśniach), swoją budową przypomina amylopektynę skrobi, lecz jego cząsteczki są bardziej rozgałęzione (**ryc. II.5.11.**). Ze względu na występujące rozgałęzienia cząsteczki α -glukozy łączą się zarówno wiązaniami α -1,4-, jak i α -1,6-glikozydowymi. Glikogen otrzymywany z różnych źródeł różni się wielkością cząsteczek i stopniem rozgałęzienia.

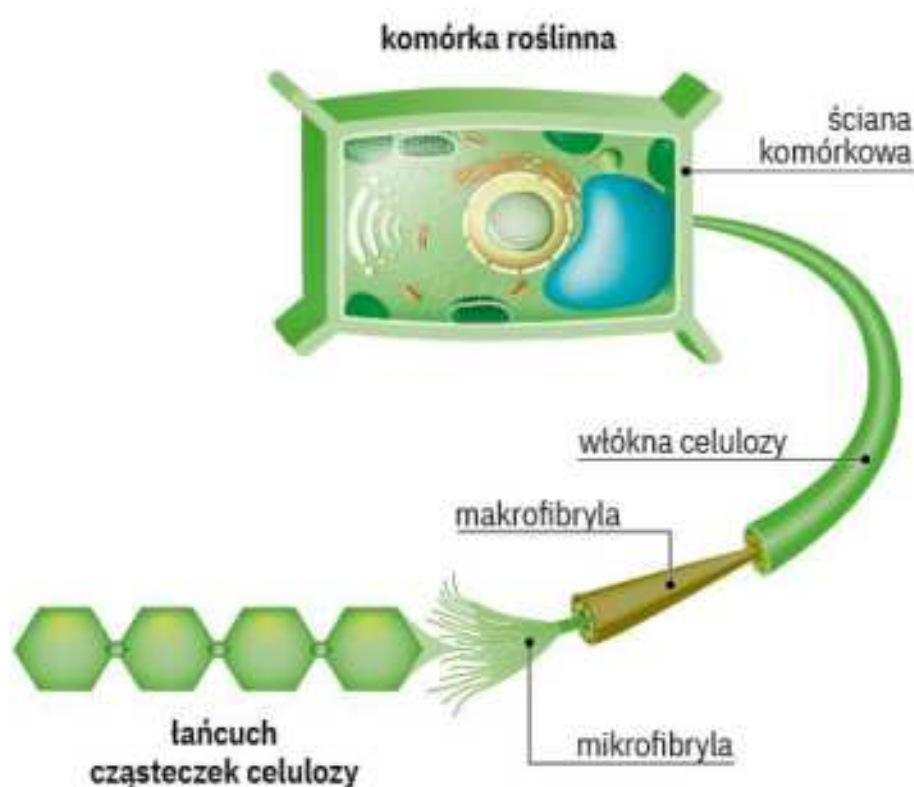


Ryc. II.5.11. Porównanie budowy skrobi (A), glikogenu (B) i celulozy (C).



Ryc. II.5.12. Włoski nasienne bawełny zawierają ponad 90% celulozy i stanowią główny surowiec do produkcji włókna bawełnianego.

Celuloza to najbardziej rozpowszechniony roślinny polisacharyd oraz związek organiczny na kuli ziemskiej (50% węgla biomasy jest zlokalizowane w celulozie). Ponad połowę substancji zawartych w drewnie stanowi celuloza, a w niektórych przypadkach (np. we włoskach nasiennych bawełny, **ryc. II.5.12.**) jej zawartość przekracza 90%. Celulozę budują reszty β -glukozy (ok. 10 000) połączone wiązaniami β -1,4-glikozydowymi tworzącymi długie łańcuchy ułożone jeden przy drugim w bardzo regularny sposób i dodatkowo stabilizowane wiązaniami wodorowymi (**ryc. II.5.13.**).



Ryc. II.5.13. Budowa celulozy w ścianie komórkowej roślin.

blonnik
pokarmowy

Organizm człowieka nie zawiera enzymów mogących trawić wiązanie glikozydowe występujące w celulozie, w związku z tym nie jest ona wykorzystywana jako źródło glukozy. Jednak obecność celulozy w pożywieniu ma kluczowe znaczenie dla poprawnego funkcjonowania układu pokarmowego. Stanowi ona główny składnik **blonnika pokarmowego**, który nadaje treści pokarmowej odpowiednią konsystencję, ułatwia jej przesuwanie się i trawienie. Błonnik reguluje perystaltykę jelit, wpływając także na bardziej sprawne usuwanie trójglicerydów oraz toksyn. W skład błonnika oprócz celulozy wchodzi również inne związki, np. hemicelulozy, ligniny, pektyny, gumy i śluzy. Źródłem błonnika pokarmowego są m.in. warzywa, owoce, produkty zbożowe (**ryc. II.5.14.**).

Zdolność rozkładania celulozy mają niektóre mikroorganizmy. Dzięki ich obecności w żołądku, np. krów czy owiec, celuloza jest trawiona i stanowi źródło glukozy dla trawożernych zwierząt. Odżywiające się drewnem termity (**ryc. II.5.15.**) również mają w swoim układzie pokarmowym bakterie trawiące celulozę.



Ryc. II.5.14. Produkty bogate w błonnik.



Ryc. II.5.15. Termity mogą wykorzystywać celulozę jako źródło pokarmu dzięki obecności w ich układzie pokarmowym bakterii celulolitycznych.

Pochodne polisacharydów

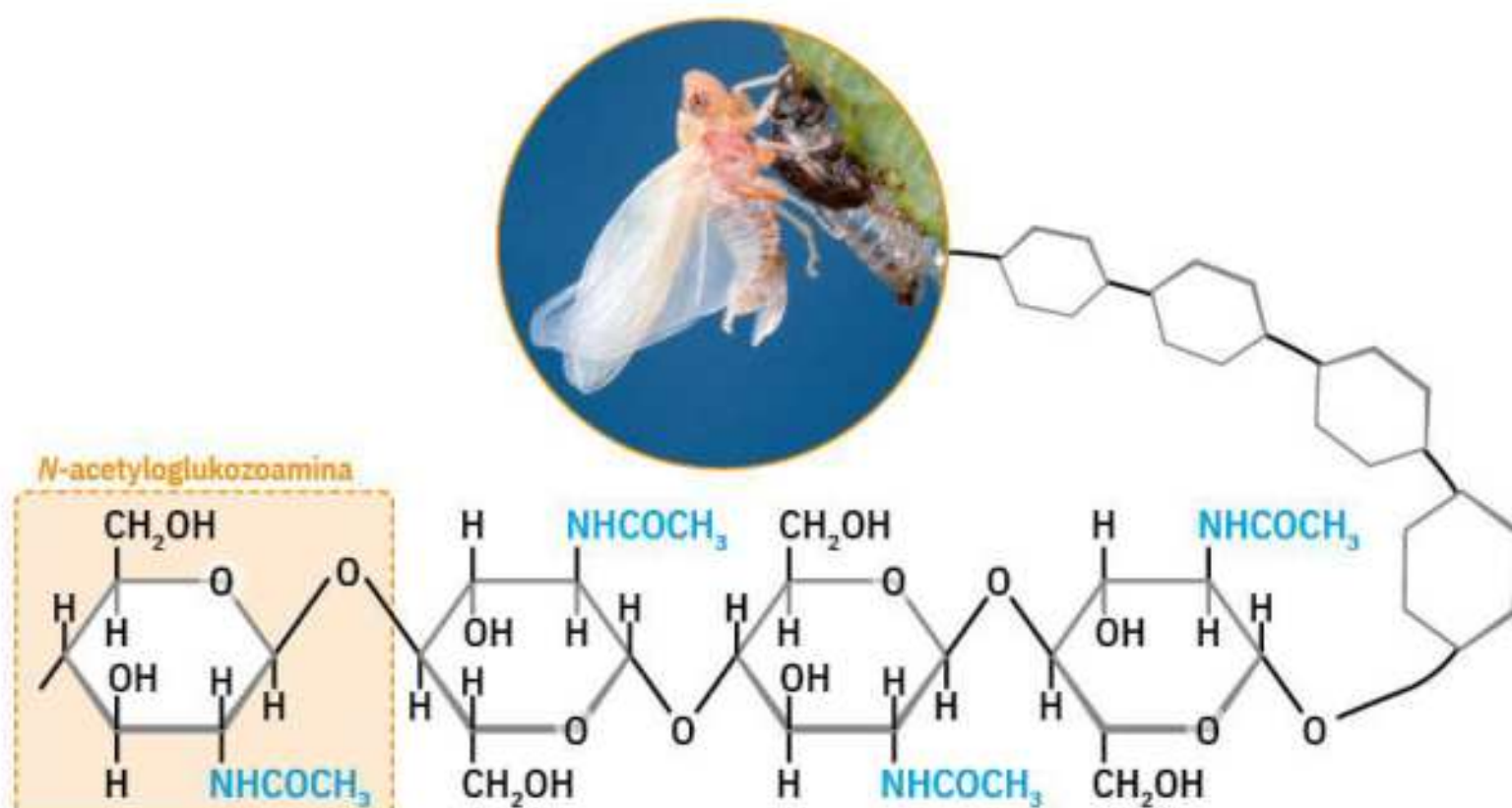
Polisacharydy i ich pochodne należą do bardzo ważnych cząsteczek biologicznych. Na przykład w wyniku zastąpienia jednej z grup $-OH$ w cząsteczce cukru grupą aminową ($-NH_2$) powstaje **aminocukier**. Przykładem aminocukrów są glukozoamina czy galaktozoamina. Pochodne glukozoaminy wchodzi w skład tzw. **mukopolisacharydów**, np. heparyny czy kwasy hialuronowego. Brak w organizmie enzymów rozkładających mukopolisacharydy prowadzi do ciężkich chorób (tzw. mukopolisacharydoz, np. zespołów Hurler czy San Philipppo). Inny aminocukier – galaktozoamina – jest składnikiem chrząstki zwierząt. Reszty *N*-acetyloglukozoaminy to połączone wiązaniem glikozydowym monomery **chityny**. Chityna tworzy bardzo twarde struktury, które budują pancerze owadów i innych stawonogów (**ryc. II.5.17.**). Wchodzi także w skład ściany komórkowej grzybów. **Agar** to z kolei polisacharyd zbudowany głównie z pochodnych galaktozy (tzw. agarozy). **Agar**, który izoluje się z glonów (krasnorostów), jest szeroko wykorzystywany jako żelujący dodatek do żywności oraz w mikrobiologii (jako składnik pożywek do hodowli bakterii) czy w technikach analitycznych biochemii (np. elektroforezie czy chromatografii; **ryc. II.5.16.**).



Ryc. II.5.16. Agar wykorzystuje się powszechnie w mikrobiologii jako podłoże hodowlane dla mikroorganizmów, np. bakterii.

♦ chityna

♦ agar



Ryc. II.5.17. Chityna jest zbudowana z reszt *N*-acetyloglukozoaminy i stanowi ważny składnik szkieletu zewnętrznego stawonogów.

Obserwacja

Obserwacja ziaren skrobi w materiale biologicznym

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: Na szkiełko podstawowe nakrop odrobinę wody, dodaj kroplę soku z ziemniaka oraz kroplę płynu Lugola. Nakryj preparat szkiełkiem nakrywkowym i przeprowadź obserwację ziaren skrobi o różnej wielkości i kształcie.

Opracowanie wyników: Wykonaj schematyczny rysunek ziaren skrobi.

Wnioski: Sformułuj wniosek.

Poszukaj, dowiedz się i wyjaśnij: Czy ziarna skrobi innych gatunków roślin mają taką samą strukturę, jak ziarna skrobi ziemniaka?

Eksperyment

1. Wykrywanie skrobi w produktach spożywczych

Do wykrywania skrobi służy płyn Lugola. Jest to wodny roztwór jodu w jodku potasu. Płyn Lugola ma barwę słomkową. Skrobia w obecności jodu tworzy fioletowoniebieskie połączenie.

Problem badawczy: Czy w produktach spożywczych znajduje się skrobia?

Hipoteza badawcza: W wybranych produktach spożywczych znajduje się skrobia.

Eksperyment



Przeprowadzenie doświadczenia:

Część 1. W trzech probówkach umieść kolejno: 2 ml roztworu skrobi, 2 ml roztworu glukozy i 2 ml wody. Do każdej z nich dodaj po 2–3 krople płynu Lugola. Obserwuj zmianę zabarwienia.

Część 2. Zaplanuj i przeprowadź doświadczenie, którego celem będzie wykrywanie skrobi w dostępnych produktach spożywczych. Do doświadczenia potrzebne będą: płyn Lugola, zakraplacz, papierowa taca oraz: kawałek świeżego chleba, kilka sztuk suchego makaronu, kilkanaście ziaren ryżu, plaster żółtego sera, plaster ogórka, trzy łyżki mleka, kostka cukru.

Wyniki: Po wykonaniu doświadczenia sporządź notatkę w zeszycie, opisz jego przebieg i przedstaw wyniki.

Wnioski: Sformułuj wnioski z doświadczenia.

Wykorzystując różnorodne źródła informacji, udziel odpowiedzi na następujące kwestie:

A. Czy reakcja z jodem może być użyta do identyfikacji glukozy?

B. Wyjaśnij, dlaczego test z płynem Lugola może być wykorzystywany do wykrywania prób fałszowania mąką, np. mleka i śmietany.

2. Badanie właściwości błonnika pokarmowego

Wprowadzenie: Błonnik pokarmowy to mieszanina celulozy i innych związków. Dzięki swoim właściwościom usprawnia pracę jelit, usuwa toksyny i zapobiega zaparciom.

Problem badawczy: Czy błonnik pokarmowy może wiązać wodę?

Hipoteza badawcza: Błonnik pokarmowy wiąże znaczne ilości wody.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: 10 g błonnika w proszku (np. z babki płesznik) umieść w czterech zlewkach (o pojemności 250 ml). Do pierwszej zlewki dodaj 25 ml wody, do drugiej 50 ml, do trzeciej 100 ml, a do czwartej 150 ml.

Opracowanie wyników: Sporządź w zeszycie krótką notatkę, opisz przebieg doświadczenia, przedstaw wyniki, uwzględniając informacje zawarte w poniższych pytaniach:

– Jakie objętości wody wchłania błonnik?

– Czy błonnik rozpuścił się w wodzie?

– Jaką strukturę przyjął błonnik?

Wnioski: Sformułuj wniosek.

Wykorzystując różne źródła informacji, wyjaśnij: Jaką rolę w procesie trawienia ma zdolność błonnika do wiązania wody? Jakie znacznie dla osób stosujących dietę bogatą w błonnik ma picie dużych ilości wody?

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Sporządź w zeszycie grafikę obrazującą podział węglowodanów. Uwzględnij przykłady związków należących do każdej z grup.
2. Wymień najważniejsze funkcje węglowodanów.
3. Przedstawiony obok wzór przedstawia występującą w ziarnach zbóż i owoców ksylozę. Po jego analizie przepisz do zeszytu i uzupełnij zdania.

$$\begin{array}{c}
 \text{H}-\text{C}=\text{O} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OH}
 \end{array}$$

 - a) Ksyloza jest pentozą/heksozą, ponieważ ...
 - b) Ksyloza należy do aldoz/ketoz, ponieważ ...

4. Osoby z nietolerancją fruktozy muszą stosować dietę wykluczającą fruktozę. W poniższej tabeli podano przykłady di- i polisacharydów. Czy osoby zmagające się z tym schorzeniem mogą uwzględniać je w swojej diecie? Dlaczego? Przerysuj do zeszytu poniższą tabelę i uzupełnij ją, wpisując TAK lub NIE w prawej kolumnie.

Węglowodan	Czy może być stosowany w nietolerancji fruktozy? TAK/NIE
sacharoza	...
skrobia	...
laktoza	...
rafinoza	...

5. Podaj podobieństwa i różnice w budowie skrobi i glikogenu.
6. Wyjaśnij rolę błonnika pokarmowego dla prawidłowego działania układu pokarmowego człowieka.
7. Sporządź w zeszycie listę produktów nie zawierających laktozy sprzedawanych w sklepie, w którym najczęściej robisz zakupy. Wyjaśnij, do kogo i dlaczego jest skierowana oferta produktów niezawierających laktozy.
8. W dostępnych źródłach wyszukaj informacji dotyczących agar-agar. Wyjaśnij, jakie właściwości tego polisacharydu wpłynęły na jego szerokie wykorzystanie w mikrobiologii i technikach analitycznych.
9. Przeczytaj poniższy tekst dotyczący zaleceń dietetycznych Polskiego Towarzystwa Diabetologicznego dla chorych na cukrzycę, a następnie wykonaj polecenia.

Prawidłowe żywienie jest istotnym elementem leczenia cukrzycy oraz zapobiegania jej powikłaniom. 50% kaloryczności diety powinno pochodzić z węglowodanów (...). Chory powinien ograniczyć spożycie cukrów prostych do minimum, a jako zamiennika sacharozy nie należy stosować fruktozy. Ilość błonnika pokarmowego w diecie powinna wynosić 25–40 g/dzień ze szczególnym uwzględnieniem rozpuszczalnych frakcji błonnika pokarmowego: pektyn i beta-glukanu. 30% wartości energetycznej diety powinno pochodzić z tłuszczu. Należy ograniczyć nasycone kwasy tłuszczowe oraz ich izomery trans pochodzące z margaryn, produktów cukierniczych oraz posiłków fast food. 20% wartości energetycznej diety powinno pochodzić z białek, przy czym stosunek białka pochodzenia zwierzęcego do białka pochodzenia roślinnego powinien być co najmniej 50/50%.

9.1. Na podstawie danych zawartych w tekście sporządź w zeszycie diagram kołowy obrazujący zapotrzebowanie energetyczne osoby chorej na cukrzycę z podziałem na węglowodany, białka oraz tłuszcze.

9.2. Podaj po jednym przykładzie związków wymienionych w tekście zaliczanych do jednej z trzech grup poznanych węglowodanów.

10. W trakcie dojrzewania owoców (m.in. jabłek, gruszek) następuje rozkład wielocukrów na cukry proste. Jednym ze sposobów oceny dojrzałości owoców, a tym samym terminu ich zbioru jest tzw. test skrobiowy. Test ten polega na spryskaniu przekrojonych w poprzek owoców płynem Lugola. Stopień ciemnienia daje informację o zawartości skrobi w owocu. Poziom rozkładu skrobi określa się na podstawie danych tablicowych, na tej podstawie podejmuje się decyzję o rozpoczęciu ich zbioru.

Na rysunku przedstawiono wynik testu skrobiowego przeprowadzonego przez sadownika pod koniec sierpnia dla uprawianych przez niego odmian jabłek.



Na podstawie przedstawionych wyników testu skrobiowego oceń zawartość skrobi w przedstawianych owocach oraz określ ich dojrzałość.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Węglowodany** pełnią funkcje zapasowe (skrobia, glikogen, inulina), budulcowe (celuloza, chityna) oraz strukturalne (np. ryboza i deoksyryboza wchodzi w skład RNA i DNA). ◀ s. 45
- Węglowodany składają się z jednej (**monosacharydy**), dwóch (**disacharydy**) lub wielu (**polisacharydy**) reszt cukrowych. ◀ s. 45
- **Monosacharydy** to aldehydy lub ketony zawierające dwie lub więcej grup hydroksylowych. ◀ s. 46
- **Do monosacharydów zaliczamy** glukozę, fruktozę, galaktozę, rybozę i deoksyrybozę. Glukoza jest podstawowym paliwem energetycznym komórki. ◀ s. 46
- **Disacharydy** są zbudowane z dwóch reszt cukrowych połączonych wiązaniem glikozydowym. Do najważniejszych disacharydów zaliczamy: sacharozę (połączenie reszt glukozy i fruktozy), maltozę (połączenie dwóch reszt glukozy) i laktozę (połączenie reszty glukozy i galaktozy). ◀ s. 48
- Większość węglowodanów stanowią **polisacharydy**, które są zbudowane z wielu reszt cukrów prostych. ◀ s. 50
- Skrobia, glikogen i celuloza to **polimery glukozy** o odmiennej strukturze i właściwościach. ▶ s. 50
- Pochodnymi polisacharydów są **chityna** (występująca np. w pancerzach stawonogów i ścianach komórkowych grzybów) czy izolowany z krasnorostów **agar** (wykorzystywany jako podłoże hodowlane w mikrobiologii). ◀ s. 53

6. Lipidy – budowa i znaczenie biologiczne

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jaką rolę odgrywają tłuszcze w organizmie;
- poznasz różnice pomiędzy tłuszczami prostymi, złożonymi i związkami tłuszczopodobnymi;
- poznasz różnice pomiędzy nasyconymi i nienasyconymi kwasami tłuszczowymi;
- poznasz, jak są zbudowane fosfolipidy oraz cholesterol.

Podział i funkcje lipidów

lipidy ▶ **Lipidy** (tłuszcze) obejmują związki o różnym charakterze chemicznym, które nie rozpuszczają się w wodzie, ale w rozpuszczalnikach organicznych (np. w chloroformie, acetonie). Do grupy tej zaliczamy m.in. **lipidy proste**, **lipidy złożone** oraz **związki lipidopodobne** (np. steroidy, karotenoidy).

Tłuszcze są obecne w produktach pochodzenia zwierzęcego i roślinnego. Stanowią niezbędny składnik diety człowieka i zwierząt ze względu na funkcje, jakie pełnią:

- stanowią źródło energii (spalenie 1 g tłuszczu dostarcza ponad dwa razy więcej energii niż 1 g glikogenu; **ryc. II.6.1.**);
- są składnikami błon komórkowych (np. fosfolipidy, cholesterol);
- są źródłem i rozpuszczalnikiem wielu niezbędnych substancji (np. witamin A, D, E i K czy niezbędnych nienasyconych kwasów tłuszczowych – NNKT);
- pełnią funkcję hormonów;
- są substratami do syntezy kwasów żółciowych oraz witaminy D;
- jako składnik zapasowej tkanki tłuszczowej pełnią funkcję ochronną (wygładzają skórę, amortyzują działanie bodźców mechanicznych) oraz termoizolacyjną, zabezpieczając organizm przed utratą ciepła (**ryc. II.6.2.**).



Ryc. II.6.1. Siewka złotawa dzięki zmagazynowanym zapasom tłuszczu jest w stanie przelecieć ponad 3500 km bez pożywienia nad otwartym oceanem.



Ryc. II.6.2. Gruba warstwa tłuszczu u niedźwiedzi polarnych pełni też funkcję termoizolacyjną w czasie surowych arktycznych mrozów.

Do lipidów prostych zaliczamy tzw. **tłuszcze właściwe** (triacyloglicerole) oraz **woski**. Triacyloglicerole to estry glicerolu oraz wyższych kwasów tłuszczowych (ryc. II.6.3.). Glicerol jest alkoholem z trzema grupami hydroksylowymi (–OH), a kwas tłuszczowy to długi, nierozgałęziony węglowodór zawierający grupę karboksylową (–COOH). Częsteczką triacyloglicerolu powstaje w wyniku trzech kolejnych reakcji kondensacji pomiędzy grupą hydroksylową a karboksylową, w czasie których wydzielą się cząsteczka wody. Powstałe wiązanie kowalencyjne nazywamy **wiązaniem estrowym** (ryc. II.6.3.). Triacyloglicerole pełnią funkcje zapasowe oraz są składnikami błon komórkowych. W dużych ilościach gromadzą się w nasionach roślin oleistych (tab. II.6.1.). **Kwasy tłuszczowe** wchodzące w skład tłuszczów naturalnych mają parzystą liczbę atomów węgla. Kwasy tłuszczowe dzielimy na nasycone i nienasycone.

◀ **tłuszcze proste**

◀ **kwasy tłuszczowe**



Ryc. II.6.3. Struktura triacyloglicerolu. Do glicerolu są przyłączone za pomocą wiązań estrowych trzy reszty kwasów tłuszczowych.

Atomy węgla w cząsteczce **nasyconych kwasów tłuszczowych** są połączone wiązaniami pojedynczymi i zawierają od 4 do 26 atomów węgla w cząsteczce (oznaczane na tej podstawie jako C4–C26). W tłuszczach najczęściej spotyka się kwasy tłuszczowe o dłuższych łańcuchach – najbardziej rozpowszechnione są: kwas palmitynowy (C16), stearynowy (C18), mirystynowy (C14) oraz laurynowy (C12) (tab. II.6.2.). Kwasy o niższej liczbie atomów węgla (>12) występują w tłuszczu mleka ssaków.

◀ **nasycone kwasy tłuszczowe**

Tab. II.6.1. Zawartość tłuszczu w wybranych roślinach

Roślina	Zawartość tłuszczu [%]	Roślina	Zawartość tłuszczu [%]
słonecznik	24–38	sezam	53
len	29	mak	45
konopie	30	kukurydza	5
soja	20	groch, fasola	2
gorczyca	29–38	pszenica, żyto	2
rącznik	60		

► **Kwasy tłuszczowe nienasycone** mają w cząsteczce jedno lub kilka wiązań podwójnych (nienasyconych; **tab. II.6.2.**). Najbardziej rozpowszechnione są nienasycone osiemnastowęglowe kwasy:

- oleinowy, z jednym wiązaniem podwójnym; występuje zarówno w tłuszczach pochodzenia roślinnego (np. w oliwie z oliwek), jak i zwierzęcych (np. łój wołowy czy barani);
- linolowy o dwóch wiązaniach podwójnych;
- linolenowy, w cząsteczce którego występują trzy wiązania podwójne.

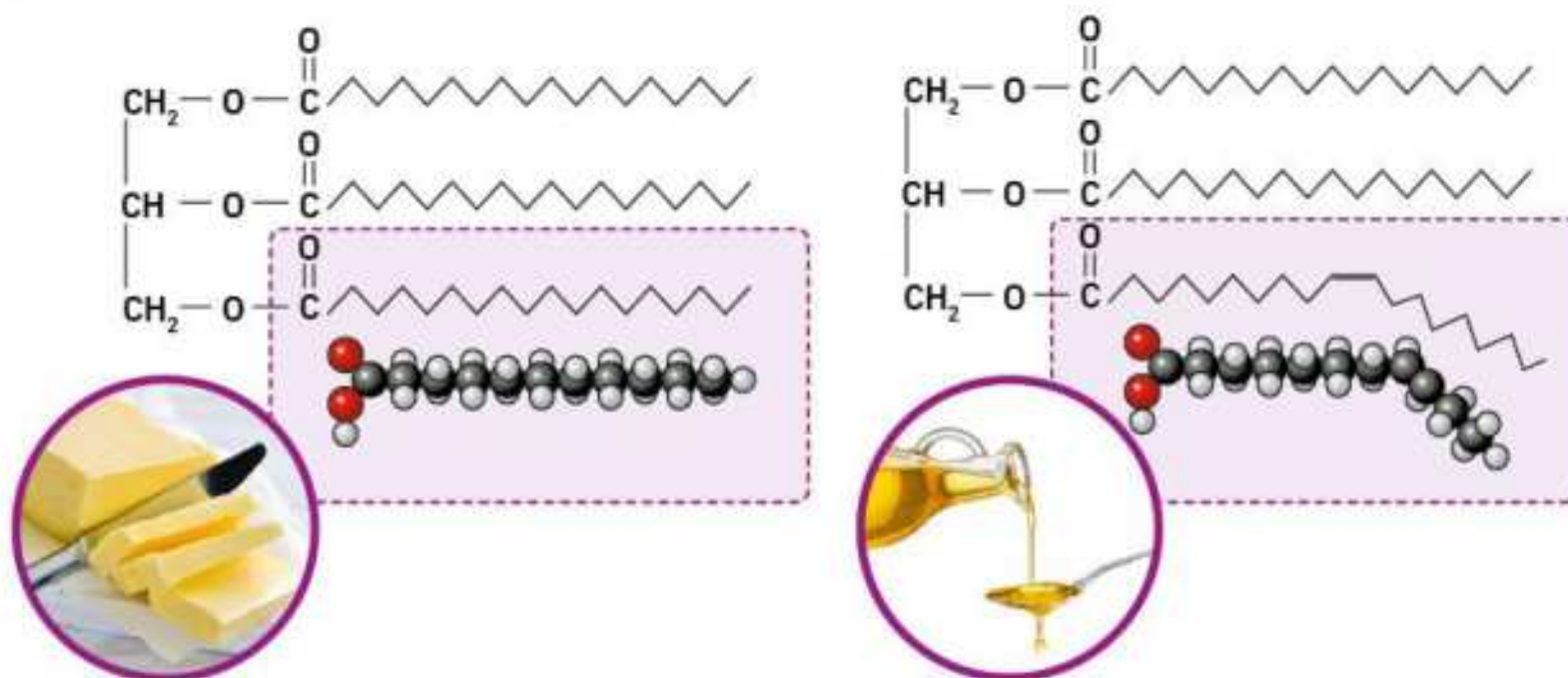
Tab. II.6.2. Wybrane kwasy tłuszczowe nasycone i nienasycone występujące w tłuszczach

Nazwa kwasu	Liczba atomów węgla w cząsteczce	Wzór	Występowanie
KWASY TŁUSZCZOWE NASYCONE			
masłowy	4	$C_4H_8O_2$	masło
laurynowy	12	$C_{12}H_{24}O_2$	olej kokosowy
mirystynowy	14	$C_{14}H_{28}O_2$	masło kokosowe
palmitynowy	16	$C_{16}H_{32}O_2$	tłuszcze roślinne i zwierzęce
stearynowy	18	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	tłuszcze roślinne i zwierzęce
arachidowy	20	$C_{20}H_{40}O_2$	olej z orzeszków ziemnych
KWASY TŁUSZCZOWE NIENASYCONE			
palmitoleinowy	16	$C_{16}H_{30}O_2$	tłuszcze roślinne i zwierzęce
oleinowy	18	$C_{18}H_{34}O_2$	tłuszcze roślinne i zwierzęce
linolowy*	18	$C_{18}H_{32}O_2$	oleje roślinne
linolenowy*	18	$C_{18}H_{30}O_2$	olej lniany
arachidonowy*	20	$C_{20}H_{32}O_2$	tłuszcze zwierzęce

*Kwasy tłuszczowe należące do niezbędnych nienasyconych kwasów tłuszczowych (NNKT), których organizm nie potrafi syntetyzować i które muszą być dostarczane wraz z pożywieniem.

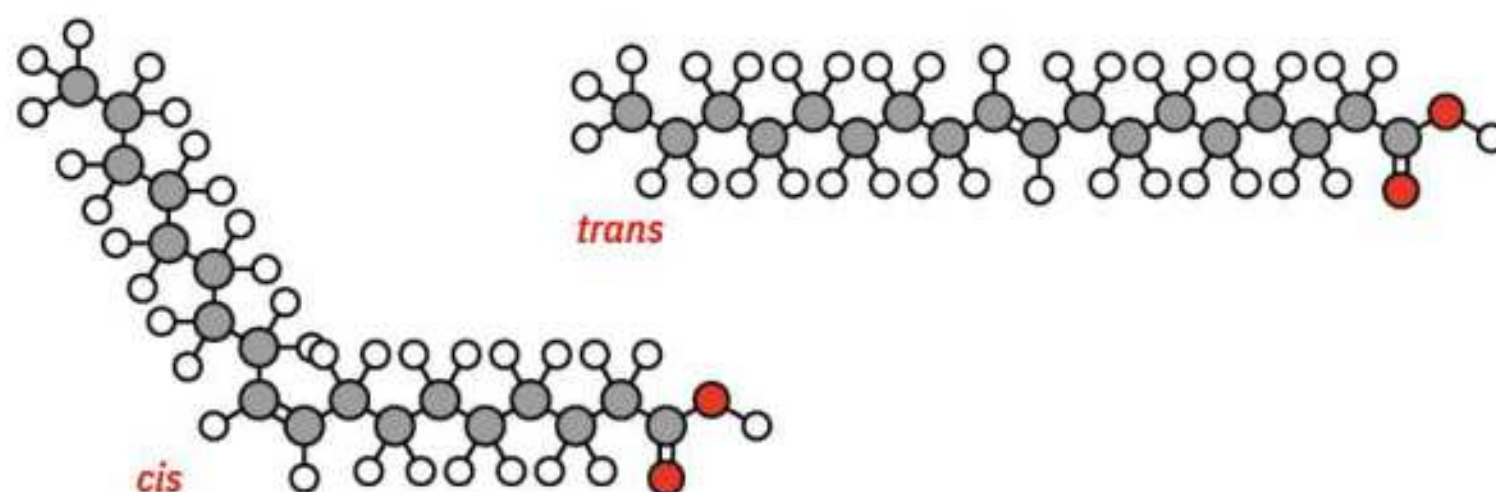
► W cząsteczkach kwasów tłuszczowych węgiel grupy karboksylowej oznaczamy jako α , a ostatni węgiel jako ω (omega). **Kwasy szeregu $\omega-3$ (OMEGA-3)** to nienasycone kwasy tłuszczowe, których ostatnie wiązanie podwójne znajduje się przy trzecim atomie węgla, licząc od końca cząsteczki. Przykładem kwasów OMEGA-3 są kwas linolenowy (zawarty w olejach roślinnych) oraz kwasy eikozapentaenowy (EPA) i dokozaheksaenowy (DHA) zawarte w tłuszczu ryb i w owocach morza. Kwasy OMEGA-3 są niezbędnym składnikiem diety człowieka, gdyż stanowią produkty wyjściowe do syntezy hormonów. Ich spożycie wiąże się także z profilaktyką chorób sercowo-naczyniowych.

Kwasy nienasycone dominują w tłuszczach pochodzenia roślinnego, nadając im postać płynną – przez to są nazywane **olejami**. W odróżnieniu od nich **tłuszcze stałe** pochodzenia zwierzęcego zawierają głównie kwasy tłuszczowe nasycone (**ryc. II.6.4.**).



Ryc. II.6.4. Przykłady nasyconych i nienasyconych kwasów tłuszczowych. Wiązanie podwójne powoduje charakterystyczne wygięcie cząsteczki kwasu nienasyconego.

Podwójne wiązania w kwasach tłuszczowych nadają im specyficzne cechy. W miejscach nienasyceń łatwo mogą się przyłączać np. atomy wodoru. **Uwodornienie**, zwane utwardzaniem tłuszczu, wykorzystuje się do przeróbki tłuszczów roślinnych na stałe, np. przy produkcji margaryn czy masła orzechowego. W wyniku reakcji uwodornienia kwasy nienasycone przechodzą w nasycone. Dodatkowo w czasie tego procesu wytwarzają się izomery *trans* kwasów nienasyconych (ich naturalną formą jest konformacja cis; **ryc. II.6.5.**). Typ izomeru geometrycznego, w jakim występują nienasycone kwasy tłuszczowe, zależy od ustawienia atomów lub grup wokół osi wiązania podwójnego. Jeśli łańcuchy węglowe znajdują się po tej samej stronie wiązania, to wiązanie ma konfigurację *cis*, a jeśli po przeciwnych stronach, to jest to konfiguracja *trans* (**ryc. II.6.5.**).



Ryc. II.6.5. Izomery *cis* i *trans* kwasu oleinowego. Izomery *trans* kwasów tłuszczowych nienasyconych mają kształt liniowy.

Srednia wartość odżywcza po przyrządzeniu	W 100 ml	W 1 porcji 75 ml	%RWS* w 1 porcji
Wartość energetyczna	151 kJ 36 kcal	114 kJ 27 kcal	1%
Tłuszcz	0,9 g	0,7 g	1%
W tym kwasy tłuszczowe nasycone	0,6 g	0,5 g	3%
Węglowodany	5,9 g	4,4 g	2%
W tym cukry	1,3 g	1,0 g	1%
Błonnik	0,2 g	0,2 g	—
Białko	0,9 g	0,7 g	1%
Sól	1,3 g	1,0 g	17%

*Referencyjna wartość spożycia dla przeciętnej osoby dorosłej (8400 kJ/2000 kcal)

Ryc. II.6.6. Przykładowa etykieta produktu spożywczego zawiera informację o zawartości tłuszczu z wyszczególnieniem zawartości tłuszczów nasyconych.

Tłuszcze uwodornione i tłuszcze *trans* wpływają niekorzystnie na nasze zdrowie, gdyż mogą zwiększać ryzyko wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych. Szczególnie bogate w tłuszcze *trans* są ciastka, chipsy i inna żywność przetworzona. Od kilku lat na opakowaniach produktów spożywczych możemy znaleźć informację o zawartości tłuszczów nasyconych (**ryc. II.6.6.**).

Woski

woski ► **Woski** występują zarówno u roślin, jak i u zwierząt, gdzie pełnią funkcję substancji ochronnych. Mają postać cienkiej warstwy na powierzchni liści, łodyg, kwiatów

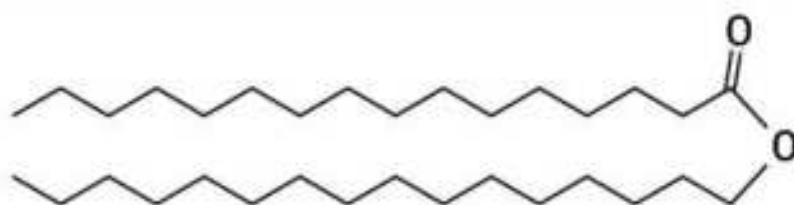


i owoców, przez co chronią te organy przed wysychaniem i nasiąkaniem wodą oraz stanowią barierę dla drobnoustrojów. U zwierząt woski zapobiegają nadmiernemu parowaniu i chronią przed szkodliwym działaniem czynników atmosferycznych. Niekiedy wydzielanie wosku jest bardzo obfite. Przykładem jest tłuszczopót owiec, który stanowi surowiec do otrzymywania lanoliny (**ryc. II.6.7.**).

Ryc. II.6.7. Z tłuszczopotu owczego otrzymuje się lanolinę wykorzystywaną w przemyśle farmaceutycznym i kosmetycznym.

Z chemicznego punktu widzenia woski to estry wyższych kwasów

tłuszczowych oraz alkoholi jednowodorotlenowych (np. cetylowego C16, stearynowego C18, cerylowego C26) (**ryc. II.6.8.**). Woski mogą być płynne lub stałe. Do płynnych należy np. olej olbrotowy z głowy wieloryba. Do wosków stałych należą wszystkie woski roślinne (np. wosk karnauba z liści palm), wosk pszczeli, wosk z wełny owczej oraz wosk z węgla brunatnego (montana).

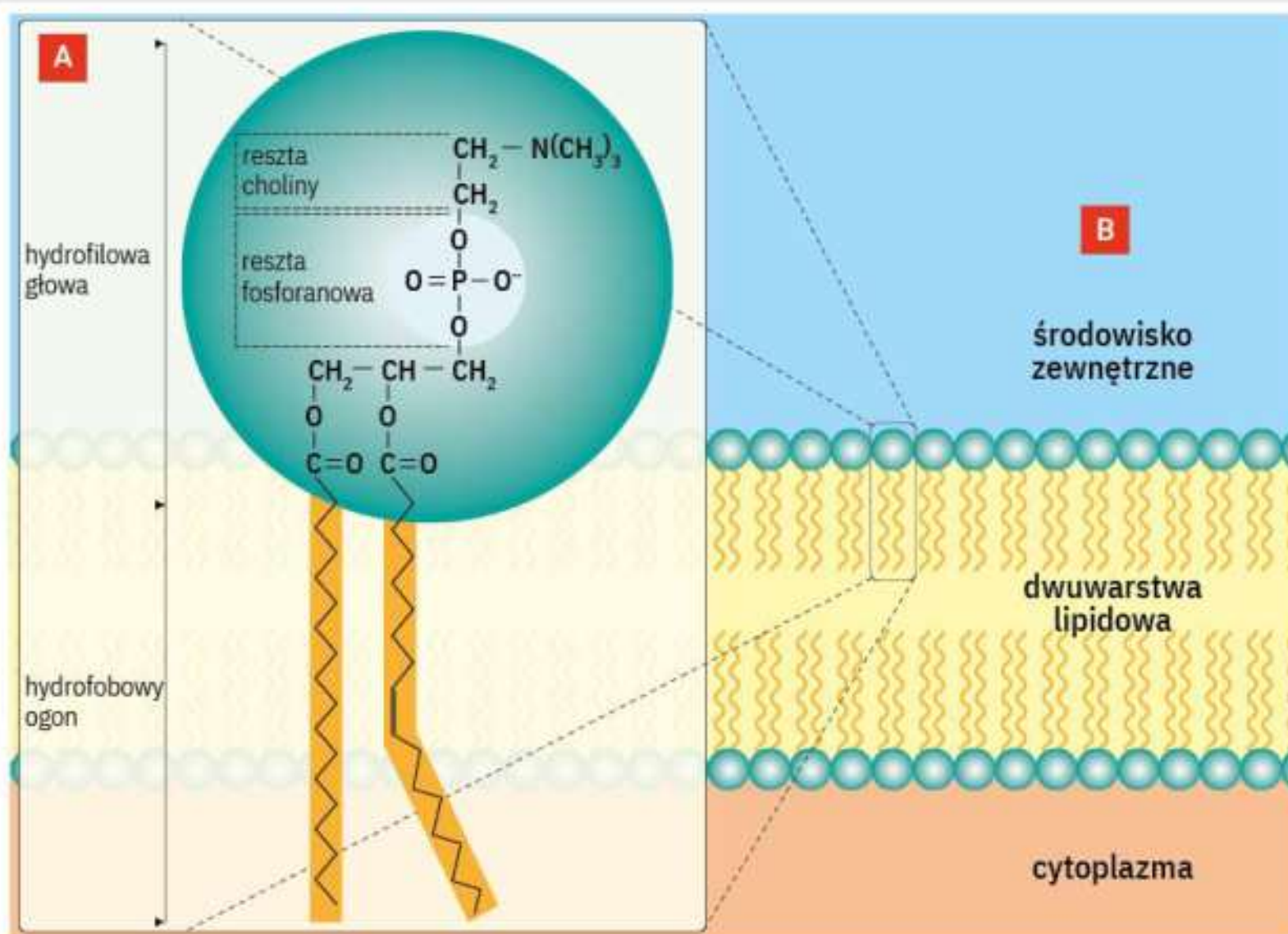


Ryc. II.6.8. Wosk palmitynian cetylowy to ester wyższego kwasu tłuszczowego (kwasu palmitynowego) oraz alkoholu cetylowego.

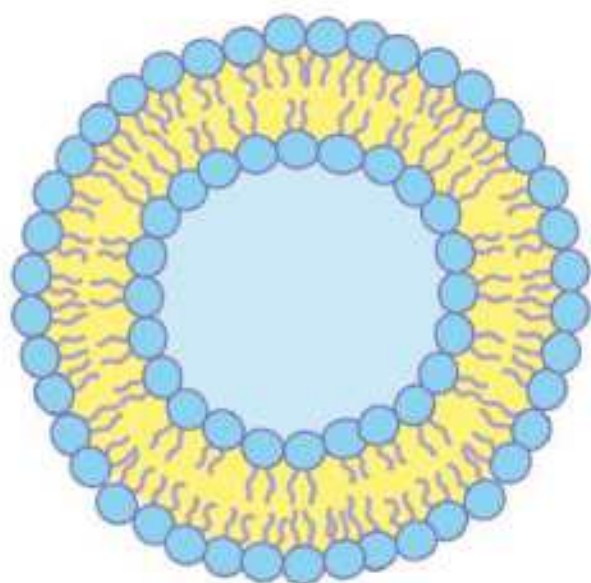
Lipidy złożone budują błony komórkowe

Tłuszcze złożone oprócz reszty glicerolowej i reszt kwasów tłuszczowych zawierają inne składniki. Najważniejszymi tłuszczami złożonymi są **fosfolipidy**. Tłuszcze te to podstawowy składnik błon komórkowych. W skład cząsteczki fosfolipidu wchodzi reszta glicerolowa, do której przyłączone są wiązaniem estrowym dwie reszty kwasów tłuszczowych. Trzecia grupa hydroksylowa glicerolu przyłącza resztę kwasu fosforowego. Do reszty fosforanowej mogą się przyłączać inne grupy, np. alkohole (ryc. II.6.9.). Przykład fosfolipidu to **lecytyna** (ryc. II.6.9.). W jej cząsteczce grupa fosforanowa jest zestryfikowana alkoholem – choliną. Fragment cząsteczki zawierający reszty kwasów tłuszczowych, tzw. ogon, ma charakter hydrofobowy, tzn. nie rozpuszcza się w wodzie, natomiast **głowa lipidu**, zawierająca reszty glicerolu, fosforanową i choliny, jest polarna i rozpuszcza się w wodzie (ryc. II.6.9.).

Cząsteczki posiadające taki „podwójny” charakter nazywamy **amfipatycznymi** (amfifilowymi). Ta unikatowa cecha sprawia, że w kontakcie z wodą fosfolipidy tworzą dwuwarstwę. Podobną strukturę w postaci dwuwarstwowej błony komórkowej fosfolipidy wykształcają na powierzchni komórek. Hydrofilowe głowy ich cząsteczek są skierowane na zewnątrz dwuwarstwy, będąc w kontakcie z wodnymi roztworami wewnątrz i na zewnątrz komórki. Hydrofobowe ogony ustawiają się do wnętrza dwuwarstwy (ryc. II.6.9.). Tak zbudowana błona biologiczna stanowi barierę pomiędzy komórką a środowiskiem zewnętrznym.



Ryc. II.6.9. Struktura fosfolipidu (A) na przykładzie lecytyny oraz model dwuwarstwy lipidowej (B).



Ryc. II.6.10. Liposomy to kuliste pęcherzyki otoczone podwójną warstwą lipidową.

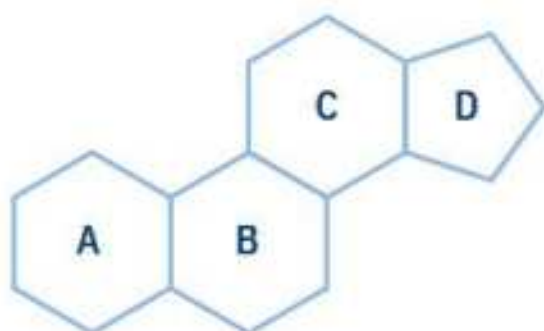
Fosfolipidy (np. lecytyna) są powszechnie używane do wytwarzania liposomów (**ryc. II.6.10.**). Są to małe kuliste pęcherzyki otoczone podwójną warstwą lipidową i wypełnione wewnątrz wodą. **Liposomy** powszechnie wykorzystuje się w badaniach naukowych jako model błony biologicznej, ponieważ ich otoczka jest zbudowana w analogiczny sposób. W przemyśle farmaceutycznym i kosmetycznym stosuje się je jako nośniki wybranych substancji (np. leków).

Naturalnymi liposomami są lipoproteiny osocza, otoczone łańcuchem białka, które transportują trójglicerydy i cholesterol.

Steroidy – związki lipidopodobne

Wspólnym elementem strukturalnym steroidów jest układ składający się z czterech połączonych pierścieni (**ryc. II.6.11.**).

A

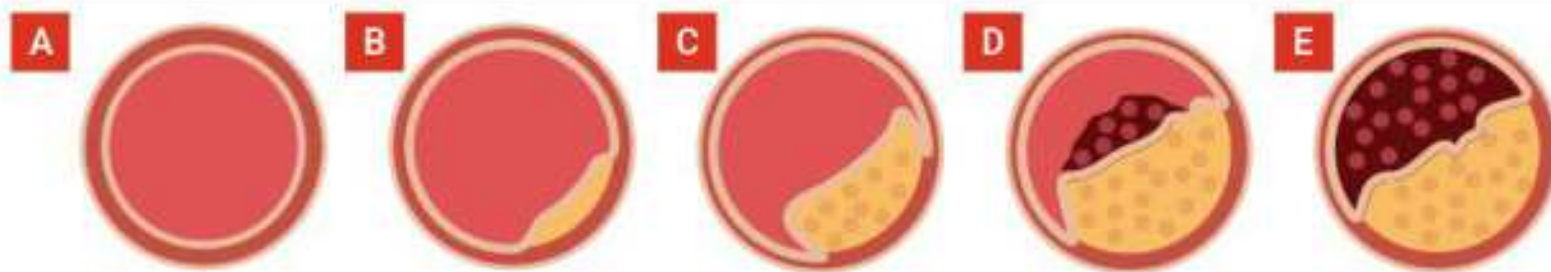


B



Ryc. II.6.11. Pierścień steroidowy (A) i cholesterol jako przykład steroidu (B).

Steroidy różnią się rodzajem dołączanych do tego szkieletu grup. Przykładem steroidu jest **cholesterol** – ważny prekursor kwasów żółciowych i hormonów, a także składnik błon wpływający na ich właściwości mechaniczne (**ryc. II.6.12.**). Wraz z fosfolipidami wchodzi w skład zwierzęcych błon biologicznych, nadając im odpowiednią sztywność. Cholesterol podlega syntezie w wątrobie, a w większych ilościach występuje w tkance nerwowej. We krwi jest transportowany jako składnik lipoprotein. Jest obecny w tłuszczach zwierzęcych, natomiast brak go w tłuszczach roślinnych. Mimo że cholesterol stanowi jedną z podstawowych cząsteczek w komórkach zwierzęcych, to jego wysokie stężenie we krwi zwiększa ryzyko powstania miażdżycy. Nadmiar cholesterolu w postaci związanej z lipoproteinami o małej gęstości (LDL) przenika do ścian tętnic i tam odkłada się w postaci blaszek miażdżycowych, zmniejszając światło naczyń, a tym samym utrudniając przepływ krwi (**ryc. II.6.12.**).

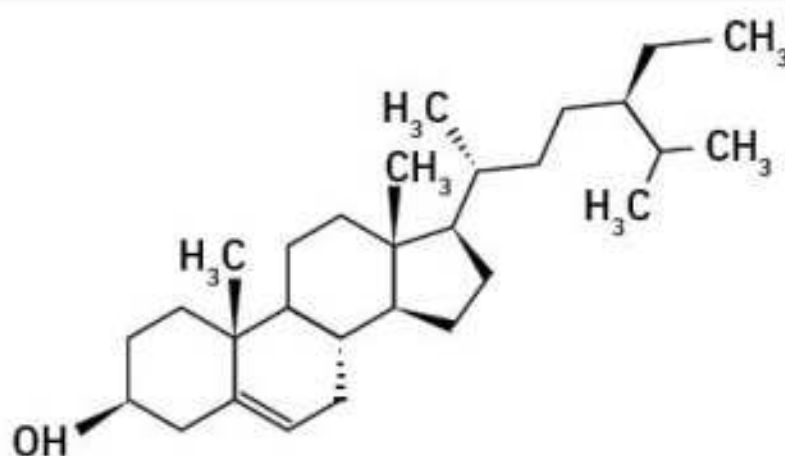


Ryc. II.6.12. Blaszką miażdżycową jest zbudowana głównie z cholesterolu i wyrasta ze ściany tętnicy, doprowadzając do zmniejszenia przepływu krwi (niedokrwienia), skutkującego niedotlenieniem narządów. (A) naczynie prawidłowe, (B)–(C) blaszka miażdżycowa wyrastająca ze ściany tętnicy, (D)–(E) pęknięta blaszka miażdżycowa.

Cholesterol frakcji LDL może tworzyć złogi w postaci kamieni żółciowych. Z tego względu nazywa się go „złym cholesterol”. Pozostała część cholesterolu jest transportowana w postaci lipoprotein o dużej gęstości (HDL). To frakcja tzw. dobrego cholesterolu. Lipoproteiny HDL wiążą zgromadzony w ścianach tętnic cholesterol i transportują go z krwią do wątroby, gdzie służy jako substrat do syntezy kwasów żółciowych. Większość cholesterolu zgromadzonego w organizmie pochodzi z pokarmów. Dostarczony tą drogą zostaje wchłonięty przez organizm tylko w 40%, reszta jest wydalana z kałem. Kiedy w naszej diecie znajduje się dużo cholesterolu, organizm zmniejsza jego syntezę, lecz jeśli spożywamy przez długi okres zbyt dużą ilość wysokocholesterolowych produktów (m.in. jajka, mięso), ten mechanizm zawodzi.

Przykładem steroidu jest także **ergosterol**, występujący m.in. w drożdżach. Jest on ważnym prekursorem witaminy D. Naświetlanie promieniami UV powoduje otwarcie pierścienia B, w wyniku czego związek nabiera właściwości przeciwkrzywiczych.

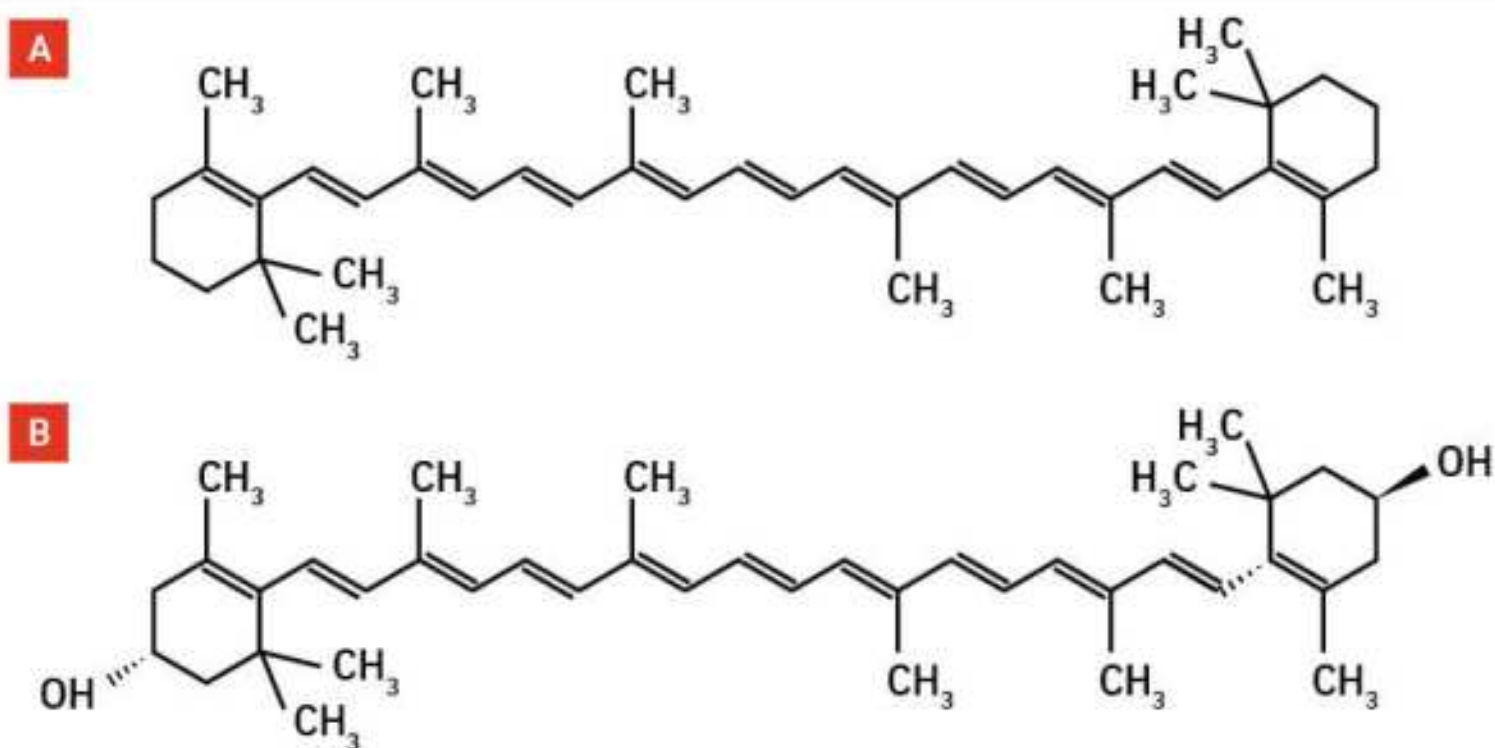
Steroidami roślinnymi budową przypominającymi cholesterol są **fitosterole** (ryc. II.6.13.). Spożywane w odpowiednich ilościach powodują istotne obniżenie poziomu cholesterolu, hamują bowiem jego wchłanianie w przewodzie pokarmowym i powodują zwiększone wydalanie z organizmu. Ponieważ średnie dzienne spożycie fitosteroli wynosi 100–350 mg i jest niewystarczające, producenci żywności funkcjonalnej oferują produkty wzbogacane w fitosterole (np. margaryny, jogurty, czekolada).



Ryc. II.6.13. Sitosterol to przykład fitosterolu.

Karotenoidy

karotenoidy ▶ **Karotenoidy** to nierozpuszczalne w wodzie, oleiste roślinne barwniki występujące głównie w chloroplastach. Ich barwy – żółta, czerwona, pomarańczowa – uwidaczniają się jesienią, kiedy maskujący ich obecność w liściach chlorofil ulega rozkładowi. Karotenoidy są zbudowane z podjednostek izoprenu (układu pięciowęglowego) oraz z dwóch pierścieni (**ryc. II.6.14.**). Dzielimy je na karoteny (np. β -karoten, likopen) oraz ksantofile (np. luteina, zeaksantyna). U roślin karotenoidy odgrywają pomocniczą rolę w procesie fotosyntezy. W organizmie większości zwierząt niektóre karotenoidy są źródłem witaminy A, która następnie może ulec przemianie w barwnik wzrokowy – retinal. Karotenoidy są także przeciwutleniaczami (antyoksydantami) i zabezpieczają komórki przed negatywnym wpływem reaktywnych form tlenu i wolnych rodników.



Ryc. II.6.14. Karotenoidy dzielimy na: karoteny (A) i ksantofile (B). Karoteny (β -karoten) są zbudowane wyłącznie z węgla i wodoru, a ksantofile (luteina) – z węgla, wodoru i tlenu.

Jak bada się lipidy?

metody chromatograficzne ▶

Do oczyszczania, rozdzielania oraz analizy jakościowej i ilościowej lipidów stosuje się w głównej mierze **metody chromatograficzne**. Chromatografia służy do rozdzielania i badania składu mieszanin związków. We wszystkich rodzajach chromatografii cząsteczki rozdzielają się pomiędzy fazę stacjonarną a ruchomą. Rozdział zależy od powinowactwa rozdzielanych substancji do jednej z tych faz. Odpowiednio dobrane parametry oraz detektory pozwalają na rozdział i identyfikację związków lipidowych w bardzo małych stężeniach (nawet nanomolowych). Wyróżniamy różne rodzaje chromatografii: bibułową, cienkowarstwową, jonowymienną, cieczową czy gazową. Do analizy związków lipidopodobnych (np. witamin czy karotenoidów) wykorzystuje się głównie wysokosprawną chromatografię cieczową (HPLC), a do ana-

lize kwasów tłuszczowych – chromatografię gazową (GC). Przed użyciem tych technik lipidy ekstrahuje się z tkanek za pomocą mieszanin rozpuszczalników organicznych (często jest to chloroform i metanol).



Ryc. II.6.15. Chromatograf cieczowy służy do rozdzielania i identyfikacji lipidów.

Eksperyment

1. Wykrywanie tłuszczów w siemieniu lnianym

Wprowadzenie: Do wykrywania tłuszczów służy odczynnik Sudan (III lub IV). Jest to organiczny barwnik o czerwonym zabarwieniu. Barwi on tłuszcze na kolor ceglastopomarańczowy.

Problem badawczy: Czy siemię lniane zawiera tłuszcze?

Hipoteza: Siemię lniane zawiera tłuszcze.

Przeprowadzenie doświadczenia: Zaplanuj i przeprowadź doświadczenie, którego celem będzie wykrywanie tłuszczów w siemieniu lnianym (nasionach lnu). Do doświadczenia potrzebne będą: siemię lniane, woda, moździerz z tłuczkiem, etanolowy roztwór Sudanu III, zakraplacz, woda.

Wyniki: Po wykonaniu doświadczenia sporządź notatkę w zeszycie, opisz jego przebieg i przedstaw wyniki.

Wnioski: Sformułuj wnioski z doświadczenia.

Wykorzystując różnorodne źródła informacji, udziel odpowiedzi na następujące kwestie:

- Co to jest liczba jodowa i jakie jest jej praktyczne zastosowanie?
- W jaki sposób wykonuje się oznaczanie lipidogramu we krwi? Oznaczenia jakich związków są wykonywane?

2. Badanie właściwości lecytyny

Wprowadzenie: Lecytyna to związek o charakterze amfipatycznym, który wykorzystuje się m.in. w przemyśle spożywczym jako emulgator, czyli substancję ułatwiającą powstawanie emulsji i ich stabilizację (m.in. majonezu, sosów).

Problem badawczy: Czy lecytyna ułatwia mieszanie się oleju z wodą?

Hipoteza badawcza: Lecytyna ułatwia mieszanie się oleju z wodą.

Przeprowadzenie doświadczenia: Do dwóch kolb o pojemności 250 ml nalej po 50 ml oleju oraz 50 ml wody. Do kolby będącej próbą badawczą dodaj 5 ml lecytyny w płynie. Obie kolby zatkać korkiem, a ich zawartość intensywnie wymieszaj.



Eksperyment

Wyniki: Po wykonaniu doświadczenia sporządź notatkę w zeszycie, opisz jego przebieg i przedstaw wyniki.

Wnioski: Sformułuj wnioski z doświadczenia.

Wykorzystując różnorodne źródła informacji, udziel odpowiedzi na następujące kwestie:

- Podaj przykłady praktycznego źródła wykorzystania lecytyny (inne niż we wstępie do doświadczenia) oraz źródła jej przemysłowego pozyskiwania.
- Jakie struktury formuje lecytyna w środowisku wodnym? Jaka jest ich biologiczna rola?

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wymień i omów na konkretnych przykładach funkcje tłuszczów.
2. Przerysuj do zeszytu poniższą tabelę i ją uzupełnij.

Rodzaj tłuszczu	Budowa	Funkcje	Przykład
...	estry alkoholi oraz wyższych kwasów tłuszczowych	...	...
...	...	...	lecytyna
związki lipidopodobne	...	...	...

3. Poniżej przedstawiono wartości profilu lipidowego oznaczanego z krwi pewnej osoby.
 - a) Zinterpretuj przedstawione wyniki.
 - b) Podaj trzy zalecenia, jakimi powinien się kierować ten pacjent.
 - c) Przygotuj przykładowy jednodniowy jadłospis dla tego pacjenta.

Lipidogram	Poziom	Jednostka	Zakres prawidłowy
Cholesterol całkowity	7,18	mmol/l	300–5,00
Cholesterol HDL > 1,2 mmol/l zgodnie z zaleceniem PTK i PTDL	1,59	mmol/l	–
Cholesterol LDL < 1,8 mmol/l u osób z bardzo dużym ryzykiem, po zawale serca i udarze mózgu < 2,5 mmol/l u osób z dużym ryzykiem < 3,0 mmol/l u osób zdrowych	4,84	mmol/l	–
Trójglicerydy < 1,7 mmol/l zgodnie z zaleceniem PTK i PTDL	1,64	mmol/l	0,4–1,54

4. Wyjaśnij, jaka jest różnica pomiędzy kwasami tłuszczowymi nasyconymi i nienasyconymi, a następnie wśród podanych poniżej nazw kwasów tłuszczowych wskaż kwasy nienasycone.
palmitynowy, oleinowy, stearynowy, linolenowy, mirystynowy, masłowy, arachidonowy

5. Wytlumacz, jakie właściwości fosfolipidów decydują o dwuwarstwowej formie błony komórkowej.
6. Na rysunku przedstawiono schemat blokowy lecytyny. Przerysuj go do zeszytu i uzupełnij, wpisując w odpowiednie miejsca podane nazwy: *reszta glicerolowa*, *reszta kwasu palmitynowego*, *reszta kwasu stearynowego*, *reszta kwasu fosforowego*, *cholina*.



7. Tłuszcze są zróżnicowaną grupą związków zarówno pod względem chemicznym, jak i funkcjonalnym. Do tej grupy zaliczamy tłuszcze proste, złożone oraz związki tłuszczopodobne.

Przyporządkuj związkom (A–E) grupę tłuszczów, do których należą (1–5), oraz funkcje, które pełnią (I–V). Odpowiedzi zapisz w zeszycie.

A. β -karoten	1. fosfolipidy	I. składnik tłuszczów złożonych
B. cholesterol	2. steroidy	II. usztywnia błonę komórkową
C. kwas linolenowy	3. woski	III. podstawowy składnik błon komórkowych
D. lecytyna	4. karotenoidy	IV. chronią przed nadmiernym parowaniem
E. lanolina	5. kwasy tłuszczowe	V. biorą udział w fotosyntezie

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Lipidy** stanowią magazyn energii (triacyloglicerole) oraz są głównym składnikiem błon biologicznych (fosfolipidy). ◀ s. 58
- **Tłuszcze proste** (triacyloglicerole i woski) to estry alkoholi i wyższych kwasów tłuszczowych. ◀ s. 59
- **Kwasy tłuszczowe** występujące w tłuszczach prostych i złożonych mogą być nasycone (np. kwas palmitynowy) lub nienasycone (np. kwas oleinowy).
- Przykładem **tłuszczów złożonych** są fosfolipidy zbudowane z reszty glicerolowej, dwóch reszt kwasów tłuszczowych oraz reszty kwasu fosforowego, która jest zestryfikowana alkoholem (np. choliną w lecytynie). ◀ s. 63
- **Fosfolipidy** są cząsteczkami amfipatycznymi, co oznacza, że jedna część ich cząsteczki ma powinowactwo z wodą, a druga jest hydrofobowa. Ta cecha warunkuje samorzutne tworzenie się dwuwarstw lipidowych, z których są utworzone błony komórkowe. ◀ s. 63
- **Cholesterol** jest steroidem wchodzącym w skład zwierzęcych błon komórkowych oraz prekursorem ważnych cząsteczek biologicznych (np. hormonów). ◀ s. 64
- Roślinnymi steroidami są **fitosterole**. ◀ s. 65
- Do badania lipidów wykorzystuje się **metody chromatograficzne**. ◀ s. 66

7. Białka – najważniejszy składnik organizmu

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak są zbudowane białka;
- zrozumiesz, jakie znaczenie mają białka dla organizmu;
- poznasz zróżnicowanie białek oraz ich rzędowność;
- przeanalizujesz metody badania białek.

Podział i funkcje białek

białka ▶ **Białka**, obok kwasów nukleinowych, stanowią najważniejszą grupę makromolekuł komórkowych. Uzależnione od nich jest funkcjonowanie każdej żywej komórki – biorą one udział w prawie wszystkich czynnościach życiowych organizmu. Wśród tej grupy najważniejsze są **enzymy** (dział IV, rozdział 2).

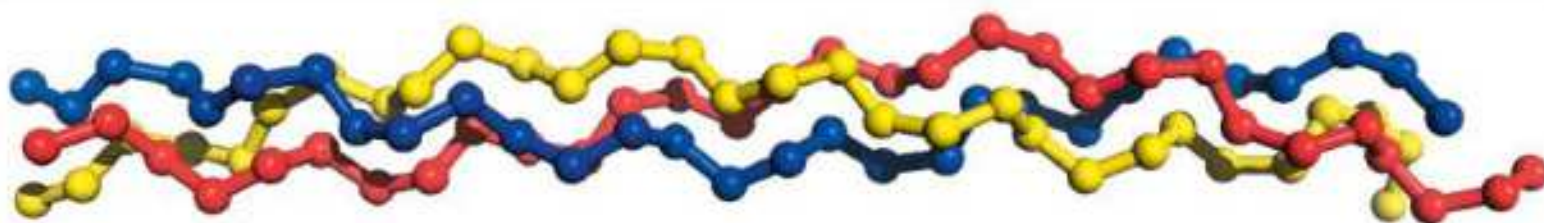
podział białek ▶ W organizmie człowieka występują dziesiątki tysięcy białek, a każde z nich ma określoną strukturę i funkcję. Uwzględniając budowę tych związków, możemy je **podzielić na proste** (zbudowane tylko z aminokwasów) lub **złożone** (będące połączeniem aminokwasów i innych związków). Białka globularne i fibrylarne wyróżniamy na podstawie kształtu cząsteczki. Najbardziej znanym kryterium podziału białek są ich funkcje (**ryc. II.7.1.**).



Ryc. II.7.1. Podział białek.

Białka fibrylarne mają strukturę włókienkową, ich cząsteczki są długie, ułożone równolegle (**ryc. II.7.2.**). Charakteryzują się wytrzymałością na bodźce mechaniczne, a przez to nadając tkankom (tkanka łączna) i organom (skóra) elastyczność i sprężystość. Przykładem **białek fibrylarnych** są **keratyna** i **kolagen**. Keratyna nie rozpuszcza się w wodzie przez co tworzy barierę uniemożliwiającą przenikanie wody przez powierzchnię ciała. **Kolagen** wchodzi w skład włókien kolagenowych tkanki łącznej, nadając jej sprężystość i wysoką odporność na rozerwanie podczas rozciągania tkanki. Znanych jest kilkanaście typów kolagenów, które występują w różnych miejscach, np. kolagen typu I występuje w więzadłach, ścięgnach i skórze, a kolagen typu II – w chrząstce (**ryc. II.7.2.**).

◀ kolagen

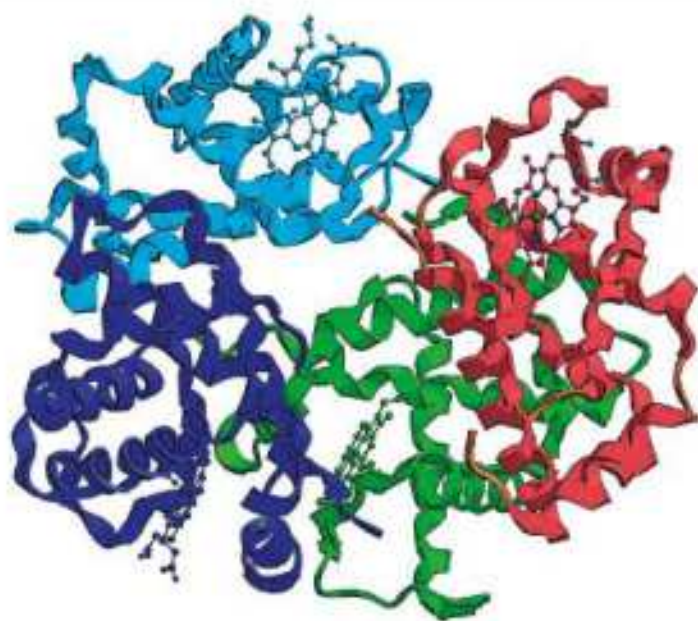


Ryc. II.7.2. Model przestrzenny kolagenu.

Białka globularne mają kulistą, kłębkową strukturę. Są rozpuszczalne w wodzie. Do **białek globularnych** należy mioglobina, która występuje w mięśniach i magazynuje tlen. W czasie długotrwałego wysiłku mioglobina zapewnia szybkie uwalnianie tlenu z krwi do mięśni. Białkami globularnymi są także **histony**, które wraz z DNA tworzą chromatynę zawartą w jądrze komórkowym.

Tab. II.7.1. Funkcjonalny podział białek

Rodzaj białka	Opis	Przykłady
Białka enzymatyczne	specyficzne przyspieszanie reakcji chemicznych (w przeważającej części są to białka globularne)	enzymy trawienne (np. pepsyna), <u>oksydoreduktazy</u> (np. katalaza)
Białka strukturalne	składniki budulcowe i strukturalne komórek i tkanek (na ogół są to białka fibrylarne); składniki struktur komórkowych (np. chromatyny)	kolagen, elastyna, keratyna, histony
Białka zapasowe	forma zapasowa aminokwasów	kazeina, owoalbumina
Białka transportujące	transport innych substancji	hemoglobina, mioglobina lipoproteiny osocza
Białka hormonalne	regulacja aktywności na poziomie całego organizmu	insulina
Białka receptorowe	reakcje na bodźce chemiczne	receptor insuliny
Białka kurczliwe	udział w reakcjach ruchowych	<u>aktyna</u> , miozyna
Białka obronne	ochrona przed patogenami	<u>przeciwciała</u>



Ryc. II.7.3. Model przestrzenny hemoglobiny.
Zielonym kolorem zaznaczono cząsteczki hemu.

Każdy przejaw życia na Ziemi ma formę białkową. Białka, ze względu na spektrum pełnionych funkcji, biorą udział we wszystkich procesach życiowych organizmu (**tab. II.7.1.**). Ten podział funkcjonalny białek doskonale można zilustrować na przykładzie krwi. Krew składa się z osocza oraz elementów morfotycznych. W skład osocza wchodzi woda, białka oraz inne rozpuszczone substancje. Do najważniejszych białek osocza zaliczamy: fibrynogen, globuliny i albuminy. **Fibrynogen** bierze udział w procesie krzepnięcia krwi. Płyn, jaki zostaje po jego usunięciu z osocza, nosi nazwę **surowicy**. Frakcja **globulin** osocza zawiera białka transportujące (np. hormony,

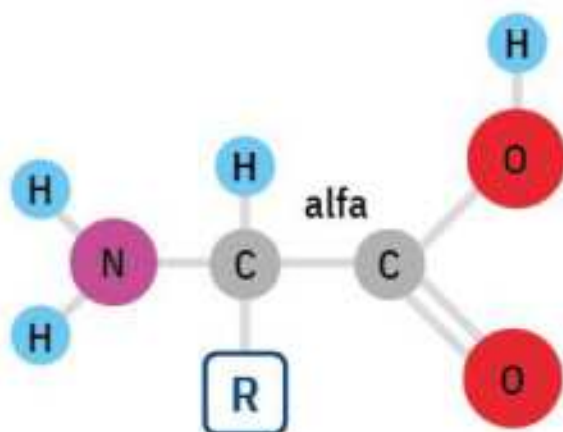
tłuszcze, cholesterol), protrombinę (bierze udział w krzepnięciu krwi) oraz przeciwciała (zapewniają odporność na niektóre choroby zakaźne, takie jak odra czy zakaźna żółtaczka). **Albuminy** osocza regulują ciśnienie osmotyczne krwi, przez co utrzymują właściwą jej objętość. Pełnią także funkcję buforującą pH krwi. Dodatkowo w erytrocytach (czerwonych krwinkach) występuje **hemoglobina** – białko transportujące tlen i nadające krwi czerwoną barwę. Hemoglobina jest białkiem złożonym, ponieważ oprócz części białkowej zawiera czerwony barwnik żelazoporfirynowy – **hem** (**ryc. II.7.3.**).

budowa
białek

► Budowa białek

aminokwasy
białkowe

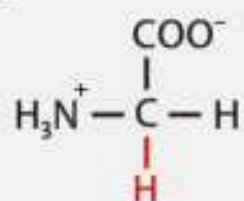
Białka to makrocząsteczki, które składają się z tego samego zestawu tylko dwudziestu **aminokwasów** (choć w przyrodzie znanych jest ich ponad kilkaset). Wszystkie aminokwasy mają ten sam schemat budowy (**ryc. II.7.4.**): wokół centralnie umieszczonego atomu węgla (tzw. **węgla α**) są rozmieszczone cztery różne podstawniki: grupa aminowa ($-\text{NH}_2$), karboksylowa ($-\text{COOH}$), atom wodoru oraz zmienna grupa $-\text{R}$, stanowiąca tzw. **łańcuch boczny**. Aminokwasy różnią się między sobą grupą $-\text{R}$ (**tab. II.7.2.**) i na tej podstawie wyróżniamy aminokwasy hydrofobowe, polarne z obojętnymi grupami R , polarne naładowane dodatnio i polarne naładowane ujemnie.



Ryc. II.7.4. Schemat budowy aminokwasu.

Glicyna

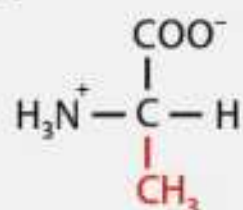
Gly



G

Alanina

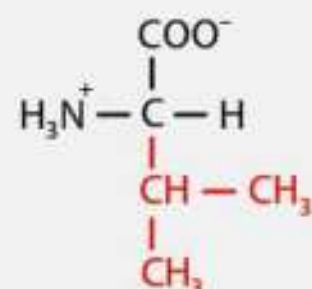
Ala



A

Walina

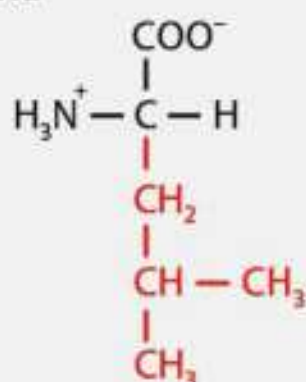
Val



V

Leucyna

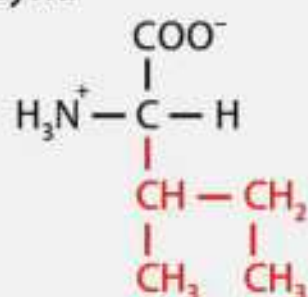
Leu



L

Izoleucyna

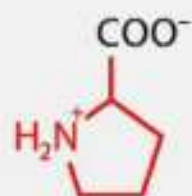
Ile



I

Prolina

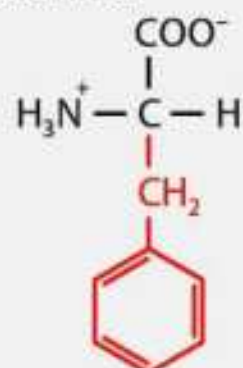
Pro



P

Fenylalanina

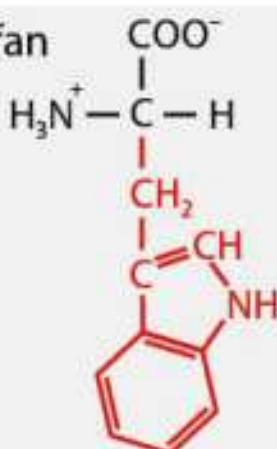
Phe



F

Tryptofan

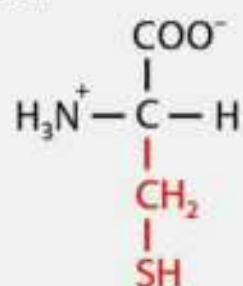
Trp



W

Cysteina

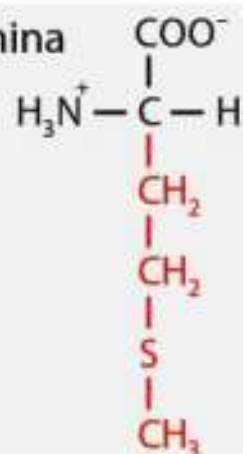
Cys



C

Metionina

Met



M

Aminokwas

Skrót

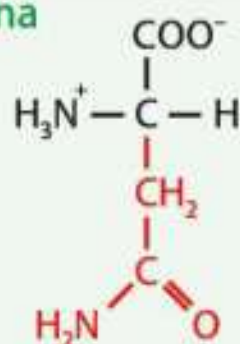
Wzór

Skrót

Ryc. II.7.5. Aminokwasy niepolarne.

Asparagina

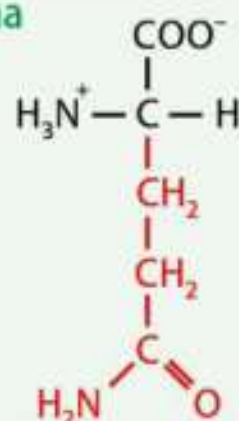
Asn



N

Glutamina

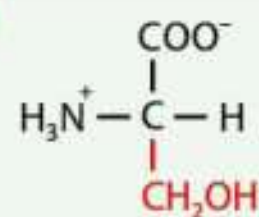
Gln



Q

Seryna

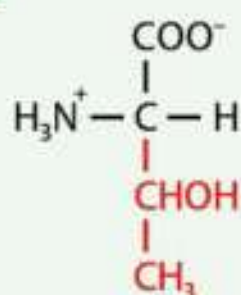
Ser



S

Treonina

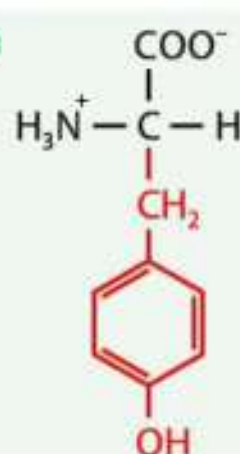
Thr



T

Tyrozyna

Tyr



Y

Aminokwasy polarne

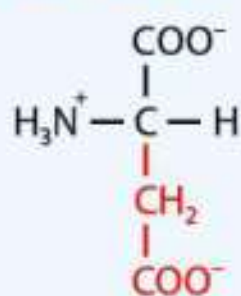
nieobdarzone ładunkiem

z ładunkiem ujemnym

z ładunkiem dodatnim

Kwas asparaginowy

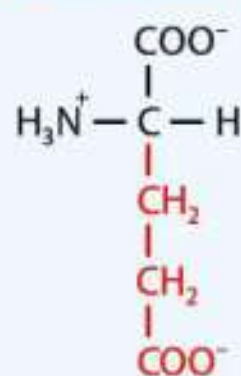
Asp



D

Kwas glutaminowy

Glu



E

Aminokwas

Skrót

Wzór

Skrót

Arginina

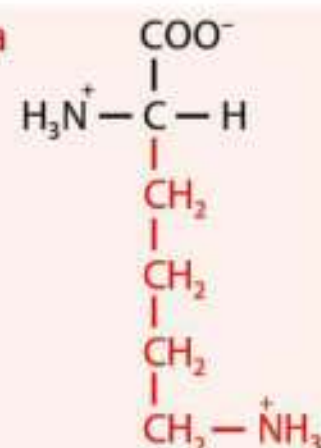
Arg



R

Lizyna

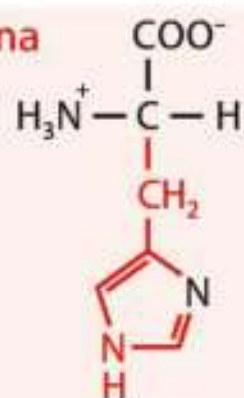
Lys



K

Histydyna

His



H

Ryc. II.7.6. Aminokwasy polarne.

Fizykochemiczny charakter każdego z aminokwasów zależy od rodzaju łańcucha bocznego (**ryc. II.7.5., ryc. II.7.6**). Część aminokwasów ze względu na obecność w nim reszt węglowodorowych jest **hydrofobowa** (np. alanina, walina; **ryc. II.7.5.**). W przeciwieństwie do nich łańcuchy boczne o charakterze polarnym nadają części **aminokwasów właściwości hydrofilowe** (np. seryna). Jeżeli łańcuchy boczne aminokwasów mają zjonizowane dodatnio grupy i wypadkowy ładunek całej cząsteczki jest dodatni, to są to **aminokwasy zasadowe** (np. arginina). **Aminokwasy kwasowe** to takie, w których łańcuch boczny jest naładowany ujemnie, przez co sumaryczny ładunek cząsteczki jest także ujemny (np. kwas glutaminowy, **ryc. II.7.6.**).

Organizm człowieka potrafi syntetyzować tylko niektóre aminokwasy (tzw. **aminokwasy endogenne**), resztę trzeba dostarczać wraz z pożywieniem (tzw. **aminokwasy egzogenne**; **tab. II.7.2.**). Białka zawierające wszystkie aminokwasy egzogenne we właściwych proporcjach to tzw. **białka pełnowartościowe**. Zaliczamy do nich białka pochodzenia zwierzęcego, które można dostarczyć wraz z jajami, mięsem, rybami oraz przetworami mlecznymi. W przeciwieństwie do białek pełnowartościowych białka ubogie w aminokwasy egzogenne lub ich pozbawione nazywamy **niepełnowartościowymi**. Występują one w niektórych zbożach i warzywach. Aminokwas, którego brakuje w danym białku, nazywamy **aminokwasem ograniczającym**. Niedostateczne spożycie aminokwasów i białek w ogóle może skutkować poważnymi zaburzeniami. Przykładem jest **kwashiorkor** stanowiący formę niedożywienia związaną dietą ubogą w białka. Nieleczony kwashiorkor powoduje zaburzenia struktury i funkcji układów i narządów, w tym mózgu (**ryc. II.7.7.**).

aminokwasy egzogenne



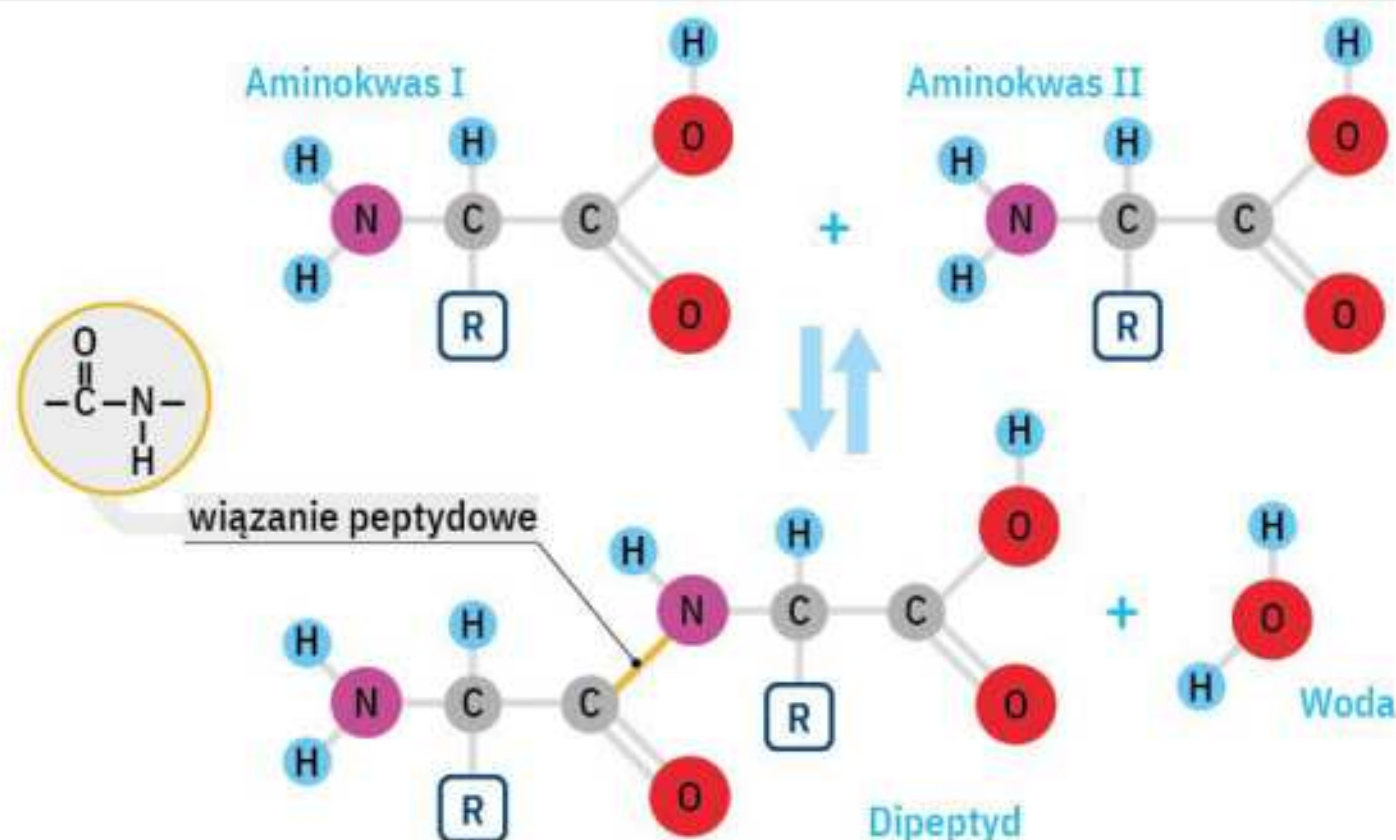
Ryc. II.7.7. Kwashiorkor to choroba związana z niewystarczającym spożyciem białek. Charakterystycznym objawem jest wzdęty brzuch będący skutkiem nadmiaru wody w tkankach.

Tab. II.7.2. Podział aminokwasów na endogenne (syntetyzowane w organizmie) i egzogenne (dostarczane z pożywieniem)

Aminokwasy białkowe	
Endogenne	Egzogenne
alanina	histydyna
arginina*	izoleucyna
asparagina	leucyna
kwas asparaginowy	lizyna
cysteina	metionina
kwas glutaminowy	fenyloalanina
glutamina	treonina
glicyna	tryptofan
prolina	walina
seryna	
tyrozyna	

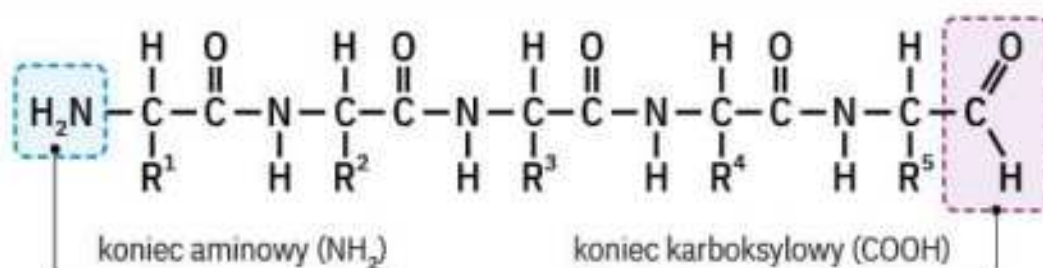
* Organizm człowieka syntetyzuje argininę w niewystarczających ilościach, zwłaszcza w wieku dziecięcym. Jej niedobory trzeba uzupełniać w diecie.

wiązanie peptydowe ➤ Reszty aminokwasowe w białkach są połączone ze sobą za pomocą **wiązania peptydowego**. Wytwarza się ono pomiędzy grupą karboksylową jednego aminokwasu a aminową drugiego (**ryc. II.7.8.**), a w czasie reakcji wydziela się cząsteczka wody. Połączenie kilkudziesięciu lub większej liczby reszt aminokwasowych za pomocą wiązań peptydowych prowadzi do wytworzenia **łańcucha polipeptydowego**.



Ryc. II.7.8. Powstawanie wiązania peptydowego.

Rdzeń takiego łańcucha to układ atomów wchodzących w skład tego wiązania. Od niego odchodzą łańcuchy boczne aminokwasów budujących dany polipeptyd. W każdym łańcuchu polipeptydowym pierwszy i ostatni aminokwas ma wolną jedną z grup funkcyjnych. Mówimy, że polipeptyd ma dwa końce – reszta aminokwasu z wolną grupą aminową jest **końcem aminowym** lub **N-końcem**, a reszta z wolną grupą -COOH jest **końcem karboksylowym**, inaczej **C-końcem** (**ryc. II.7.9.**). Z czego wynika ogromna liczba białek poznanych do tej pory w przyrodzie? Powodem jest **sekwencja** (kolejność) aminokwasów w łańcuchu polipeptydowym. Mimo że istnieje dość ograniczona liczba (20) monomerów (aminokwasów), łączą się one w różnej kolejności. Dodatkowo liczba poszczególnych aminokwasów w białku się różni. To warunkuje ogromną zmienność polipeptydów w naturze.



Ryc. II.7.9. Dwa końce polipeptydu: N-końiec z wolną grupą aminową i C-końiec z wolną grupą karboksylową.

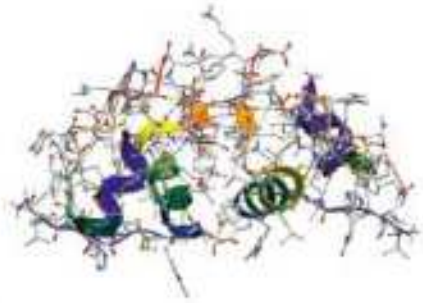
Aby powstało w pełni funkcjonalne białko, łańcuch polipeptydowy musi przyjąć odpowiednią strukturę w przestrzeni (strukturę 3D). Dzieje się to przez odpowiednie skręcenie, sfałdowanie i złożenie łańcucha polipeptydowego w jedną w swoim rodzaju, unikalną cząsteczkę białka przeznaczoną do pełnienia ściśle określonej funkcji. Zatem terminy „białko” i „łańcuch polipeptydowy” nie są tożsame. Różnica między nimi jest taka, jak pomiędzy kłębką wełny a utkanym z niego szalikiem.

Rzędowość białek

Białka są zróżnicowaną grupą makromolekuł zarówno pod względem budowy, jak i pełnionych funkcji. Jednak w budowie każdego białka możemy wyróżnić trzy podstawowe poziomy struktury, które wzajemnie się na siebie nakładają (**tab. II.7.3.**). Białko ma strukturę **pierwszorzędową**, **drugorzędową** i **trzeciorzędową**. Dodatkowo niektóre białka zbudowane są z kilku łańcuchów polipeptydowych i wtedy mają także strukturę **czwartorzędową**.

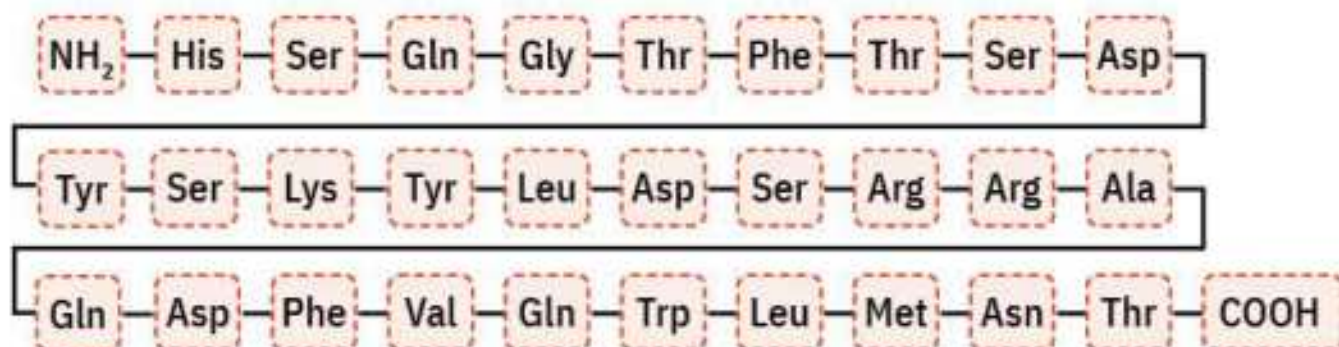
◀ struktura białek

Tab. II.7.3. Struktury białek

Struktura białka	Charakterystyka	Własności	Rzędowość na przykładzie insuliny
Pierwszorzędowa (I-rzędowa)	sekwencja aminokwasów w białku	Decyduje o strukturach wyższego rzędu. Wpływa na funkcje i metabolizm białka. Jest zakodowana w genie.	
Drugorzędowa (II-rzędowa)	przestrzenne ułożenie fragmentów łańcucha polipeptydowego	Może mieć kształt helisy lub harmonijki.	
Trzeciorzędowa (III-rzędowa)	przestrzenne ułożenie całego łańcucha polipeptydowego wraz z łańcuchami bocznymi	Decyduje o aktywności białka. Zniszczenie tej struktury (denaturacja) oznacza utratę aktywności białka.	
Czwartorzędowa (IV-rzędowa)	dotyczy białek zbudowanych z podjednostek (z kilku łańcuchów polipeptydowych)	Warunkuje oddziaływania pomiędzy podjednostkami oraz aktywność białka.	

■ Struktura pierwszorzędowa

Strukturę pierwszorzędową łańcucha polipeptydowego tworzy sekwencja aminokwasów połączonych wiązaniami peptydowymi. Informacja o tej ściśle określonej kolejności ułożenia aminokwasów w białku jest zapisana w genach. Białka najczęściej są zbudowane z 50–2000 aminokwasów. Największe znane dotychczas białko, tzw. tityna, występujące w mięśniach, składa się aż z 27 000 reszt aminokwasowych, a jedno z mniejszych – glukagon – tylko z 29 reszt aminokwasowych (**ryc. II.7.10.**).



Rys. II.7.10. Sekwencja aminokwasowa glukagonu.

Znajomość struktury pierwszorzędowej jest istotna z kilku powodów:

- decyduje o strukturze przestrzennej białka;
- ułatwia określenie funkcji pełnionych przez białko (np. mechanizm przeprowadzanej przez białko reakcji enzymatycznej);
- umożliwia wykrycie nieprawidłowości w funkcjonowaniu białek wynikających z błędnego wstawienia pojedynczych aminokwasów w łańcuch polipeptydowy (tymi zagadnieniami zajmuje się **patologia molekularna**);
- pozwala śledzić zmiany ewolucyjne białek i na tej podstawie badać ich pokrewieństwo.

W jaki sposób liniowe ułożenie aminokwasów może decydować o konformacji przestrzennej białka? Przykładem może być **anemia sierpowata** związana z nieprawidłowościami w strukturze pierwszorzędowej hemoglobiny. Hemoglobina składa się z czterech łańcuchów polipeptydowych (2 alfa i 2 beta). U zdrowych ludzi erythrocyty (czerwone ciątka krwi) mają postać dwuwklęsłych dysków, w których cząsteczki hemoglobiny nie są ze sobą połączone, a każda z nich wiąże się z tlenem. U osób chorych cząsteczki hemoglobiny łączą się ze sobą, tworząc długie, nakładające się na siebie włókna. Te agregaty zmienionej hemoglobiny deformują komórkę, nadając erythrocytom kształt sierpa. Hemoglobina sierpowata różni się od normalnej zmianą tylko pojedynczego aminokwasu (w łańcuchach polipeptydowych beta zamiast kwasu glutaminowego zostaje wstawiona reszta waliny). Sierpowate erythrocyty blokują przepływ krwi w małych naczyniach, co upośledza krążenie, a co za tym idzie – prowadzi do uszkodzenia wielu narządów. Z drugiej strony hemoglobina sierpowata daje odporność na malarię – chorobę przenoszoną przez pasożyta zarodźca malarii. Blisko 1 na 100 mieszkańców zachodniej i środkowej Afryki cierpi na anemię sierpowatą. Dlaczego anemia sierpowata jest tak rozpowszechniona w tym rejonie?

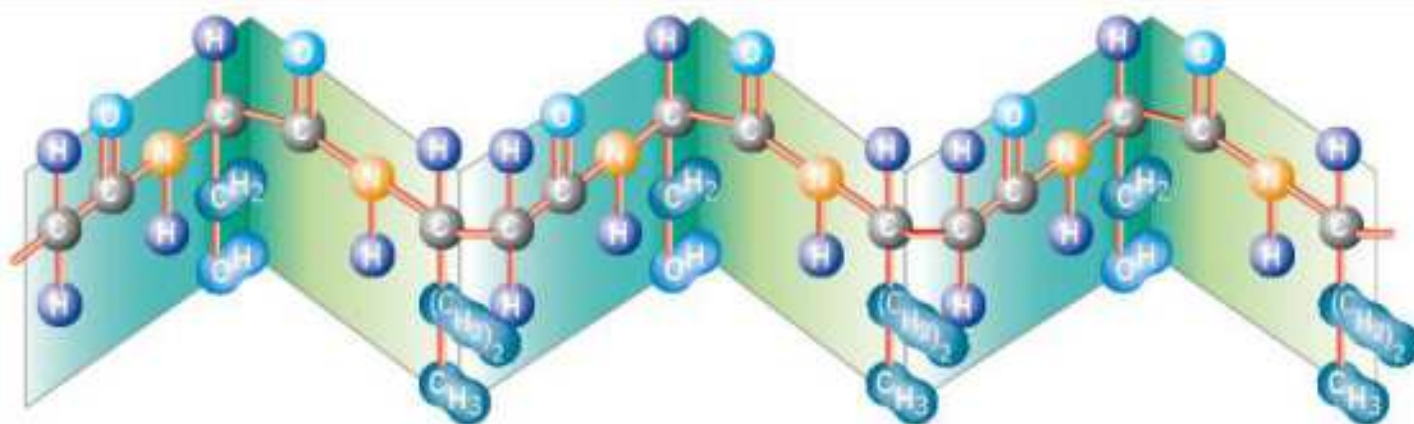
■ Struktura drugorzędowa

Łańcuch polipeptydowy może się zwinąć w często powtarzające się struktury. Najczęściej występują dwa jej rodzaje: **α -helisy** i **β -harmonijki**. Struktura **α -helisy** występuje w tych częściach łańcucha peptydowego, w których uклада się on w regularne prawoskrętne helisy (**ryc. II.7.11.**), podobnie jak skręty w sznurze telefonicznym. Struktura α -helisy jest stabilizowana przez wiązania wodorowe pomiędzy grupami CO– i –NH łańcucha głównego, ściślej – wytwarza się między tlenem grupy karbonylowej a wodorem reszty aminowej oddalonej o cztery pozycje. Struktura β -harmonijki, nazwana także strukturą pofałdowanej kartki, składa się z dwóch lub większej liczby łańcuchów polipeptydowych. Wiązania wodorowe stabilizujące strukturę tworzą się pomiędzy tymi łańcuchami (**ryc. II.7.12.**).

Udział procentowy obu struktur w białkach jest różny. Strukturę α -helisy często można spotkać w białkach fibrylarnych (np. budujących włosy, paznokcie, pióra, kopyta i rogi). Jej udział waha się od 0 do 100%. Na przykład w białku ferrytynie, którego rolą w komórce jest magazynowanie żelaza, struktura α -helisy stanowi 75%. Z kolei białko fibroina (białko jedwabiu) ma strukturę β -harmonijki. Najczęściej jednak spotyka się białka zawierające odcinki zarówno o konformacji α -helisy, jak i β -harmonijki.



Ryc. II.7.11. Prawoskrętne α -helisa.



Ryc. II.7.12. Drugorzędowa struktura białek β -harmonijka kształtem przypomina pofałdowaną kartkę.

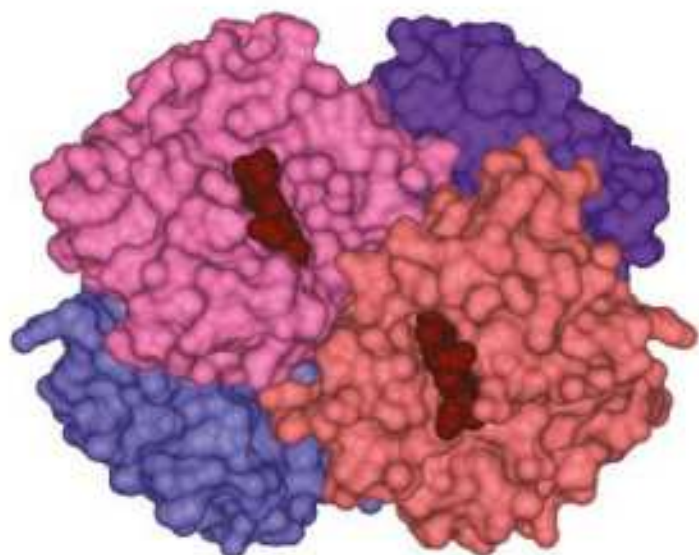
■ Struktura trzeciorzędowa

Struktura trzeciorzędowa określa trójwymiarowy kształt (**konformację**), jaki przyjmuje pojedynczy łańcuch polipeptydowy. Struktura trzeciorzędowa uwzględnia rozmieszczenie łańcucha głównego oraz każdej z reszt aminokwasowych wchodzących w jego skład. Cała struktura jest stabilizowana zarówno słabymi wiązaniami (wiązania wodorowe, jonowe czy hydrofobowe), jak i wiązaniami konwencyjnymi (np. mostki dwusiarczkowe wytwarzające się pomiędzy dwiema resztami aminokwasu cysteiny w tym samym łańcuchu polipeptydowym).

◀ konformacja białek

■ Struktura czwartorzędowa

Struktura czwartorzędowa dotyczy białek, które składają się z więcej niż jednego łańcucha polipeptydowego. W takiej sytuacji każdy z łańcuchów nazywamy **podjednostką**. Zatem struktura czwartorzędowa pokazuje wzajemne ułożenie podjednostek oraz to, w jaki sposób oddziałują one ze sobą.

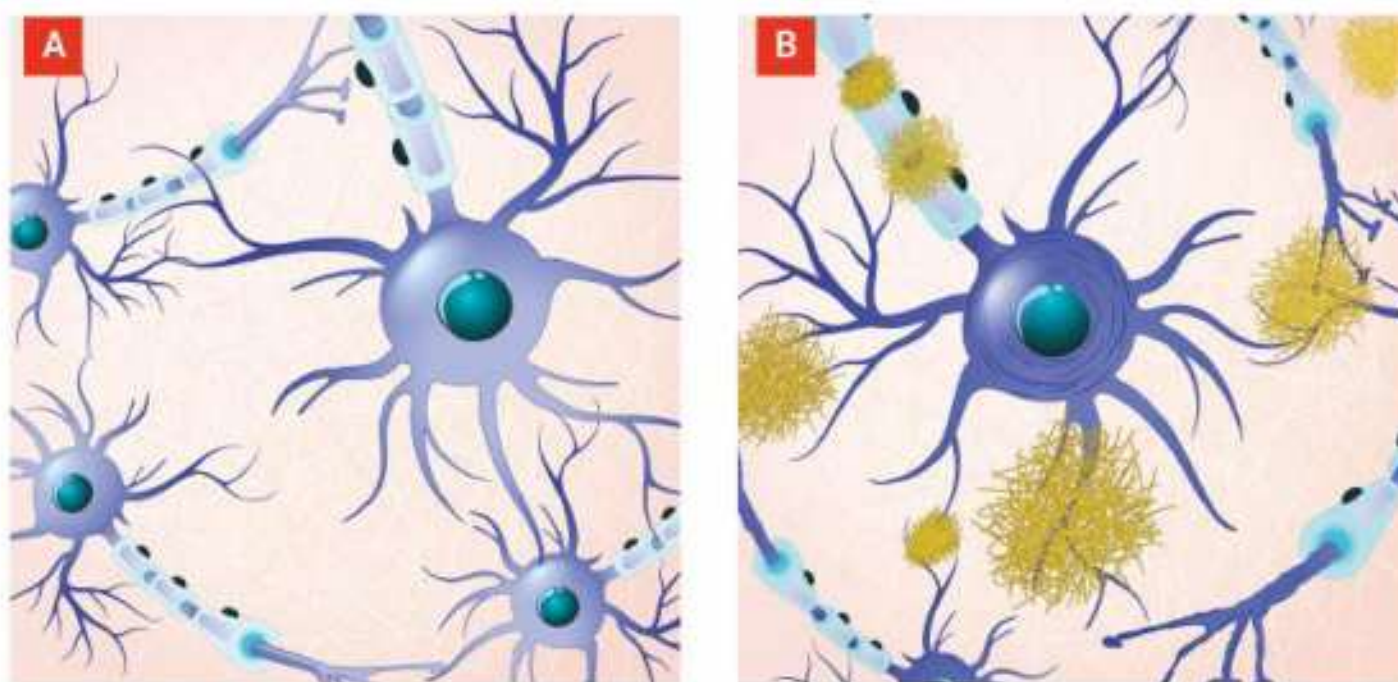


Ryc. II.7.13. Czwartorzędowa struktura hemoglobiny.

Do stabilizacji struktury czwartorzędowej odpowiadają słabe wiązania (wodorowe, jonowe i hydrofobowe). Najprostszy rodzaj struktury czwartorzędowej to białko składające się z dwóch podjednostek, tzw. dimer (np. insulina). Jak już wspomniano, ludzka hemoglobina składa się z czterech podjednostek, jest więc tetramerym (dwie podjednostki jednego typu nazwane alfa i dwie podjednostki innego typu beta). Najbardziej złożone struktury czwartorzędowe zawierają kilkanaście różnych łańcuchów polipeptydowych.

Zwijanie się łańcuchów polipeptydowych i formowanie ostatecznej, w pełni funkcjonalnej

struktury białek nazywamy ich **fałdowaniem się**. To proces nieprzypadkowy, który zachodzi poprzez stabilizację częściowo zwiniętych struktur pośrednich. Biorą w nim udział duże kompleksy białkowe zwane **chaperonami** (białkami opiekuńczymi). Poprawne fałdowanie białek jest kluczowe dla osiągnięcia przez te związki właściwej aktywności biologicznej. O istocie tego procesu można się przekonać, kiedy rozważymy takie schorzenia, jak: choroba Alzheimera, Parkinsona, Creutzfeldta-Jakoba czy płasawica Huntingtona. Ich podłożem jest nieprawidłowe zwijanie się białek i odkładanie się ich w postaci złogów (tzw. blaszek amyloidowych).



Ryc. II.7.14. Tkanka mózgowa u osoby zdrowej (A) i cierpiącej na chorobę Alzheimera z widocznymi płytkami amyloidowymi (B).

Czynniki warunkujące aktywność białka

Sekwencja reszt aminokwasowych w białku determinuje jego strukturę przestrzenną, czyli **konformację**. Konformacja białka z kolei określa jego aktywność biologiczną. Na strukturę przestrzenną, a tym samym na aktywność białka, wpływają dodatkowo takie czynniki, jak: wysoka temperatura, zmiany pH, niektóre związki chemiczne (mocne kwasy i zasady, substancje organiczne, detergenty), promieniowanie UV i wiele innych. Pod ich wpływem zwinięty łańcuch polipeptydowy rozkręca się i przyjmuje przypadkową formę. Proces ten nazywamy **denaturacją**, a czynniki, które ją wywołują – denaturującymi. Utrata natywnej konformacji przestrzennej i aktywności biologicznej są związane z rozerwaniem wiązań wodorowych i jonowych, które warunkują stabilność struktury przestrzennej białka. Procesu denaturacji najczęściej nie można odwrócić. Przykładem denaturacji białka jest działanie wysokiej temperatury na albuminę jaja kurzego w czasie gotowania lub smażenia.

denaturacja białek

Zdecydowana większość białek rozpuszcza się w wodzie i tworzy koloidy, czyli mieszaniny, w których jedna substancja (białko) jest rozproszona w drugiej (woda). Wodny roztwór białka nazywamy **zolem**. W trakcie **koagulacji** zół przekształca się w **żel**. Koagulację mogą wywołać sole metali lekkich, np. NaCl. Warunki, w których dochodzi do koagulacji, są odmienne dla różnych białek, na proces ten ma bowiem wpływ wypadkowy ładunek białka, stopień jego uwodnienia czy temperatura. Koagulacja to proces odwracalny, ponieważ nie narusza struktury przestrzennej białek. Po dodaniu wody żel przechodzi z powrotem w zół.

koagulacja

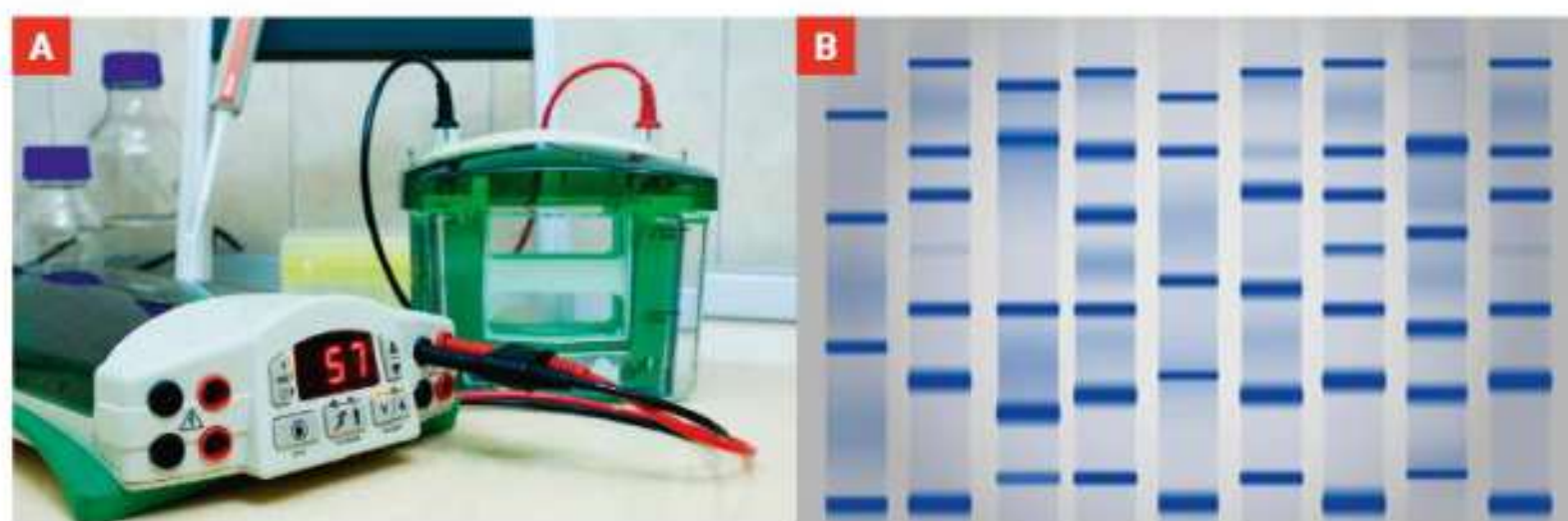
Jak bada się białka?

Z punktu widzenia ważności białek i pełnionych przez nie funkcji ich badanie ma kluczowe znaczenie. Badaniem zestawu białkowego komórki, czyli jej **proteomu**, zajmuje się **proteomika**. Do jej zadań należą: analiza struktury białek, pełnionych przez nie funkcji i zależności między nimi.

Aby móc analizować białka, musimy je najpierw „wydostać” z komórki i oddzielić od całej reszty związków. Dlatego badanie białek obejmuje ich **izolowanie**, **oczyszczanie**, **identyfikację**, **charakterystykę funkcjonalną** oraz **katalogowanie**. Izolowanie białek poprzedza homogenizacja wybranego materiału. Stosując kilkuetapowe **wirowanie różnicowe**, uzyskujemy frakcje o różnej gęstości, które poddajemy oczyszczaniu. Do **oczyszczania** białek stosujemy metody bazujące na różnych ich parametrach, np. rozpuszczalności (np. wysalanie), wielkości (metody chromatograficzne), specyficznym powinowactwie wiązania (np. z wykorzystaniem przeciwciał monoklonalnych) czy ładunku (techniki elektroforetyczne). Dominującą metodą oczyszczania białek jest właśnie **elektroforeza** (ryc. II.7.15.). Jest to zjawisko poruszania się cząsteczki obdarzonej ładunkiem w polu elektrycznym. Rozdziały elektroforetyczne prowadzi się w żelach działających jak sita, które zatrzymują cząsteczki większe niż średnica porów żelu, a transportują cząsteczki mniejsze (te migrują najszybciej). Warunki elektroforezy (pH) dobiera się tak, aby białko zawsze miało ładunek ujemny, a kierunek wędrówki przebiegał od katody do

elektroforeza

anody. W wyniku rozdziatu elektroforetycznego na żelu powstaje „drabinka” prążków odpowiadających białkom o różnej wielkości. Aby je uwidocznić, przeprowadza się barwienie za pomocą różnych pigmentów (np. Coomassie lub srebra). Do odczytania masy konieczna jest znajomość pozycji wzorców białek na żelu o znanej masie (**ryc. II.7.15.**). Duże białka zatrzymują się szybko na żelu jako pierwsze, a małe poruszają się szybko, toteż ich obecności można się spodziewać u dołu żelu.



Ryc. II.7.15. Aparat do przeprowadzania elektroforezy (A) oraz przykładowy żel z rozdzielonymi białkami w postaci prążków (B).

Naukowcy dysponują także metodami analitycznymi, które pozwalają na poznanie struktury przestrzennej białka oraz sekwencji aminokwasowej. Do określenia budowy przestrzennej może posłużyć zaawansowana **technika dyfrakcji promieni X**. Z kolei poznanie struktury pierwszorzędowej bazuje na hydrolizie białka do tworzących go aminokwasów (np. metodą Edmana) i ściśle wiąże się z **bioinformatyką**.



Eksperyment

1. Wykrywanie wiązania peptydowego (reakcja biuretowa)

Wprowadzenie: Reszty aminokwasowe w białku są połączone za pomocą wiązania peptydowego. Wiązanie to wykrywa się za pomocą reakcji biuretowej (odczynu Piotrowskiego). Miedź zawarta w odczynniku biuretowym reaguje z wiązaniem peptydowym, tworząc fioletowy produkt. Im więcej wiązań peptydowych w cząsteczce, tym bardziej intensywne zabarwienie.

Problem badawczy: Czy w białku jaja kurzego występują wiązania peptydowe?

Hipoteza badawcza: Reszty aminokwasowe białka są połączone wiązaniami peptydowymi.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: W 5 probówkach umieść po 2 ml następujących produktów: (1) woda, (2) mleko skondensowane, (3) mleko ryżowe, (4) białko jaja kurzego i (5) sok jabłkowy. Do każdej probówki dodaj po 2 ml rozcieńczonego roztworu NaOH, a następnie delikatnie po ściance probówki 1 ml 10-procentowego odczynnika biuretowego. Obserwuj zmiany zabarwienia. W probówkach zawierających białko na granicy roztworów pojawia się fioletowy pierścień.

Wynik: Czy fioletowe zabarwienie jest obecne w każdej probówce?

Wniosek: Sformułuj wniosek.

2. Wydzielanie z mleka jego głównego białka – kazeiny – pod wpływem zmian pH

Wprowadzenie: Kazeina stanowi ok. 75% białek mleka i jest dla noworodków i niemowląt źródłem niezbędnych aminokwasów. Jest więc białkiem pełnowartościowym. Wytrąca się pod wpływem różnych czynników (np. jony, sole mineralne, enzymy, zmiany pH).

Problem badawczy: Sformułuj problem badawczy.

Hipoteza badawcza: Kazeina mleka wytrąca się pod wpływem niskiego pH.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: Do zlewki o objętości 250 ml nalej 100 ml tłustego mleka. Zlewkę umieść na płycie grzejnej i podgrzewaj, utrzymując temperaturę nie wyższą niż 50–60°C. Za pomocą strzykawki wkropl do tej zlewki 5 ml 10-procentowego kwasu octowego. Całość cały czas mieszaj. Po pewnym czasie z mleka oddzieli się twaróg. Na lejek nałóż bibułę filtracyjną lub złożoną na 4 części gazę i przesącz uzyskany roztwór.

Wynik: Po wykonaniu doświadczenia sporządź notatkę w zeszycie, opisz jego przebieg, przedstaw wyniki.

Wniosek: Sformułuj wniosek.

Wykorzystując różne źródła informacji, odpowiedz na poniższe kwestie:

- A. Co to jest serwatka?
- B. Na czym polega i pod wpływem czego zachodzi tzw. zsiadanie mleka?
- C. Do czego w praktyce wykorzystujemy kazeinę?

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, z czego wynika ogromne zróżnicowanie białek występujących w komórkach organizmów.
2. Wymień, jakie funkcje pełnią białka.
3. Poniżej podano dwie sekwencje aminokwasowe. Składają się one z tych samych reszt aminokwasów, lecz połączonych w odwrotnej kolejności:
I. Ala-Gly-Val-Ala-Trp-Cys-Lys-Lys-Gly-Glu-Asp
II. Asp-Glu-Gly-Lys-Lys-Cys-Trp-Ala-Val-Gly-Ala
Wyjaśnij, czy mogą to być sekwencje jednego białka, czy różnych białek. Uzasadnij odpowiedź.
4. Do jakiej grupy aminokwasów zaliczysz:
A. tryptofan B. alaninę C. kwas glutaminowy
5. Wyszukaj w dostępnej literaturze przykłady produktów roślinnych zawierających białka niepełnowartościowe.
a) Sporządź w zeszycie tabelę aminokwasów ograniczających dla tych produktów.
b) W jaki sposób powinien komponować swoją dietę wegetarianin lub weganin?
6. *Stwardnienie zanikowe boczne to nieuleczalna choroba układu nerwowego, w której przebiegu dochodzi do uszkodzenia komórek nerwowych odpowiedzialnych za ruch, znajdujących się w rdzeniu kręgowym, pniu mózgu i korze mózgowej. Objawami są postępujące osłabienie mięśni, problemy z mową, chodzeniem i połykaniem. Jedną z przyczyn tej choroby jest zamiana jednego aminokwasu (leucyny) na inny (fenyloalaninę) w białku enzymatycznym.*

Na podstawie tego tekstu wyjaśnij, jakie znaczenie ma sekwencja aminokwasowa dla funkcjonowania białka.

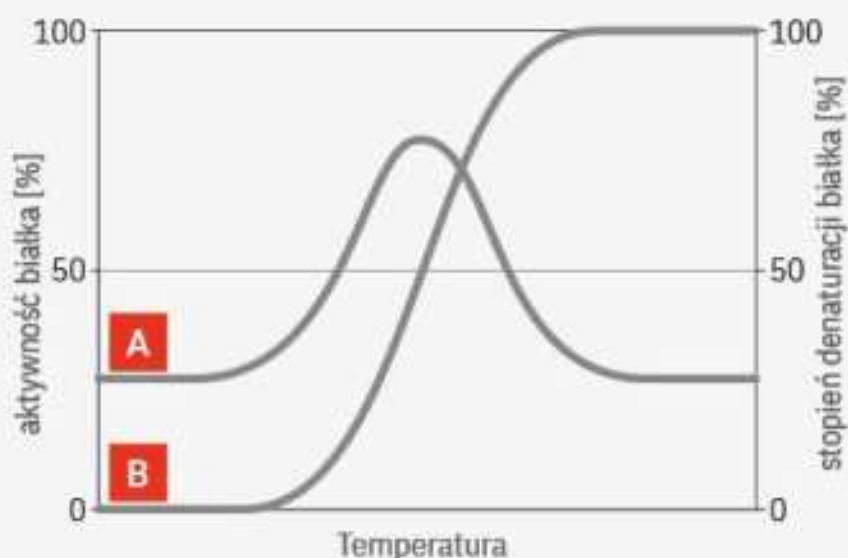




7. Krzywe przedstawione wykresie obok przedstawiają zależność aktywności oraz stopnia denaturacji białek od temperatury. Po ich analizie odpowiedz na pytania.

7.1. Zdecyduj, który wykres (A czy B) dotyczy stopnia denaturacji białek, a który aktywności białek w zależności od temperatury. Odpowiedź uzasadnij.

7.2. Wyjaśnij istotę procesu denaturacji.



8. Poniżej przedstawiono w przypadkowej kolejności etapy powstawania czwartorzędowej struktury białka.

Podaj właściwą kolejność tych etapów.

A. Połączenie ze sobą dwóch lub więcej łańcuchów polipeptydowych o ukształtowanej strukturze przestrzennej.

B. Połączenie aminokwasów w odpowiedniej kolejności w łańcuch polipeptydowy.

C. Zwijanie się fragmentów łańcucha polipeptydowego w powtarzalne struktury trójwymiarowe, np. helisy lub harmonijki.

D. Przestrzenne ułożenie całego łańcucha polipeptydowego wraz z łańcuchami bocznymi.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 70 ▶ • **Białka** stanowią podstawę wszystkich procesów życiowych oraz wchodzą w skład błon komórkowych.
- s. 70 ▶ • **Białka dzielimy** ze względu na budowę (proste, złożone), kształt (fibrylarne, globularne) lub funkcje (enzymatyczne, strukturalne, zapasowe, transportujące, hormonalne, receptorowe, obronne).
- s. 72 ▶ • **Białka są zbudowane** z zestawu dwudziestu **aminokwasów**, które łączą się ze sobą wiązaniami peptydowymi w ściśle określonej kolejności, czyli sekwencji.
- s. 72 ◀ • **Aminokwasy** dzielimy na niepolarne (np. alanina, walina), polarne bez ładunku (np. seryna), polarne z ładunkiem dodatnim (np. arginina), polarne z ładunkiem ujemnym (np. kwas glutaminowy).
- s. 75 ▶ • Organizm człowieka nie potrafi syntetyzować wszystkich aminokwasów i część z nich (tzw. **aminokwasy egzogenne**) trzeba dostarczać wraz z pożywieniem.
- s. 77 ▶ • **Struktura białek** wykazuje cztery poziomy uporządkowania: strukturę pierwszorzędową (sekwencję aminokwasów), drugorzędową (faldowanie na płaszczyźnie α -helisy i β -harmonijki), trzeciorzędową (trójwymiarowy kształt białka) i czwartorzędową (struktura podjednostkowa).
- s. 81 ▶ • Pod wpływem **czynników denaturujących** dochodzi do zniszczenia struktury przestrzennej i utraty aktywności białka.
- s. 81 ▶ • Technika **elektroforezy** służy do rozdzielania i oczyszczania białek.

8. Budowa i funkcje kwasów nukleinowych

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz funkcje kwasów nukleinowych w komórce;
- przeanalizujesz cechy struktury DNA;
- zobaczysz, w jaki sposób DNA jest upakowane w komórce;
- poznasz przyczynę różnorodności DNA.

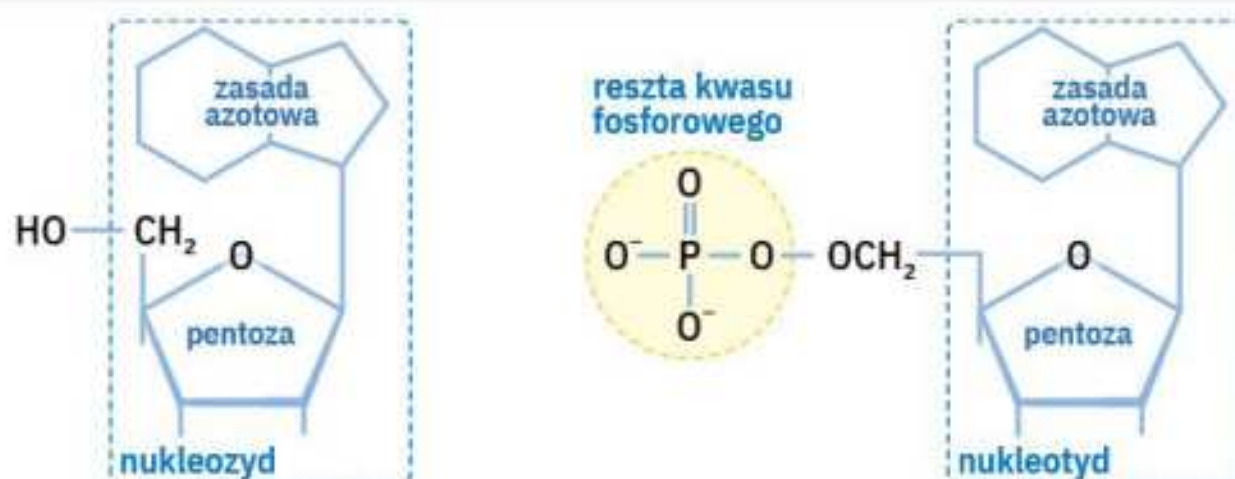
Kwasy nukleinowe przenoszą informację genetyczną. **Kwas deoksyrybonukleinowy (DNA)** zawiera geny, czyli materiał dziedziczny, w którym jest zapisana „instrukcja” niezbędna do syntezy wszystkich białek oraz wszystkich rodzajów RNA. Z kolei **kwasy rybonukleinowe (RNA)** biorą udział w biosyntezie białek, podczas której pełnią różne funkcje. Na przykład matrycowy RNA (mRNA) przenosi informację o sekwencji aminokwasowej łańcucha polipeptydowego, transferowy RNA (tRNA) bierze udział w syntezie tychże polimerów, a rybosomowy RNA (rRNA) wchodzi w skład rybosomów i ma właściwości katalityczne.

kwasy nukleinowe

Podobnie jak białka, kwasy nukleinowe są polimerami zbudowanymi z podjednostek zwanych **nukleotydami** (ryc. II.8.1.). Każdy nukleotyd składa się z:

nukleotyd

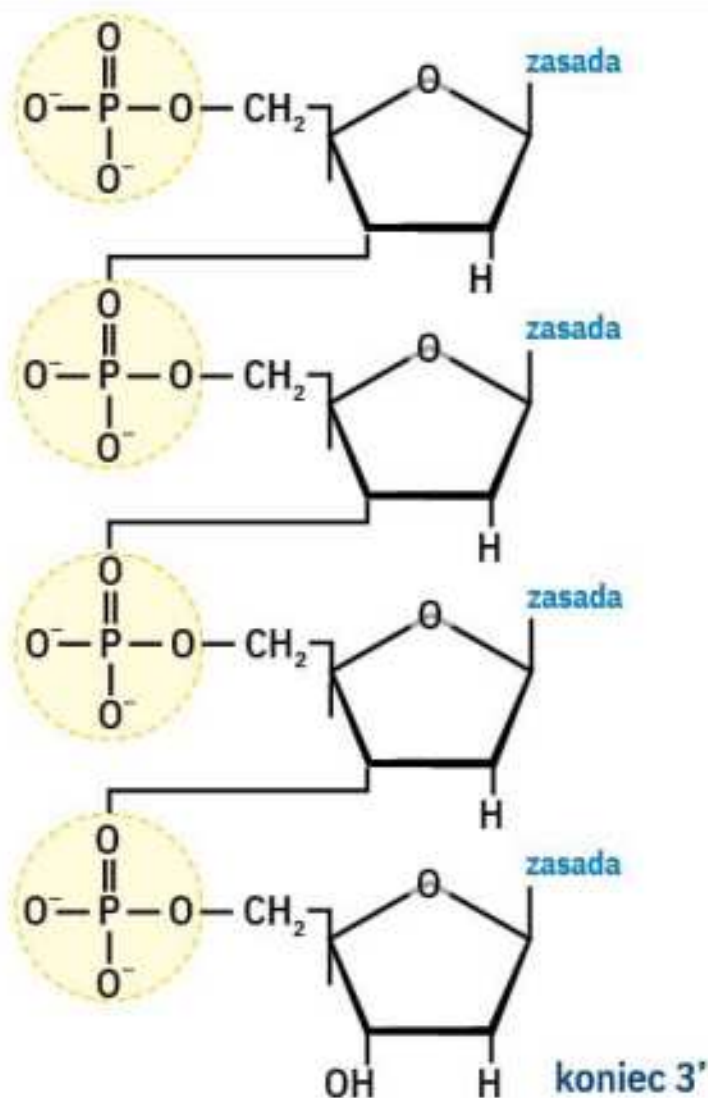
- pięciowęglowego cukru – deoksyrybozy w DNA i rybozy w RNA;
- grupy fosforanowej nadającej cząsteczce kwaśny charakter;
- pochodnych zasady azotowej (puryny lub pirymidyny).



Ryc. II.8.1. Składniki kwasów nukleinowych.

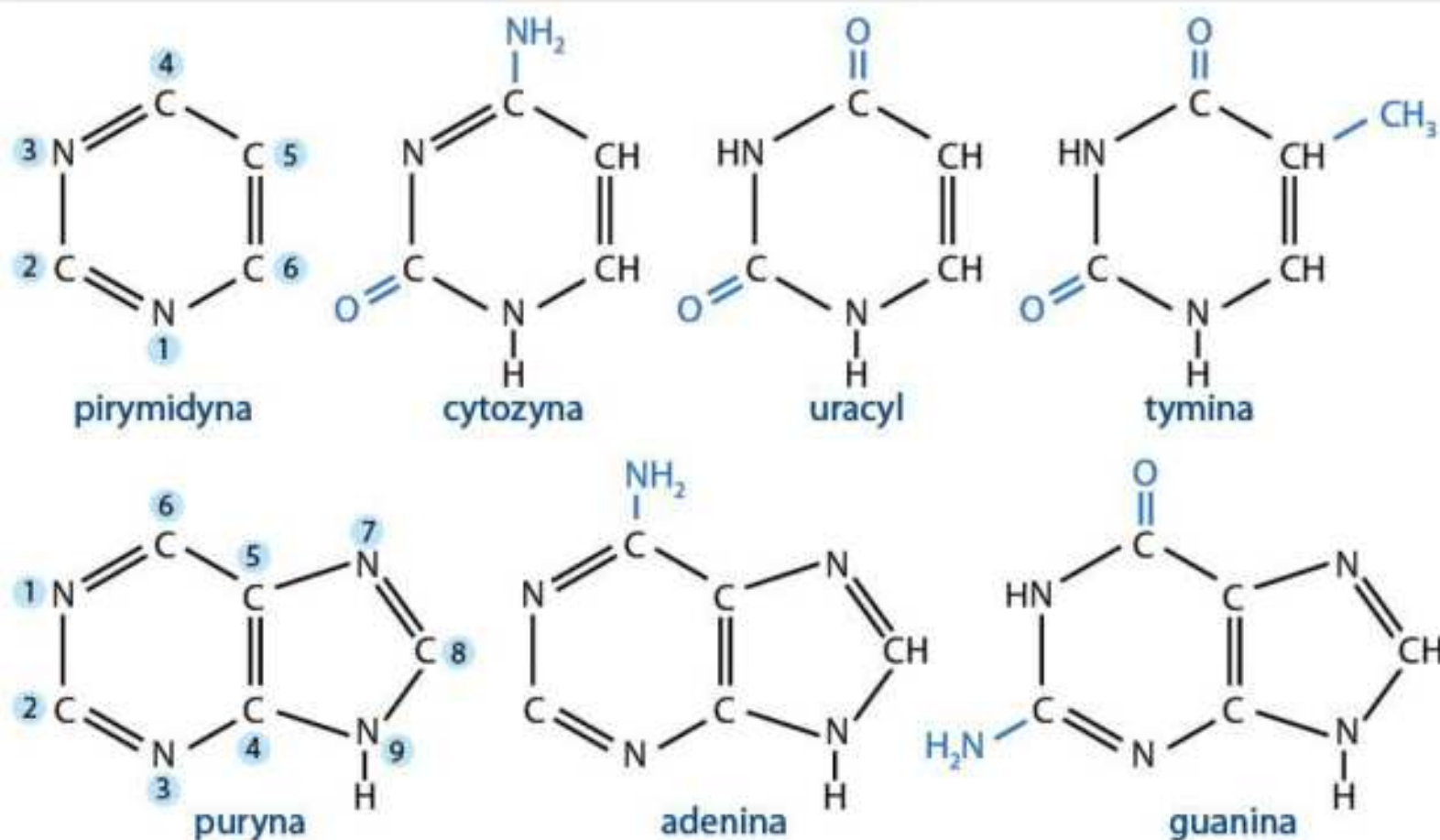
Pochodnymi **zasad azotowych** są dwupierścieniowe **puryny** lub jednopierścieniowe **pirymidyny** (ryc. II.8.3.). W DNA występują puryny: **adenina** (A) i **guanina** (G) oraz pirymidyny: **cytozyna** (C) i **tymina** (T). W budowie RNA purynami są: adenina i guanina, natomiast pirymidynami: cytozyna i uracyl. W skład każdego nukleotydu wchodzi tylko jedna z wymienionych zasad azotowych. Na przykład nukleotyd ade-

koniec 5'



Ryc. II.8.2. Każda z nici DNA ma dwa końce – koniec 5' z wolną grupą fosforanową i koniec 3' z wolną grupą hydroksylową.

ninowy składa się z adeniny, cukru i reszty fosforanowej. Nukleotydy w kwasach nukleinowych są ułożone liniowo – jeden za drugim – i łączą się **wiązaniami fosfodiesterowymi**. To kowalencyjne wiązanie powstaje pomiędzy grupą fosforanową znajdującą się przy piątym atomie węgla pentozy jednego nukleotydu a grupą hydroksylową ($-OH$) przy trzecim atomie węgla reszty cukrowej kolejnego nukleotydu (**ryc. II.8.2.**). Stąd w łańcuchu nukleotydowym można wyróżnić dwa końce: koniec 3' (czytaj: trzy prim) (wolna reszta fosforanowa) i koniec 5' (wolna grupa hydroksylowa reszty cukrowej) (**ryc. II.8.2.**). Podobnie jak sekwencja aminokwasowa w białku, tak samo sekwencja nukleotydowa ma ogromne znaczenie, ponieważ jest swego rodzaju kodem niosącym precyzyjną informację o budowie białek.



Ryc. II.8.3. Struktura puryn i pirymidyn wchodzących w skład kwasów nukleinowych (cyframi oznaczono numerację atomów w pierścieniu).

RNA jest zwykle zbudowany z jednej nici polinukleotydowej, podczas gdy DNA stanowią dwie skręcone spiralnie nici polinukleotydowe tworzące strukturę podwójnej helisy (ryc. II.8.4.). Porównanie struktury i funkcji kwasów DNA i RNA przedstawia tabela II.8.1.

Tab. II.8.1. Porównanie budowy DNA i RNA

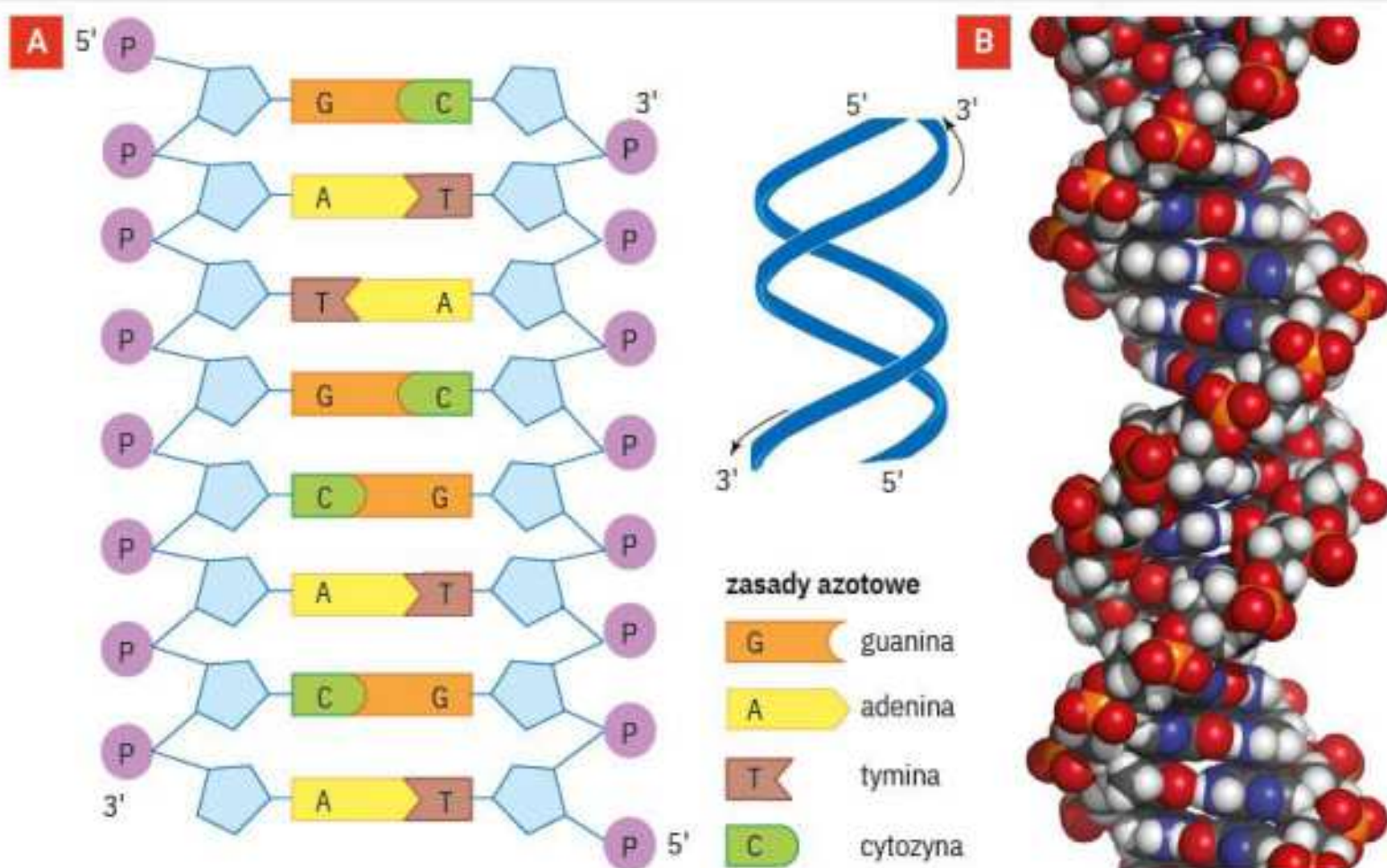
Cecha	DNA	RNA
Liczba nici	2	1
Podjednostka, z której jest zbudowany kwas	Nukleotyd adeninowy, guanidynowy, cytozynowy oraz tymidynowy	Nukleotyd adeninowy, guanidynowy, cytozynowy oraz uracylowy
Reszta cukrowa w nukleotydzie	Deoksyryboza	Ryboza
Zasady azotowe nukleotydu	Puryny: adenina (A), guanina (G) Pirymidyny: cytozyna (C), tymina (T)	Puryny: adenina (A), guanina (G) Pirymidyny: cytozyna (C), uracyl (U)
Reszta kwasu nieorganicznego	Reszta kwasu fosforowego (V)	
Występowanie	Jądro komórkowe, jąderko, mitochondrium, chloroplasty	Jądro komórkowe, jąderko, cytoplazma, rybosomy
Zawartość w komórce	1% świeżej masy	5–10% świeżej masy
Funkcja	Zawiera geny, w których zapisana jest informacja o budowie białek.	Uczestniczy w biosyntezie białek.
Rodzaje	Wiele rodzajów	Kilka rodzajów: • mRNA przenosi informację • tRNA transportuje aminokwasy • rRNA wchodzi w skład rybosomów

Struktura DNA

• cząsteczka DNA

DNA został odkryty w 1869 roku przez szwajcarskiego biochemika Friedricha Mieschera (czytaj: fridricha miszera). Badacz ten wyizolował go w czystej postaci z nasączonych ropą bandaży żołnierzy. Odkrył stosunkowo dużą cząsteczkę bogatą w fosfor. Dopiero po 75 latach od tego odkrycia (w latach 30. XX wieku) okazało się, że DNA przenosi informację genetyczną (do tego czasu sądzono, że geny są zbudowane z białek).

W 1953 roku dwaj późniejsi nobliści – James Watson i Francis Crick (czytaj: dżejms łotson i francis krik) – wykazali, że w komórce DNA występuje w postaci **podwójnej helisy** (ryc. II.8.4.).



Ryc. II.8.4. Budowa DNA. (A) W łańcuchu nukleotydowym szkielet cukrowo-fosforanowy jest umieszczony na zewnątrz, a zasady – do wewnątrz, (B) podwójna nić DNA – zasady azotowe nukleotydów parują się – adenina jednej nici zawsze łączy się z tyminą drugiej nici, a guanina z cytozyną, DNA ma postać podwójnej, prawoskrętnej helisy.

DNA odkryte przez tych badaczy zostało określone mianem kamienia milowego nauki XX wieku. Najważniejsze cechy modelu struktury DNA Watsona i Cricka to:

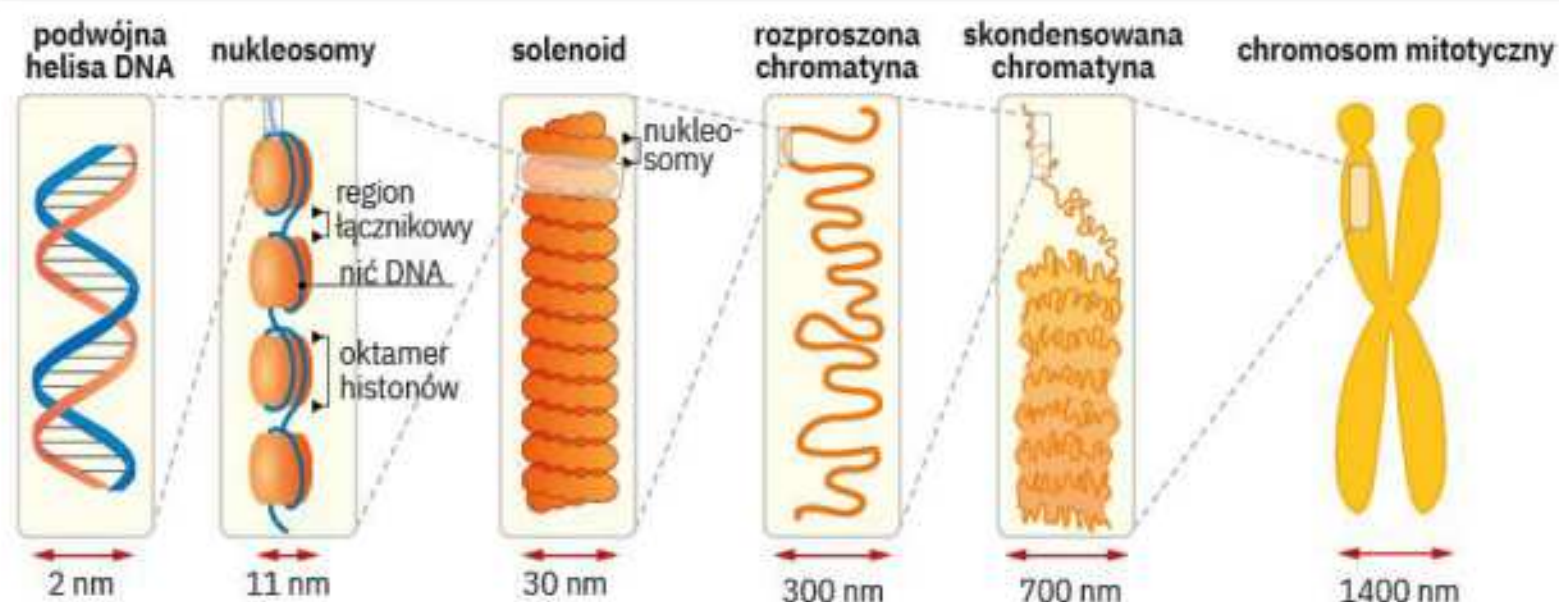
- dwie helikalne nici polinukleotydowe są skręcone wokół wspólnej osi;
- każda z nici biegnie w przeciwnym kierunku (jedna ułożona jest w kierunku 5'–3', a druga 3'–5');
- zasady obu nici są połączone wiązaniami wodorowymi i sparowane, co oznacza, że zawsze adenina jednej nici łączy się z tyminą drugiej nici (A–T), a cytozyna z guaniną (C–G). Reguła parowania, czyli **komplementarności zasad**, powoduje, że znając sekwencję jednej nici, w jednoznaczny sposób można określić sekwencję drugiej nici. Ma to niebywałe znaczenie dla procesu powielania i przekazywania informacji;
- szkielety cukrowo-fosforanowe obu nici wystają na zewnątrz helisy, a zasady azotowe są skierowane do wewnątrz;
- cała helisa DNA jest stabilizowana wiązaniami wodorowymi oraz oddziaływaniami hydrofobowymi.

Naturalnie występujące cząsteczki DNA są wyjątkowo długimi cząsteczkami (**tab. II.8.2.**). Wynika to z ich funkcji oraz ze złożoności organizmów – aby mogły przenosić niezbędną informację, muszą zawierać wiele nukleotydów. W komórce eukariotycznej DNA jest w niej ściśle skręcone i upakowane. DNA wiąże się z niskocząsteczkowymi białkami zwanymi **histonami** i taki zestaw białkowo-deoksy-

komplementarność
zasad ▶

histony ▶

rybonukleinowy nazywamy **chromatyną**. Chromatyna dzięki tworzeniu kolejnych uporządkowanych struktur przybiera różne poziomy kondensacji w komórce (najbardziej skręcona jest w czasie mitozy). Najniższy stopień uporządkowania chromatyny stanowi **nukleosom**, w którym DNA jest owinięty wokół oktameru histonowego (kompleksu ośmiu białek histonowych) (**ryc. II.8.5.**). W kolejnym etapie nukleosomy się skręcają, tworząc układy helikalne (tzw. solenoid). Kolejne zwinięcia tych włókien prowadzą do bardzo zwartego upakowania DNA, które ostatecznie przyjmuje postać **chromosomu** (**ryc. II.8.5.**).



Ryc. II.8.5. Upakowanie DNA w komórce. DNA w komórce ulega stopniowemu „pakowaniu”, przyjmując ostatecznie postać chromosomu.

Struktura RNA

W przeciwieństwie do DNA RNA najczęściej jest jednoniciowe i bezładnie pofałdowane, ale może także przyjmować zróżnicowane struktury, co wynika z pełnionych przez RNA wielu odmiennych funkcji. Częstym kształtem przyjmowanym przez **cząsteczki RNA** jest tzw. struktura spinki do włosów (**ryc. II.8.6.**). Struktura ta charakteryzuje się występowaniem dwuniciowego fragmentu w obrębie tego samego łańcucha RNA (parowanie zachodzi na zasadzie komplementarności nukleotydów) zakończonego niesparowaną pętlą.

◀ cząsteczka RNA



Ryc. II.8.6. Struktura RNA. RNA najczęściej jest jednoniciowe (A), ale może przyjmować bardziej skomplikowane struktury (np. spinki do włosów) (B).

Tab. II.8.2. Długość cząsteczki DNA wirusowego, bakteryjnego oraz w komórkach pszenicy i człowieka

Długość cząsteczki DNA [nukleotydy]	
wirus poliooma	5100
bakteria <i>Escherichia coli</i>	4,6 mln
pszenica	16 mld
człowiek	3 mld



Ryc. II.8.7. Struktura tRNA przypomina kształtem odwróconą literę L.

Aby na podstawie informacji zapisanej w DNA mogło powstać funkcjonalne białko, musi ona wpięrw zostać przepisana na RNA. We wszystkich komórkach, zarówno prokariotycznych, jak i eukariotycznych, występują trzy główne rodzaje RNA, które wyróżnia się na podstawie ich funkcji i cech strukturalnych:

- **informacyjny RNA (matrycowy) (mRNA)** – RNA o ogromnym zróżnicowaniu sekwencji nukleotydowej. W sekwencji nukleotydów mRNA jest zapisana informacja o strukturze konkretnego białka;
- **transportujący RNA (tRNA)** – najmniejszy z rodzajów RNA, który przyłącza wolne aminokwasy w cytoplazmie i transportuje je do rybosomów. Aminokwasy w procesie translacji zostają włączone do nowo tworzonego łańcucha polipeptydowego. tRNA ma charakterystyczną strukturę przypominającą odwróconą literę L (**ryc. II.8.7.**);
- **rybosomowy RNA (rRNA)** – wchodzi w skład rybosomów. Rybosomy zawierają od 50 do 65% RNA. rRNA ma właściwości katalityczne i bierze udział w syntezie białek.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

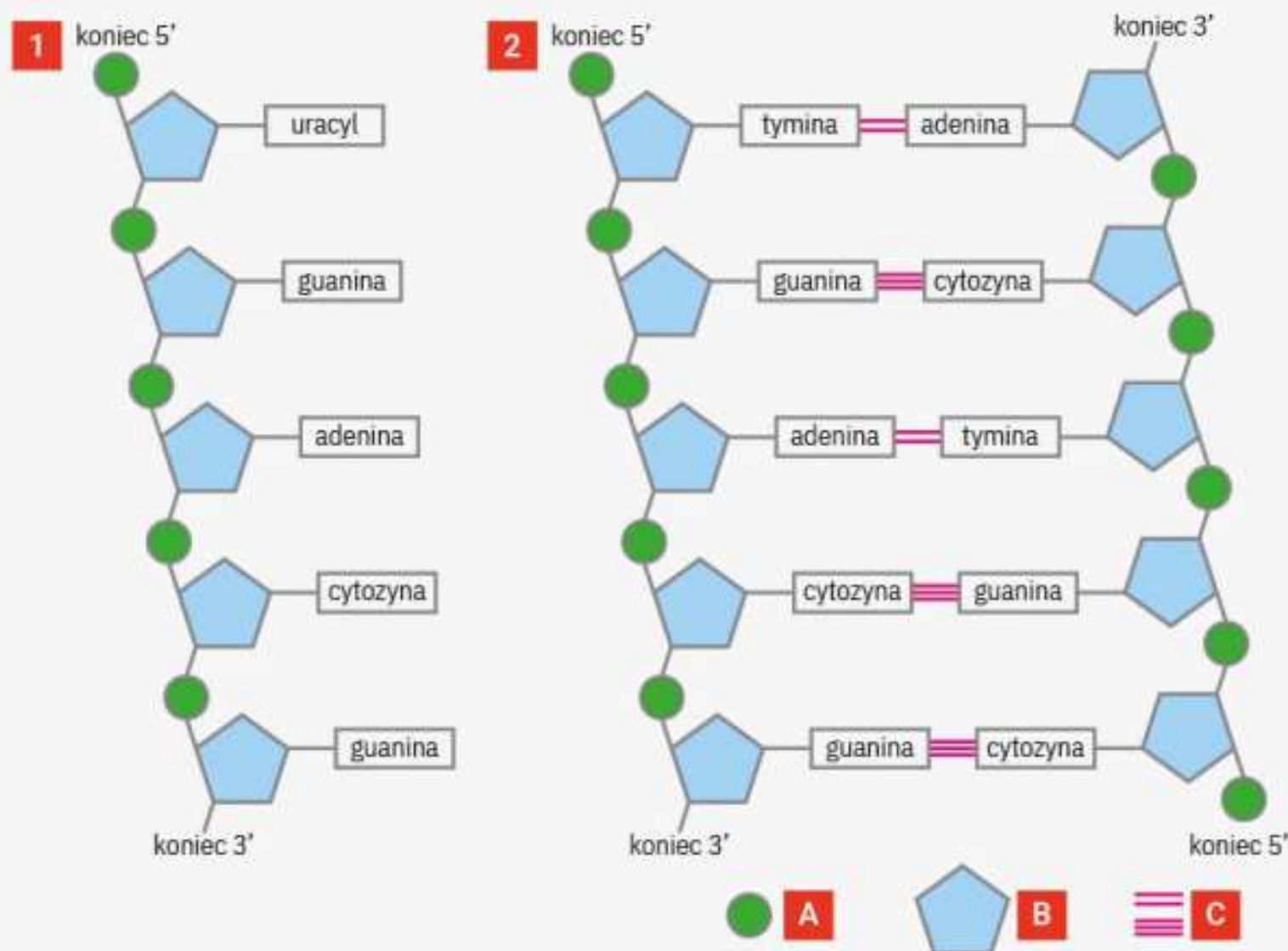
- Omów składniki nukleotydu oznaczone na rysunku literami A i B oraz podaj różnice pomiędzy nukleotydami budującymi DNA i RNA.
- Wyjaśnij na podstawie budowy kwasów nukleinowych, dlaczego RNA łatwiej ulega hydrolizie i jest bardziej wrażliwy na działanie enzymów niż DNA.
- Stosując zasadę komplementarności, do podanej poniżej nici DNA dopisz w zeszycie drugą.
AATTCGTCACCGTACG
- Wymień i scharakteryzuj rodzaje RNA komórkowego.
- Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zadanie wykonaj w zeszycie.



Stwierdzenie	P/F
1. W DNA jest zapisana informacja o budowie wszystkich białek organizmu.	...
2. Struktura RNA to dwuniciowa, prawoskrętna helisa.	...
3. W skład nukleotydów kwasów nukleinowych wchodzi jedna zasada purynowa i jedna pirymidynowa.	...
4. tRNA jest składnikiem rybosomów i ma właściwości katalityczne.	...

- Watson i Crick do rozwiązania struktury DNA wykorzystali zdjęcia dyfrakcji rentgenowskiej DNA wykonane wcześniej przez Rosalind Franklin. Korzystając z dostępnych źródeł, wyjaśnij, na czym polega technika dyfrakcji rentgenowskiej i do jakiego typu pomiarów może być wykorzystana.

7. Na rysunku przedstawiono fragmenty struktury dwóch rodzajów kwasów nukleinowych.



- 7.1. Podaj nazwy kwasów nukleinowych oznaczonych cyframi 1 i 2.
- 7.2. Nazwij elementy budowy tych kwasów oznaczone cyframi A, B oraz C.
- 7.3. Na podstawie rysunku wymień dwie różnice w budowie tych kwasów.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Kwasy nukleinowe** funkcjonują jako cząsteczki informacyjne w komórce; DNA jest nośnikiem informacji genetycznej, a RNA bierze udział w jej realizacji – syntezie białek. ◀ s. 85
- DNA i RNA są liniowymi polimerami zbudowanymi z **nukleotydów**; w skład nukleotydu wchodzi zasada azotowa, cukier i reszta fosforanowa. W DNA cukrem jest deoksyryboza, a zasadami są: adenina, guanina, cytozyna i tymina. Nukleotydy RNA zawierają cukier (rybozę) oraz zasady (adeninę, guaninę, cytozynę i uracyl). ◀ s. 85
- **Cząsteczki DNA** składają się z dwóch łańcuchów (nici) polinukleotydowych zwiniętych spiralnie i tworzących podwójną helisę. ◀ s. 87
- W komórkach eukariotycznych DNA jest związany z białkami – **histonami** – i silnie skręcony, co pozwala na ciasne upakowanie całej cząsteczki w jądrze komórkowym. ◀ s. 88
- **Cząsteczki RNA** są zwykle jednoniciowe, ale potrafią się zwiijać, tworząc rozmaite struktury (np. spinę do włosów) uzależnione od pełnionych przez nie funkcji. ◀ s. 89

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

s. 24 ► Podstawowe pierwiastki wchodzące w skład organizmów i ich funkcje

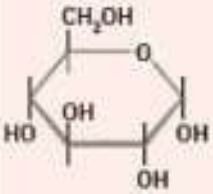
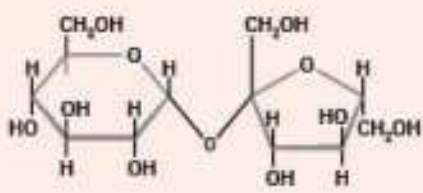
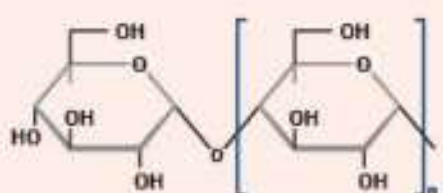
Pierwiastek		Funkcja w organizmie
makroelementy >0,01% suchej masy organizmu	pierwiastki biogenne	węgiel (C) wodór (H) • wchodzą w skład związków organicznych budujących każdy żywy organizm (białka, cukry, tłuszcze, kwasy nukleinowe)
		azot (N) • składnik aminokwasów, białek i kwasów nukleinowych, ATP • składnik chlorofilu i alkaloidów (kofeina, morfina)
		siarka (S) • składnik niektórych aminokwasów (cysteiny, metioniny), białek i enzymów
		fosfor (P) • składnik kwasów nukleinowych, związków wysokoenergetycznych, np. ATP, fosfolipidów • element budulcowy kości i zębów
	inne makroelementy	wapń (Ca) • składnik blaszek środkowych łączących ściany komórkowe roślin • składnik szkieletu człowieka i zwierząt • uczestniczy w funkcjonowaniu komórek nerwowych i mięśniowych • bierze udział w krzepnięciu krwi
		magnez (Mg) • składnik chlorofilu • składnik kości • aktywator wielu enzymów • niezbędny do pracy komórek nerwowych i mięśniowych
		sód (Na) • regulacja ciśnienia osmotycznego krwi • udział w przewodzeniu impulsów nerwowych
		potas (K) • regulacja równowagi wodnej u roślin • uczestniczy w przewodzeniu impulsów nerwowych i skurczu mięśni • aktywator wielu enzymów
		chlor • składnik soku żołądkowego • bierze udział w utrzymaniu równowagi wodno-mineralnej organizmu
mikroelementy <0,01% suchej masy organizmu	żelazo (Fe)	• składnik barwników oddechowych u człowieka i zwierząt (hemoglobiny i mioglobiny) • składnik enzymów łańcucha oddechowego • katalizator syntezy chlorofilu
	jod (I)	• składnik hormonów tarczycy
	miedź (Cu)	• uczestniczy w transporcie żelaza we krwi • buduje wiele enzymów • bierze udział w syntezie chlorofilu
	kobalt (Co)	• składnik witaminy B ₁₂ • niezbędny do wiązania azotu przez rośliny
	cynk (Zn)	• niezbędny do syntezy hormonów roślinnych • przyspiesza gojenie się ran
	fluor (F)	• składnik kości i zębów

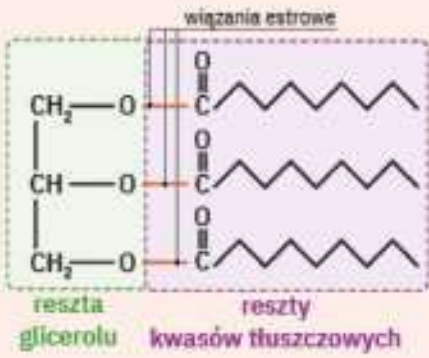
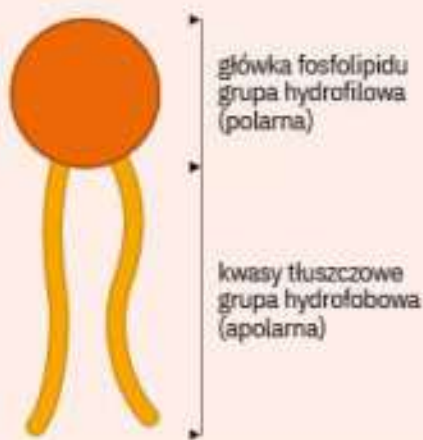
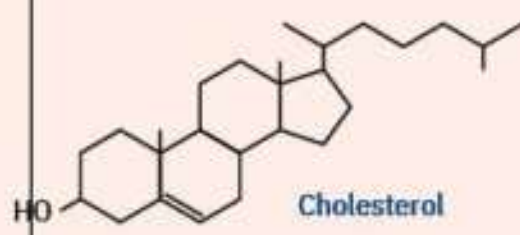
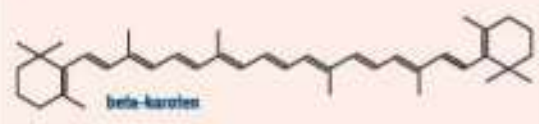
Budowa cząsteczki	• Składa się z dwóch atomów wodoru połączonych wiązaniem kowalencyjnym z atomem tlenu. • Jest dipolem. • Może tworzyć wiązania wodorowe między sobą i innymi cząsteczkami.
--------------------------	--

Cechy wody	Znaczenie biologiczne
Jest uniwersalnym rozpuszczalnikiem.	• Stanowi środowisko reakcji biochemicznych w komórce. • Jest dobrym rozpuszczalnikiem dla wielu substancji polarnych. • To podstawowa substancja transportująca związki odżywcze, produkty przemiany materii, hormony, enzymy, witaminy.
W temperaturze pokojowej jest cieczą.	• Stanowi środowisko życia dla organizmów wodnych. • Jest podstawowym składnikiem cytozolu komórki. • Odpowiada za wymiary i kształt komórek. • Warunkuje turgor – jędrność komórki.
Jest bezbarwna i przezroczysta.	• Umożliwia swobodne przenikanie światła słonecznego w głąb zbiorników i zachodzenie fotosyntezy.
Ma duże napięcie powierzchniowe.	• Umożliwia utrzymanie się na powierzchni wody lekkich i małych organizmów, np. nartników.
Ma zdolność do kohezji.	• Umożliwia nieprzerwany transport wody i soli mineralnych w naczyniach roślin wbrew działaniu sił grawitacji.
Ma zdolność do adhezji.	• Umożliwia przyleganie wody do różnych substancji, np. do grudek gleby. • Umożliwia transport wody i soli mineralnych w naczyniach roślin na duże wysokości.
Ma zdolność do asocjacji.	• Umożliwia w stanie ciekłym lub stałym łączenie się cząsteczek wody w uporządkowane zespoły dzięki elektrostatycznemu przyciąganiu dipoli wodnych.
W stanie stałym ma mniejszą gęstość niż w stanie ciekłym.	• Warstwa lodu izoluje głębsze warstwy wody od zamarzania, co umożliwia przeżycie organizmom wodnym podczas zimy.
Ma wysokie ciepło parowania.	• Uczestniczy w mechanizmie termoregulacji, chroniąc organizm przed przegrzaniem (usuwanie nadmiaru ciepła u niektórych ssaków w procesie pocenia się, u roślin podczas transpiracji).
Ma duże ciepło właściwe.	• Wpływa na klimat ziemi, zmniejszając wahania temperatury w dużych zbiornikach wodnych. • Modyfikując termicznie środowisko, zapewnia stabilne warunki do życia organizmów.

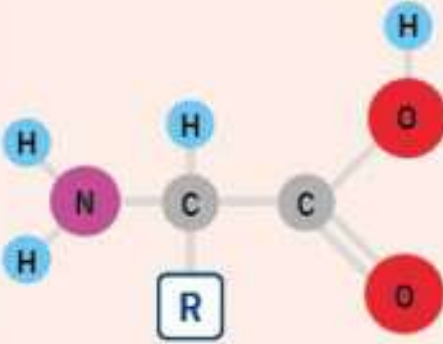
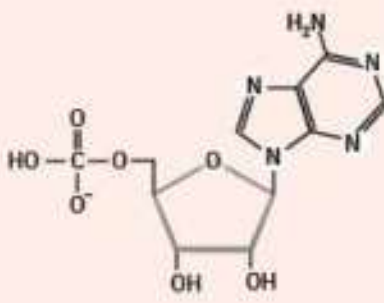
Cechy wody	Znaczenie biologiczne
Tworzy środowisko o większej gęstości niż powietrze.	• Zapobiega opadaniu planktonu na dno zbiornika. • Pozwala organizmom wodnym, pomimo działania siły grawitacji, na osiągnięcie olbrzymich rozmiarów (np. płetwal błękitny). • Dobrze przewodzi dźwięki, dlatego ryby nie mają kosteczek słuchowych i ucha zewnętrznego.
Bierze udział w reakcjach chemicznych.	• Jest substratem (np. fotoliza wody podczas fotosyntezy, hydroliza związków pokarmowych) i produktem (np. oddychanie wewnątrzkomórkowe tlenowe) biologicznie ważnych reakcji chemicznych.
Bierze udział w procesach rozmnażania i rozwoju organizmów.	• Przenosi gamety u mszaków, paprotników i niektórych protistów. • Stwarza środowisko życia dla rozwoju zarodkowego zwierząt.

Organiczne składniki komórki

Grupa związków i ich skład chemiczny	Budowa	Podział i przykłady	Funkcje
s. 45 ➤ Węglowodany (C, H, O)	Monosacharyd (cukier prosty) 	monosacharydy: glukoza, fruktoza, galaktoza, ryboza, deoksyryboza	źródło energii; paliwo komórkowe, monomer do budowy pozostałych węglowodanów
		disacharydy: sacharoza, laktoza, maltoza	formy transportowe cukrów; źródło cukrów prostych
		polisacharydy: skrobia, glikogen celuloza chityna	• magazynują glukozę jako źródło energii • buduje i wzmacnia ściany komórkowe roślin • buduje i wzmacnia szkielet zewnętrzny owadów

Grupa związków i ich skład chemiczny	Budowa	Podział i przykłady	Funkcje
Lipidy (tłuszcze) (C, O, H, N, P)	Tłuszcze proste 	triacyloglicerole: glicerol estryfikowany trzema resztami kwasów tłuszczowych	wydajne źródło energii
	Tłuszcze złożone 	fosfolipidy: glicerol estryfikowany dwiema resztami kwasów tłuszczowych oraz resztą kwasu fosforowego, do którego może być przyłączony alkohol	podstawowy składnik błon komórkowych (dwuwarstw lipidowych)
	Związki tłuszczopodobne – steroidy 	cholesterol: cztery połączone pierścienie z dodatkowymi grupami funkcyjnymi	składnik błon komórkowych, prekursor ważnych substancji aktywnych (hormonów, witamin)
	Związki tłuszczopodobne – karotenoidy 	pomarańczowe, żółte karoteny i ksantofile zbudowane z reszt izoprenu	biorą udział w fotosyntezie; są prekursorem witaminy A

s. 70 ▶

Grupa związków i ich skład chemiczny	Budowa	Podział i przykłady	Funkcje
Białka (C, H, O, N, S)	Aminokwasy 	• białka enzymatyczne (np. pepsyna) • białka strukturalne (np. kolagen) • białka zapasowe (np. owoalbumina) • białka transportujące (np. hemoglobina) • hormony (np. insulina) • białka receptorowe (np. receptor insuliny) • białka motoryczne (np. aktyna) • białka obronne (np. przeciwciała)	• katalizują reakcje chemiczne • pełnią funkcje podporowe • magazynują aminokwasy • transportują substancje • regulują czynności organizmu • odbierają bodźce • biorą udział w ruchu • chronią przed chorobami
Kwasy nukleinowe (C, H, O, N, P)	Nukleotydy 	DNA: cukier: deoksyryboza zasady azotowe: A, T, G, C reszta kwasu fosforowego – dwuniciowa helisa RNA: cukier: ryboza zasady azotowe: A, U, G, C reszta kwasu fosforowego – zazwyczaj jednoniciowe	zawiera całą informację genetyczną konieczną do syntezy wszystkich białek przenosi informacje o budowie białek i bierze udział w ich syntezie

BLOK ĆWICZENIOWY

1. (0–3 pkt)

Pierwiastki, które występują w żywych organizmach, dzielimy na makroelementy, mikroelementy i ultraelementy.

1.1. Przyporządkuj wymienione pierwiastki do odpowiednich kolumn. Przerysuj tabelę do zeszytu i ją uzupełnij.

C, H, O, N, P, S, Ca, Fe, F, J, Cu, Au, Ag, Se, Ni

Makroelementy	Mikroelementy	Ultraelementy
...	...	...

1.2. Wskaż pierwiastki biogenne wśród podanych w punkcie 1.1.

1.3. Podaj dwa objawy niedoboru żelaza (Fe) w diecie i omów ich znaczenie dla funkcjonowania organizmu człowieka i zwierząt.

2. (0–1 pkt)

Woda jest podstawowym składnikiem każdego żywego organizmu. Odznacza się szczególnymi właściwościami fizycznymi i chemicznymi umożliwiającymi życie na Ziemi.

Wyjaśnij, jak z brakiem wody radzą sobie zwierzęta żyjące w deficycie wody, np. na pustyniach.

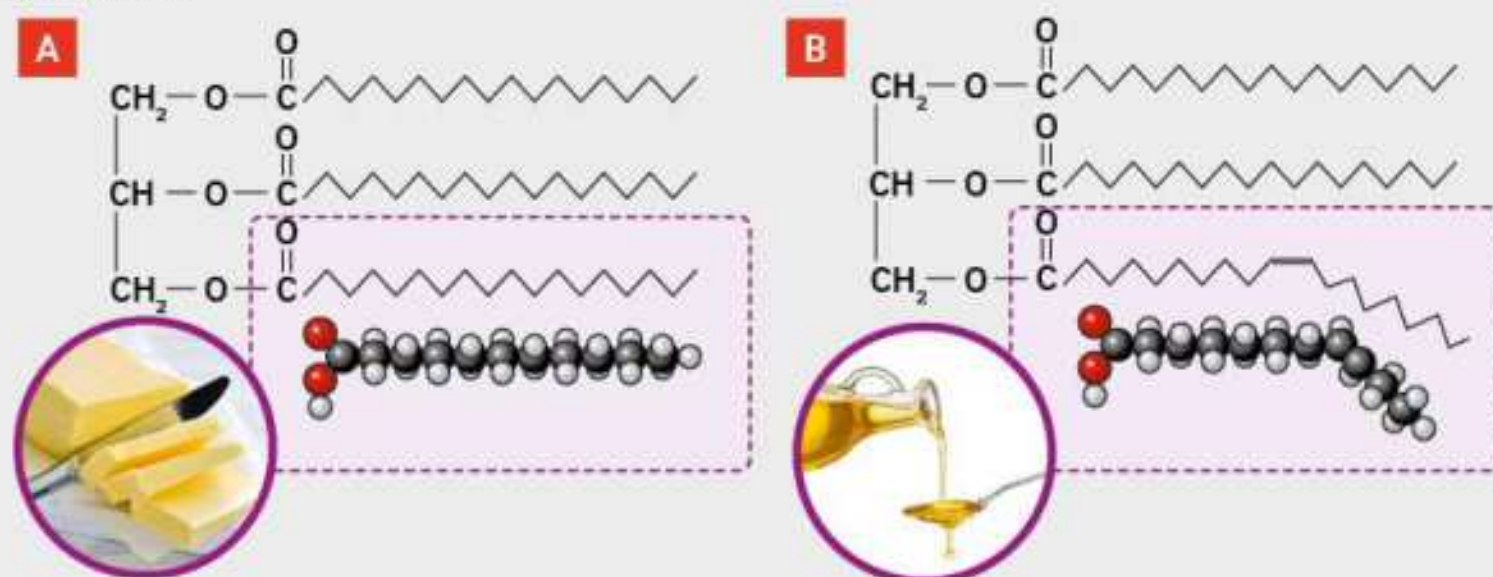
3. (0–1 pkt)

Jedną z właściwości wody jest zdolność do rozpuszczania substancji polarnych ważnych dla organizmów, np. jonów nieorganicznych czy związków złożonych z niepolarnych cząsteczek takich jak cukry.

Wyjaśnij na przykładzie rozpuszczania soli kuchennej (chlorek sodu NaCl) właściwości polarne wody.

4. (0–2 pkt)

Na rysunku przedstawiono strukturę triacylogliceroli wchodzących w skład tłuszczów roślinnych oraz zwierzęcych.



Na podstawie powyższych schematów odpowiedz na poniższe pytania:

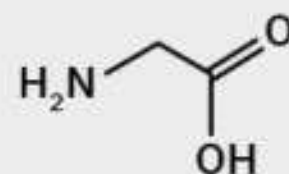
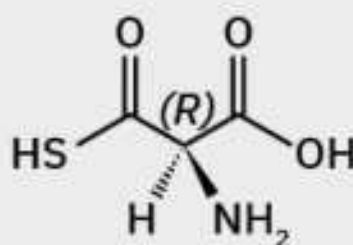
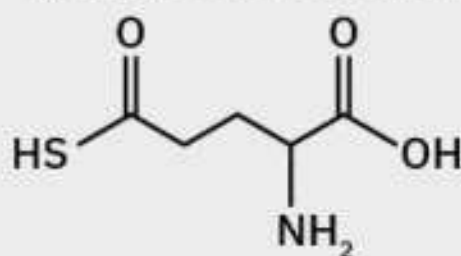
4.1. Który z powyższych związków jest składnikiem tłuszczów zwierzęcych, a który – roślinnych?

4.2. Co jest przyczyną różnego stanu skupienia tłuszczów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych?

5. (0–1 pkt)

Glutation to organiczny związek zbudowany z trzech aminokwasów połączonych wiązaniami peptydowymi. Glutation jest silnym antyoksydantem i chroni białka przed utlenieniem.

Mając do dyspozycji wzory aminokwasów, z których jest zbudowany glutation, narysuj w zeszycie jego wzór strukturalny.



6. (0–1 pkt)

Pewne laboratorium biochemiczne zostało poproszone o przeprowadzenie analizy kilku próbek śmietany, w związku z podejrzeniami o próby ich fałszowania mąką.

a) Sformułuj problem badawczy do tego eksperymentu.

b) Podaj, jakim sposobem można zidentyfikować obecność mąki w śmietanie. Odpowiedź zapisz w zeszycie.



III. Komórka – podstawowa jednostka życia

- ▶ Komórkowa budowa organizmów
- ▶ Porównanie komórki eukariotycznej i prokariotycznej
- ▶ Budowa i funkcje błon biologicznych
- ▶ Transport przez błony biologiczne
- ▶ Jądro komórkowe – centrum informacji komórki
- ▶ Cytoplazma – wewnętrzne środowisko komórki
- ▶ System wewnątrzkomórkowych błon plazmatycznych
- ▶ Organelle komórkowe otoczone dwiema błonami
- ▶ Organelle właściwe tylko dla niektórych typów komórek. Połączenia między komórkami

1. Komórkowa budowa organizmów

NA TEJ LEKCJI:

- przeanalizujesz komórkową budowę organizmów;
- poznasz organizację przestrzenną komórki.

komórka jako
jednostka
strukturalna

➤ Wszystkie organizmy żywe są zbudowane z komórek, czyli podstawowych **jednostek strukturalnych** zdolnych do wykonywania czynności życiowych (odżywiania, oddychania, wydalania, reakcji na bodźce, ruchu, wzrostu i rozwoju, przekazywania materiału genetycznego). **Teoria komórkowej budowy organizmów** została sformułowana w XIX wieku przez uczonych niemieckich Theodora Schwanna i Matthiasa Jacoba Schleidena (czytaj: teodora szwana i matiasa szlejdena). Komórka może stanowić odrębny organizm, np. jednokomórkowe bakterie, pierwotniaki czy grzyby. Spełnia wówczas wszystkie niezbędne do życia funkcje.

W organizmach roślin i zwierząt komórki łączą się w funkcjonalne struktury, które tworzą tkanki. Komórki wchodzące w skład tkanek różnią się kształtem, wielkością, a także aktywnością. Różnice te są wyrazem przystosowania do pełnionych funkcji.

Pomimo różnej specjalizacji i złożoności budowy komórki mają wspólne dla siebie cechy: skład chemiczny, podstawowe procesy metaboliczne, mechanizmy syntezy białek oraz sposób zapisu, odczytywania i powielania informacji genetycznej. Nauka zajmująca się budową i funkcjonowaniem komórek to **cytologia**.

Organizacja przestrzenna komórki

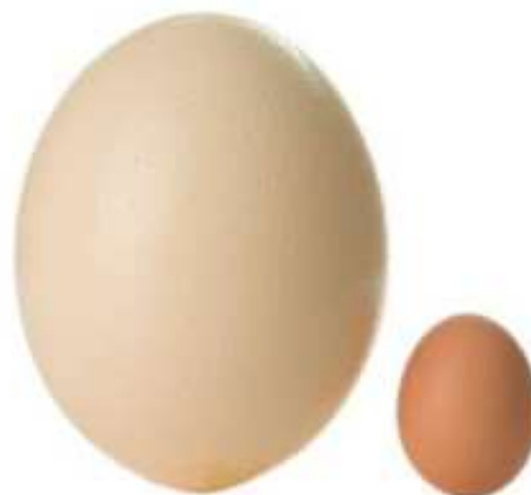
wielkość
komórek

➤ **Wielkość komórek** jest bardzo zróżnicowana. Większość komórek roślin i zwierząt ma wymiary mikroskopowe, które mieszczą się w przedziale od 10 μm do 100 μm . Jedną z największych komórek roślinnych są włókna dziko rosnącej w Chinach, Japonii i Indonezji ramii indyjskiej, które osiągają 50 cm długości (**ryc. III.1.1.**).

Do największych komórek zwierzęcych należą komórki jajowe ptaków i gadów. U strusia afrykańskiego, największego żyjącego współcześnie ptaka, komórka jajo-
wa osiąga średnicę około 30 cm (**ryc. III.1.2.**).



Ryc. III.1.1. Ramia indyjska (*Boehmeria nivea*; czytaj: bohmeria niwa).



Ryc. III.1.2. Porównanie wielkości jaja strusia (z lewej) z jajem kurzym (z prawej).

Głównym czynnikiem ograniczającym wielkość komórek jest **stosunek ich powierzchni do objętości** (ryc. III.1.3.).

stosunek
powierzchni
do objętości

Komórka dla prawidłowego funkcjonowania i utrzymania homeostazy musi pobierać substancje odżywcze z zewnątrz i usuwać produkty przemiany materii do przestrzeni pozakomórkowej. W miarę wzrostu komórki, szybciej rośnie jej objętość niż powierzchnia. Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ transport substancji między komórką a otoczeniem i jej wnętrzem staje się mniej wydajny, nie pokrywa zapotrzebowania na różne substancje. Malejąca w stosunku do objętości powierzchnia komórki oznacza również mniejszą ilość substancji dostarczonych do komórki, dlatego większość komórek ma wymiary mikroskopowe i kształt zbliżony do kuli lub sześcianu.



Ryc. III.1.3. Stosunek powierzchni do objętości różnej wielkości komórek.

Im większa będzie powierzchnia komórki, tym więcej cząsteczek będzie dyfundować przez błonę do komórki lub więcej produktów przemiany materii zostanie wydanych. Dlatego w małych komórkach sprawniej przebiegają procesy przemiany materii.

Nie wszystkie komórki mają kształt kuli lub sześcianu. Kształt i wielkość komórki są związane z wykonywaną przez nią **funkcją**. Często duże komórki roślinne, aby skutecznie zwiększyć swoją powierzchnię, stają się długie i cienkie. Inne w tym celu wykształcają liczne uwypuklenia, np. komórki nabłonka jelita cienkiego mają mikrokosmki, które zwiększają powierzchnię wchłaniania substancji pokarmowych (ryc. III.1.4.).

funkcja
komórek



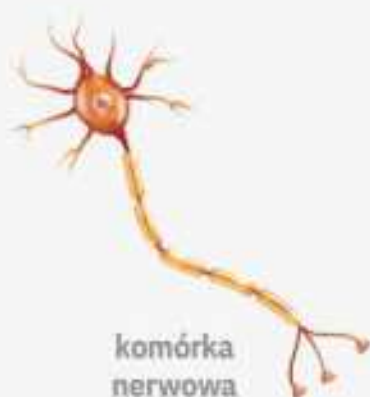
Ryc. III.1.4. Mikrofotografia mikrokosmków jelitowych w jelicie cienkim człowieka.

Erytrocytom ssaków korzystny stosunek powierzchni do objętości zapewnia ich kształt – dwuwklęsłych dysków. Umożliwia to sprawną wymianę gazową tlenu i dwutlenku węgla przez błonę erytrocytu.

Niektóre komórki, np. plemniki, mają wici, które służą im do lokomocji. Natomiast w komórkach nerwowych długie, cienkie wypustki, które u człowieka mogą osiągać długość 1 m, służą do przekazywania impulsów nerwowych. Niektóre komórki podczas ruchu zmieniają kształt, np. komórki układu odpornościowego – makrofagi. Kształt komórek jest często związany z oddziaływaniem komórek sąsiednich, np. stopień spłaszczenia komórek nabłonka zależy od ucisku sąsiadujących narządów.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij przyczyny różnic w rozmiarach i kształtach komórek.
2. Korzystny stosunek powierzchni do objętości gwarantuje wydajny transport substancji i wymianę składników z otoczeniem. W kontekście tej zależności uzasadnij, dlaczego większość komórek ma wymiary mikroskopowe.
3. Wytłumacz, dlaczego komórki roślinne, zwierzęce i grzybowe są 10-krotnie mniejsze od komórek bakteryjnych.
4. Komórka jest podstawową jednostką strukturalną i funkcjonalną organizmu. Wielkość i kształt komórek są różne i wynikają z pełnionych funkcji. Na rysunkach przedstawiono trzy komórki różniące się kształtem.



Przedstaw, na czym polega adaptacja kształtu komórek do pełnienia określonych funkcji.

5. Wielkość komórek jest uwarunkowana ich metabolizmem. Dyfuzja (proces polegający na rozprzestrzenianiu i mieszaniu się drobin różnych substancji w wyniku ruchu cząstek) odbywa się na całej jej powierzchni.
 - 5.1. Wyjaśnij, dlaczego w małych komórkach dyfuzja substancji przez błonę komórkową przebiega efektywniej niż w dużych komórkach.
 - 5.2. Porównaj dyfuzję substancji dwóch przedstawionych organizmów.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Komórka jest podstawową **jednostką strukturalną** i funkcjonalną organizmu. ◀ s. 100
- **Wielkość komórek** jest ograniczona stosunkiem powierzchni komórki do jej objętości. ◀ s. 100
- **Niewielkie rozmiary komórek** oraz kształt sześcienny i kulisty umożliwiają wydajny transport substancji do komórki oraz między komórką i otoczeniem. ◀ s. 101
- Wielkość i kształt komórek są związane z jej **funkcją**. ◀ s. 101

2. Porównanie komórki eukariotycznej i prokariotycznej

NA TEJ LEKCJI

- porównasz komórkę prokariotyczną i eukariotyczną.

Istnieją dwa podstawowe typy komórek – prokariotyczne i eukariotyczne. **Kryterium podziału** jest obecność lub brak jądra komórkowego. Komórki, które nie mają jądra komórkowego, nazywamy prokariotycznymi (bezejądrowymi), a komórki z jądrem komórkowym – eukariotycznymi (jądrowymi). Komórkami prokariotycznymi są bakterie (*Bacteria*; czytaj: bakteria) i archeowce (*Archaea*; czytaj: archea). Komórki pozostałych organizmów są eukariotyczne (protista, rośliny, zwierzęta i grzyby).

◀ kryterium podziału komórek

Komórki prokariotyczne, wyraźnie mniejsze od komórek eukariotycznych, mają wymiary rzędu kilku mikrometrów (μm , $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Wielkość komórek eukariotycznych jest około 10-krotnie większa od komórek prokariotycznych i wynosi zazwyczaj od kilkunastu do kilkudziesięciu mikrometrów.

Komórka prokariotyczna

◀ komórka prokariotyczna

W komórkach prokariotycznych funkcję jądra komórkowego pełni **nukleoid**. To kolistą cząsteczka DNA (**genofo**r, **inaczej chromosom bakteryjny**) znajdująca się na nieotoczonym błoną obszarze cytoplazmy wypełniającej wnętrze komórki. W cytoplazmie są także **rybosomy** oraz małe koliste cząsteczki DNA – **plazmidy**. Bakterie samożywne zawierają tylakoidy – spłaszczone pęcherzyki z barwnikami biorącymi udział w fotosyntezie. W komórkach prokariotycznych nie występują organelle otoczone błoną. Całą komórkę prokariotyczną otacza na zewnątrz **błona komórkowa**. Od środowiska zewnętrznego większość komórek oddziela **ściana komórkowa**, której głównym składnikiem jest **mureina**, związek białkowo-cukrowy. Niektóre komórki prokariotyczne wytwarzają śluzowe otoczki oraz ułatwiające lokomocję rzęski. Organizmy prokariotyczne są pojedynczymi komórkami, w których zachodzą wszystkie czynności życiowe (**ryc. III.2.2.**).

► **Komórka eukariotyczna**

Wszystkie komórki eukariotyczne mają obłonione organelle komórkowe, do których należy przede wszystkim **jądro komórkowe**. Wnętrze komórki eukariotycznej poza jądrem komórkowym wypełnia **cytoplasma**. W cytoplasmie poza płynnym **cytozolem** znajdują się wyspecjalizowane organelle komórkowe odpowiedzialne za czynności życiowe komórki: **mitochondria**, **siateczka śródplazmatyczna**, **rybosomy**, **aparaty Golgiego**. Wewnątrz komórki eukariotycznej występuje rusztowanie – **cytoszkielet**, który utrzymuje kształt komórki i odpowiada za transport wewnątrzkomórkowy.

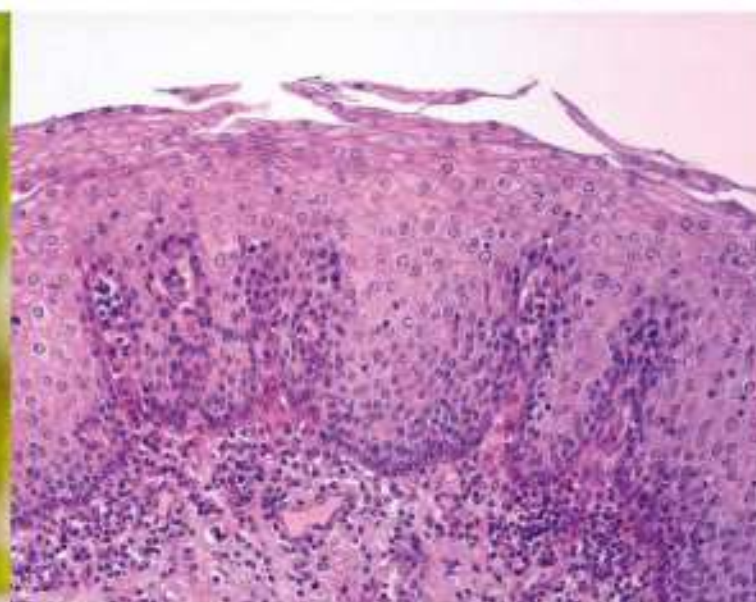
charakterystyczne
organelle
komórkowe

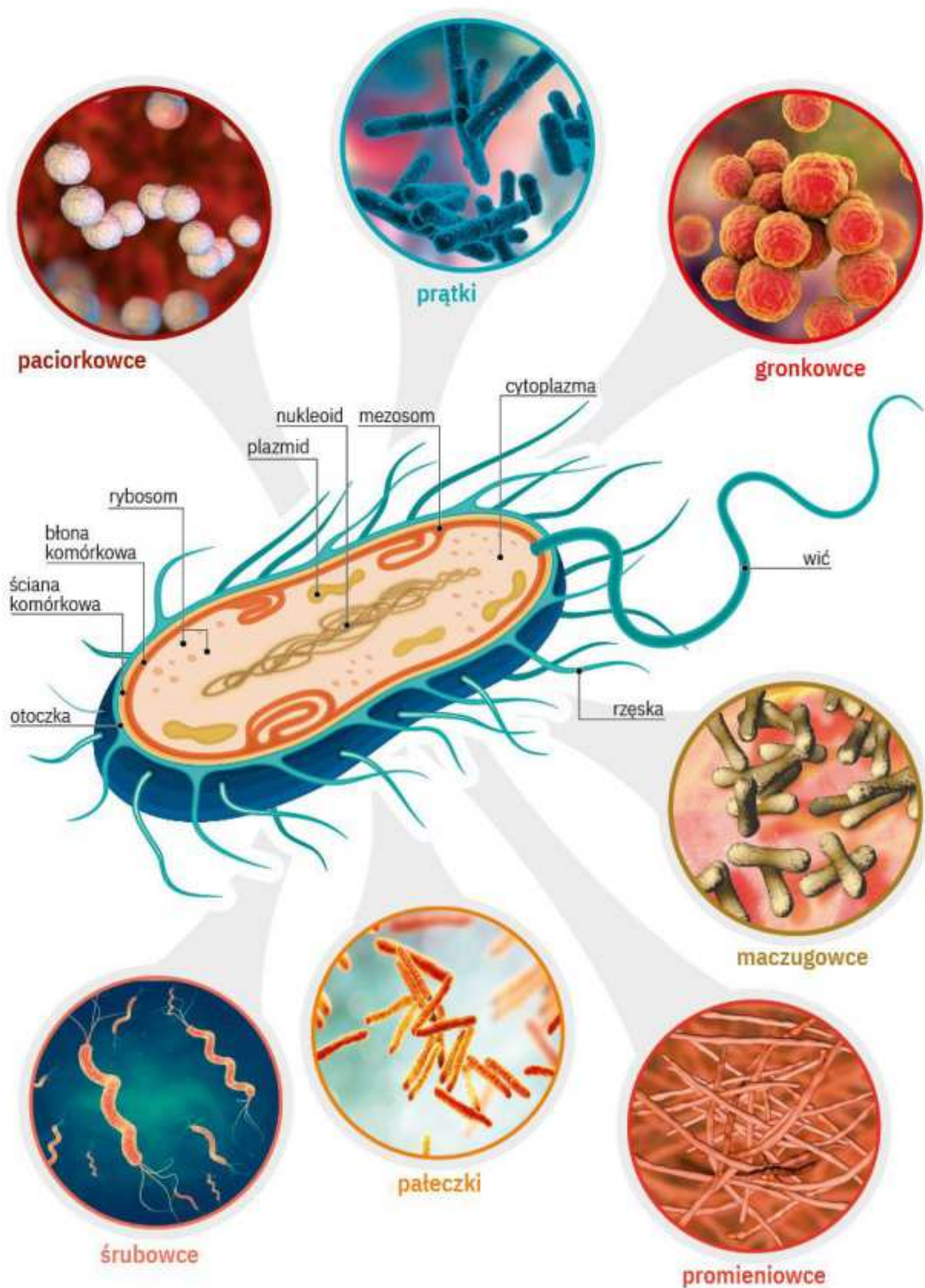
► Niektóre organelle, np. **chloroplasty**, w których zachodzi proces fotosyntezy, są charakterystyczne tylko dla komórek roślin lub niektórych protistów, a **lizosomy** dla zwierząt. W komórkach roślin i grzybów występuje **wakuola**, a jej odpowiednikiem u protistów są **wodniczki** (tętniące lub pokarmowe).

Każdą komórkę eukariotyczną od środowiska pozakomórkowego oddziela **błona komórkowa**, a w komórkach roślin, grzybów i niektórych protistów na zewnątrz błony dodatkowo **ściana komórkowa**. Ściana komórkowa roślin i niektórych protistów składa się głównie z celulozy, a u grzybów – z chityny (**ryc. III.2.3.**).

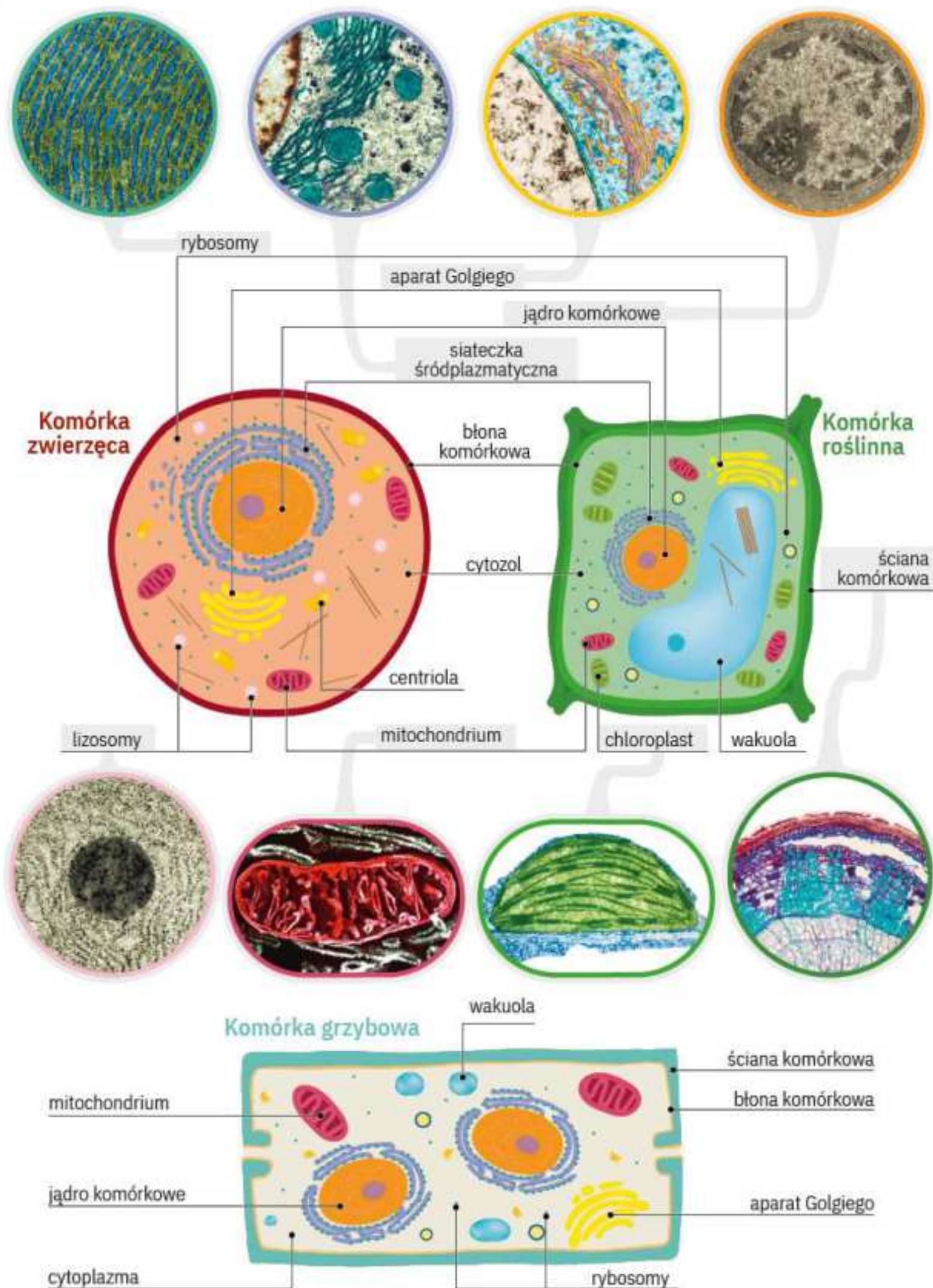
 Obserwacja**Obserwacja różnych kształtów i rozmiarów komórek**

Samodzielnie przygotuj preparaty mikroskopowe, np. z liścia moczarki kanadyjskiej czy skórki liścia spichrzowego cebuli. Skorzystaj także z preparatów trwałych tkanek roślinnych i zwierzęcych (np. tkanka nabłonkowa i mięśniowa) dostępnych w pracowni biologicznej. Dokonaj w tabeli porównania rozmiarów i kształtów obserwowanych komórek. W zeszycie wykonaj rysunki i opisz je oraz wyciągnij wnioski.

Komórki skórki liścia moczarki kanadyjskiej**Komórki nabłonka wielowarstwowego płaskiego****Ryc. III.2.1. Różne typy komórek** widziane pod mikroskopem optycznym.



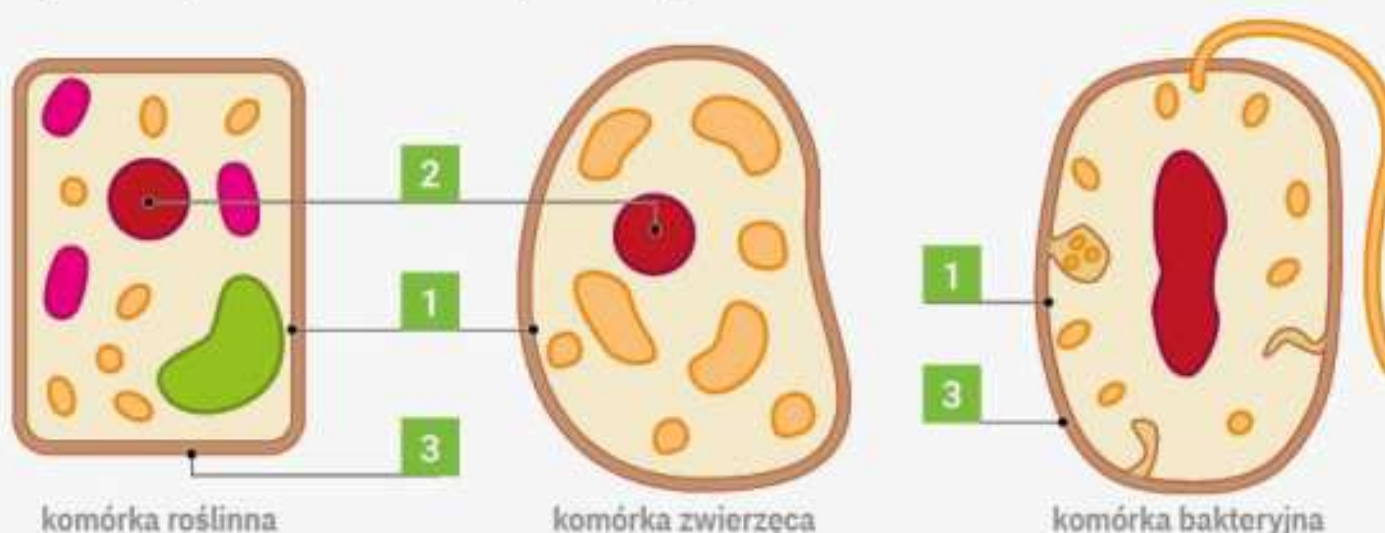
Ryc. III.2.2. Schemat komórki prokariotycznej oraz przykłady form morfologicznych bakterii.



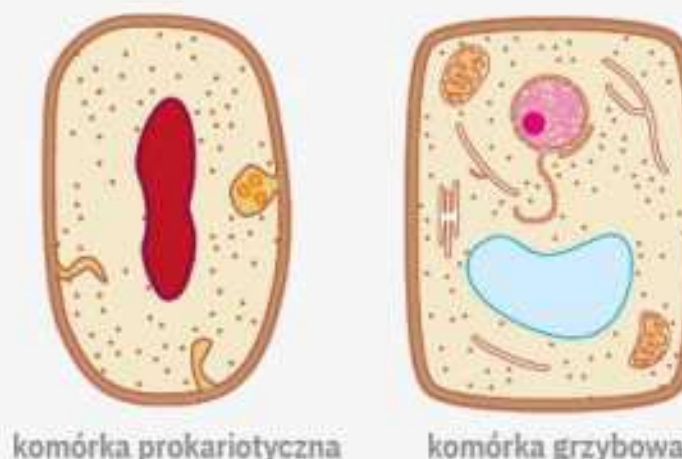
Ryc. III.2.3. Ogólny schemat trzech podstawowych typów komórek eukariotycznych.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Na podstawie podręcznika i innych źródeł wiedzy porównaj budowę komórki prokariotycznej i eukariotycznej. Zaproponuj sposób zestawienia zgromadzonych różnic.
2. Korzystając z literatury, wyjaśnij różnice między chromosomem bakteryjnym a chromosomem eukariotycznym.
3. Na rysunkach przedstawiono schematy trzech typów komórek.



- 3.1. Nazwij struktury oznaczone cyframi 1–3. Wskaż po jednej funkcji.
- 3.2. Podaj kryterium podziału komórek na komórki prokariotyczne i eukariotyczne.
- 3.3. Wymień struktury różniące komórkę roślinną od zwierzęcej.
4. Na rysunkach przedstawiono komórkę prokariotyczną i grzybową.
 - 4.1. Wskaż różnice w budowie ściany komórkowej komórek bakterii i grzybów.
 - 4.2. Podaj cztery cechy wspólne budowy komórek bakterii i grzybów.
 - 4.3. Wyjaśnij, dlaczego grzyby są zaliczane do organizmów eukariotycznych.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Komórki dzielimy na prokariotyczne i eukariotyczne.** ◀ s. 103
- **Komórki prokariotyczne** (bakterie, archeowce) nie mają jądra komórkowego, a jego funkcję pełni nukleoid, poza tym zawierają cytoplazmę, rybosomy. Są otoczone błoną i ścianą komórkową o specyficznym składzie chemicznym. ◀ s. 103
- **Komórki eukariotyczne** (protista, rośliny, zwierzęta i grzyby) mają jądro komórkowe otoczone dwoma błonami. Ich budowa jest złożona. Oprócz jądra zawierają cytoplazmę, rybosomy, mitochondria, lizosomy, cytoszkielet i liczne struktury otoczone błoną. ◀ s. 104
- Komórki roślin, grzybów i niektórych protistów mają dodatkowo ścianę komórkową, a komórki roślin i niektórych protistów – **chloroplasty**. ◀ s. 104

3. Budowa i funkcje błon biologicznych

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz budowę i funkcje błon biologicznych;
- dowiesz się, jakie właściwości mają błony plazmatyczne.

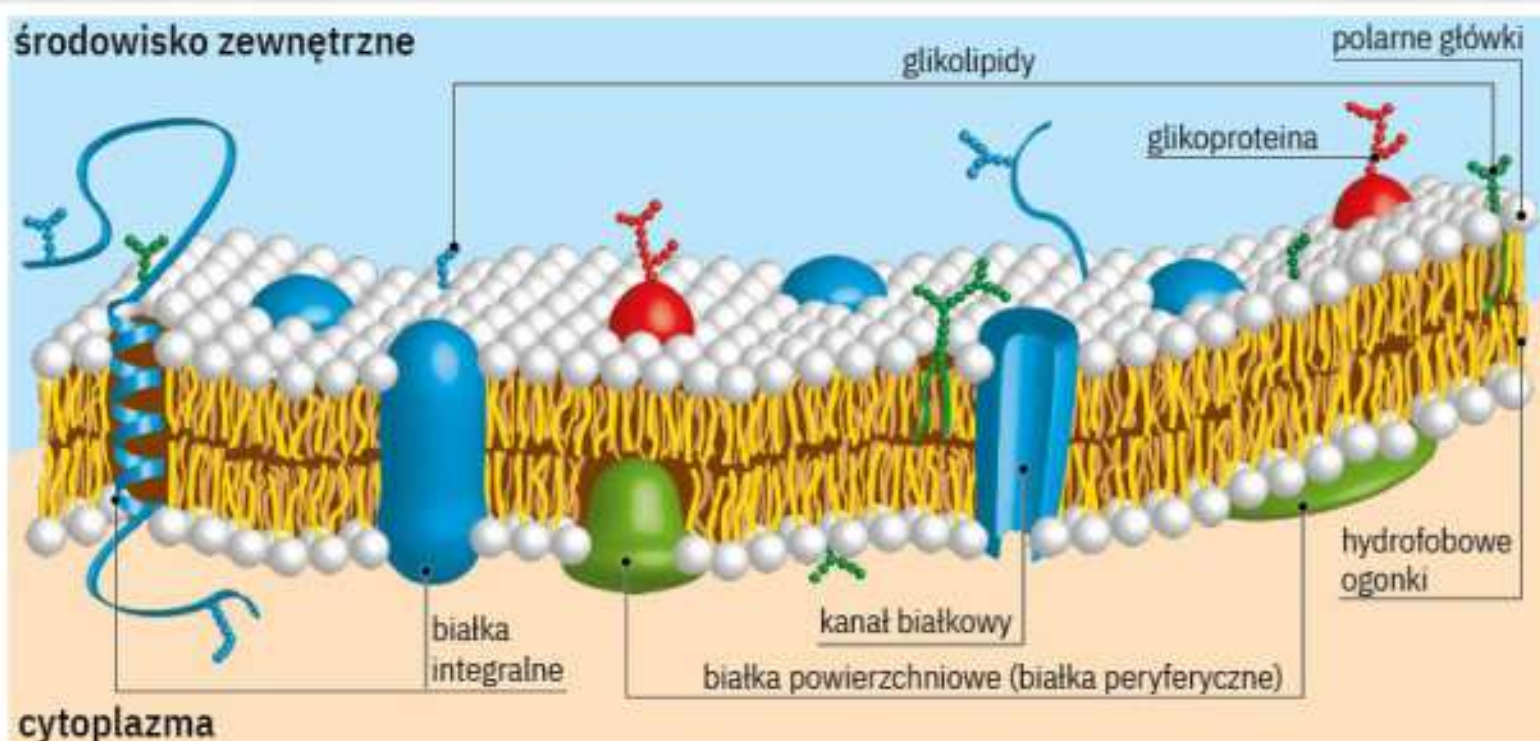
błony
biologiczne

► **Błony biologiczne** występują we wszystkich komórkach. Komórki prokariotyczne mają jedną błonę komórkową, która oddziela i jednocześnie zapewnia kontakt komórki ze środowiskiem. W komórkach eukariotycznych poza błoną komórkową znajduje się system błon śródplazmatycznych, które dzielą wewnątrz komórki na wewnątrzkomórkowe przedziały o zróżnicowanych funkcjach.

Budowa błon biologicznych

Wszystkie błony biologiczne mają ten sam schemat budowy (**ryc. III.3.1.**). Składają się z dwóch warstw lipidów oraz białek. Udział i ułożenie tych składników mogą być różne w różnych rodzajach komórek.

Grubość błony komórkowej wynosi zaledwie 7 nm (7–10 nm; 1 nm = 10^{-9} m). Lipidy występujące w błonach to: fosfolipidy, glikolipidy, steroidy (głównie cholesterol w komórkach zwierząt, brak go u roślin, grzybów i bakterii, w których błonach mogą występować inne lipidy izoprenowe). Częsteczki fosfolipidów, które stanowią podstawę struktury błony, mają dwa bieguny: hydrofobowy (ogony kwasów tłuszczowych), unikający kontaktu z wodą, i hydrofilowy (główki), swobodnie oddziaływający z wodą. Taka budowa wymusza utworzenie dwuwarstwy, w której fosfolipidy hydrofobowymi „ogonkami” są zwrócone do siebie, a hydrofilowymi „główkami” – na zewnątrz, w stronę cytoplazmy.



Ryc. III.3.1. Model przestrzenny budowy błony komórkowej.

Drugim po lipidach składnikiem błony komórkowej są nieregularnie rozmieszczone białka błonowe. W zależności od sposobu rozmieszczenia i związania z dwuwarstwą lipidową dzielą się na integralne i powierzchniowe.

Białka integralne są trwale związane z dwuwarstwą lipidową i mogą przenikać raz lub kilkakrotnie przez całą grubość błony (transbłonowe w postaci α -helisy), wystając po obu jej stronach lub tylko zakotwicząc przy jej powierzchni (za pomocą wiązań kowalencyjnych). Wynika to z budowy łańcucha polipeptydowego, który ma na jednym końcu rejony hydrofobowe, co pozwala na wnikięcie tylko częściowe białka w dwuwarstwę lipidową. Natomiast białka transbłonowe mają dwa rejony hydrofilowe, które wystają z cząsteczki i środek hydrofobowy kontaktujący się z ogonami fosfolipidów (**ryc. III.3.2.**).

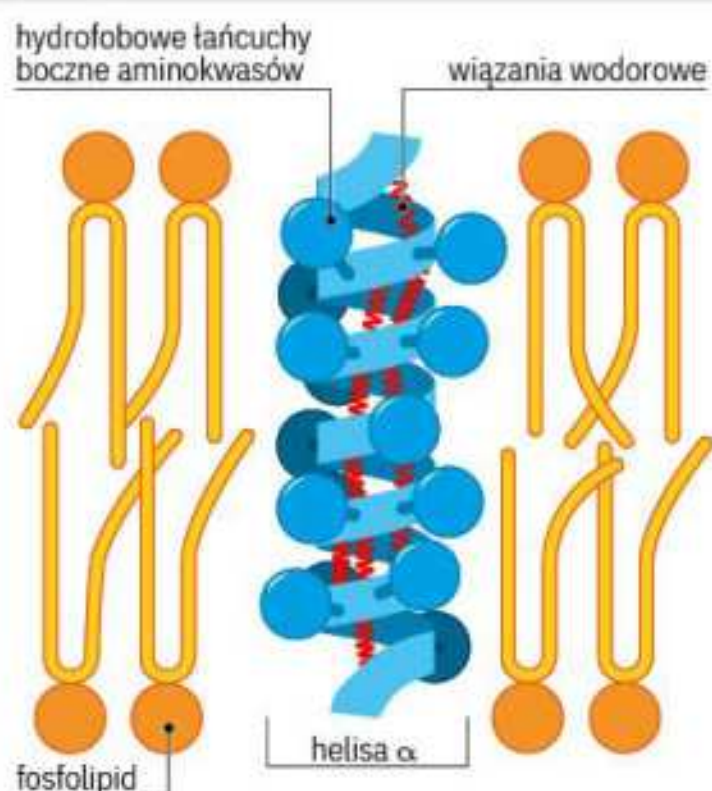
Białka powierzchniowe (peryferyczne) nie wnikają do dwuwarstwy lipidowej, leżą one na wewnętrznej lub zewnętrznej powierzchni błony. Można je łatwo usunąć, nie uszkadzając błony. Są one luźno związane wiązaniami niekowalencyjnymi z fragmentami białek integralnych.

Białka błonowe odpowiadają za szereg istotnych funkcji:

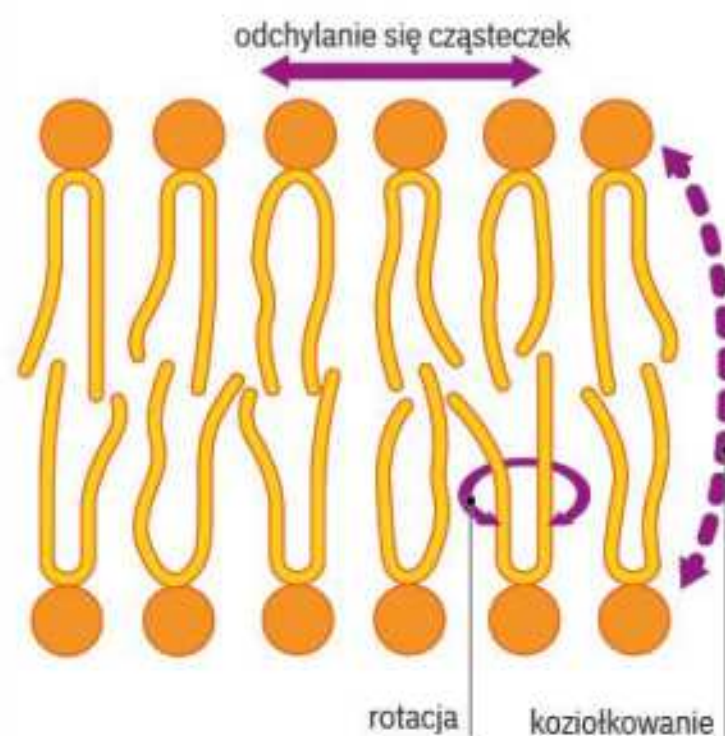
- uczestniczą w transporcie cząsteczek i jonów, tworząc kanały błonowe, np. dla sodu i potasu pompa sodowo-potasowa;
- wzmacniają błonę i chronią ją przed czynnikami mechanicznymi;
- są receptorami komórkowymi uczestniczącymi w przekazywaniu informacji między komórkami, np. receptory hormonów białkowych;
- uczestniczą w rozpoznawaniu się komórek i ciał obcych;
- niektóre pełnią funkcję enzymów katalizujących reakcje zachodzące blisko powierzchni komórki.

Właściwości błon plazmatycznych

Właściwości błon plazmatycznych wynikają z ich budowy. **Płynność błony** jest wynikiem przemieszczania się fosfolipidów w obrębie dwuwarstwy lipidowej (**ryc. III.3.3.**). Szybki ruch fosfoli-



Ryc. III.3.2. Schemat budowy białka transbłonowego.



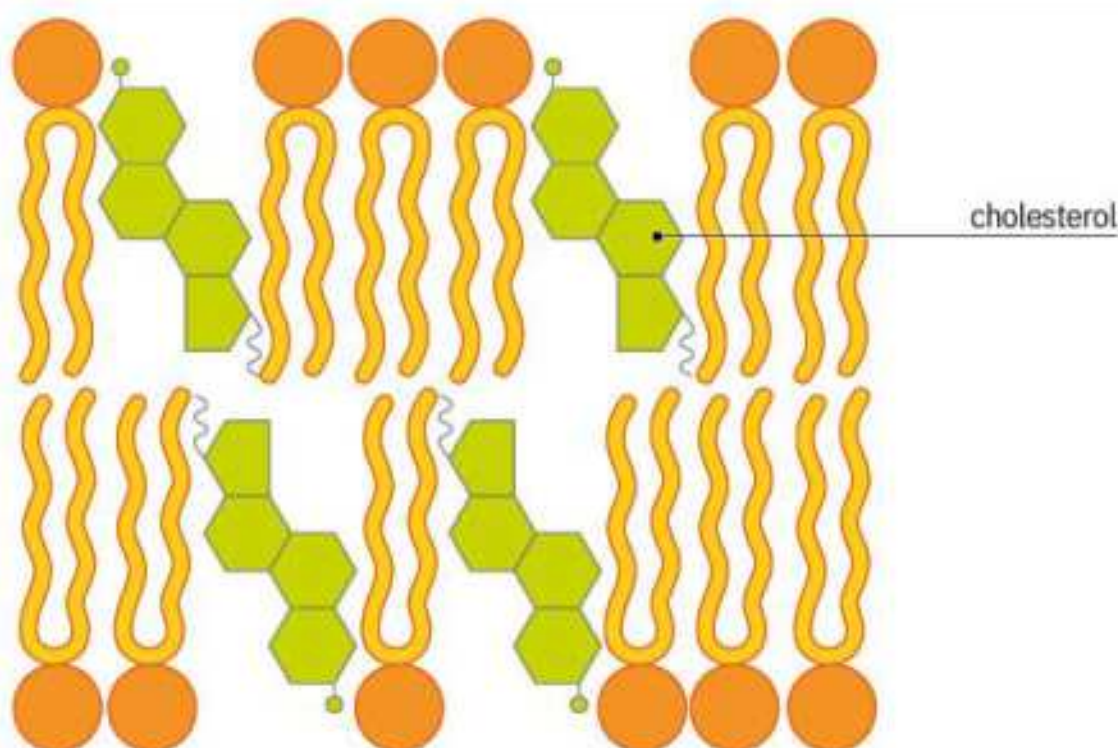
Ryc. III.3.3. Sposoby przemieszczania się lipidów.

pidów w obrębie jednej warstwy może być obrotowy wokół własnej osi lub na boki. Stosunkowo rzadziej i bardzo wolno mogą się przemieszczać fosfolipidy z jednej warstwy do drugiej, wykonując ruch koziołkowy.

model
płynnej mozaiki

Im krótsze są ogony węglowodorowe fosfolipidów, tym swobodniej się one przemieszczają i w konsekwencji błona komórkowa jest bardziej płynna. Na płynność błony ma także wpływ liczba podwójnych wiązań w łańcuchu węglowodorowym – mniejsza ich liczba zwiększa płynność błony. Ruch fosfolipidów powoduje przemieszczanie się białek błonowych. Taki model budowy błony komórkowej nazywamy **modelem płynnej mozaiki** (mozaika – białka nieregularnie rozmieszczone, płynna – fosfolipidy i białka w ciągłym ruchu).

Płynność błony w komórkach zwierzęcych jest regulowana przez cholesterol. Jego cząsteczki są krótkie i dość sztywne, łatwo wypełniają wolne przestrzenie przy zagięciach ogonów fosfolipidów, co usztywnia błonę, zmniejszając jej płynność i przepuszczalność (**ryc. III.3.4.**).



Ryc. III.3.4. Cholesterol jest ważnym składnikiem błon komórek zwierzęcych. Ilość cholesterolu jest związana z ich funkcją. Przykładem komórek o dużej zawartości cholesterolu w błonie komórkowej są erytrocyty – cholesterol stanowi do 28% masy lipidów budujących błonę.

asymetryczność
błony

Błona komórkowa jest asymetryczna. **Asymetria błony** wynika z własnego zestawu lipidów i białek każdej z warstw.

Na zewnętrznej powierzchni błony komórek zwierzęcych znajdują się glikolipidy, a białka tej części są połączone z łańcuchami oligosacharydów (glikoproteiny). Tworzy to cienką warstwę zwaną glikokaliksem. **Glikokaliks** chroni powierzchnię komórki przed uszkodzeniami mechanicznymi i chemicznymi oraz uczestniczy w rozpoznawaniu komórek przez układ odpornościowy.

półprzepuszczal-
ność błony

Błona komórkowa **jest selektywnie przepuszczalna (półprzepuszczalna)**, czyli reguluje przepływ cząsteczek tak pod względem rodzaju, jak i ilości. Łatwo przeni-

kają gazy (np. O_2 , N_2 , CO_2) oraz małe nienaładowane cząsteczki polarne, np. etanol. Z trudem przez błonę dyfunduje woda oraz dwukrotnie większy od etanolu glicerol. Żadnej możliwości przejścia przez dwuwarstwę lipidową nie mają jony o dużych rozmiarach oraz większe cząsteczki polarne bez ładunku, takie jak glukoza, nukleotydy czy aminokwasy. Ich transport wymaga obecności białek błonowych.

Błony komórkowe nigdy nie są syntetyzowane od nowa i nie tracą swojej ciągłości. Komórka odtwarza utraconą część błony poprzez rozbudowanie już istniejących.

Eksperyment



Badanie selektywnej przepuszczalności błony komórkowej

Wprowadzenie: Błony biologiczne są selektywnie przepuszczalne, czyli przepuszczalne dla jednych substancji, a nieprzepuszczalne dla innych. Przez błony biologiczne łatwo przechodzą małe cząsteczki i substancje rozpuszczalne w lipidach.

Problem badawczy: Czy błona komórkowa jest selektywnie przepuszczalna?

Hipoteza badawcza: Błona komórkowa jest selektywnie przepuszczalna.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: Przygotowanie próby kontrolnej i badawczej.

Próba badawcza – wąski cylinder z roztworem glukozy, zamknięty błoną i umieszczony w szerokim cylindrze z wodą.

Do szerokiego cylindra należy wlać wodę. Następnie do wąskiego cylindra wlewamy roztwór glukozy i sprawdzamy za pomocą pasków do glukometru stężenie glukozy w obu naczyniach. Wylot wąskiego cylindra zamykamy błoną selektywnie przepuszczalną (można użyć pęcherza wieprzowego lub celofanu – folii stosowanej jako opakowanie), odwracamy błonę do dołu i zaznaczamy poziom roztworu w wąskim cylindrze a następnie zanurzamy go w wodzie w szerokim cylindrze. Zaznaczamy poziom wody w szerokim cylindrze. Po upływie kilkunastu godzin sprawdzamy poziom cieczy oraz stężenie glukozy w obu naczyniach.

Próba kontrolna – wąski cylinder z wodą zamknięty błoną i umieszczony w szerokim cylindrze z wodą.

Próbie kontrolną przeprowadzamy podobnie jak badawczą.

Opracowanie wyników: Opisz zmianę poziomu cieczy oraz stężenia glukozy w obu naczyniach w próbie badawczej i kontrolnej po upływie kilkunastu godzin.

W próbie badawczej poziom cieczy w cylindrze szerszym obniżył się, a w wąskim cylindrze się zwiększył. Nie stwierdzono obecności glukozy w szerokim cylindrze natomiast w wąskim cylindrze stężenie glukozy zmniejszyło się. W próbie kontrolnej poziom cieczy jak i stężenie glukozy pozostało bez zmian.

Wnioski: Sformułuj wniosek.

Wyjaśnienie: Zastosowana błona ma właściwości błony selektywnie przepuszczalnej. Rozpuszczalnik (woda) przemieścił się z roztworu o niższym stężeniu do roztworu o wyższym stężeniu substancji osmotycznie czynnej – glukozy na drodze osmozy. W efekcie tego poziom cieczy w cylindrze wąskim się podniósł. Układ dąży do wyrównania stężeń po obu stronach błony.

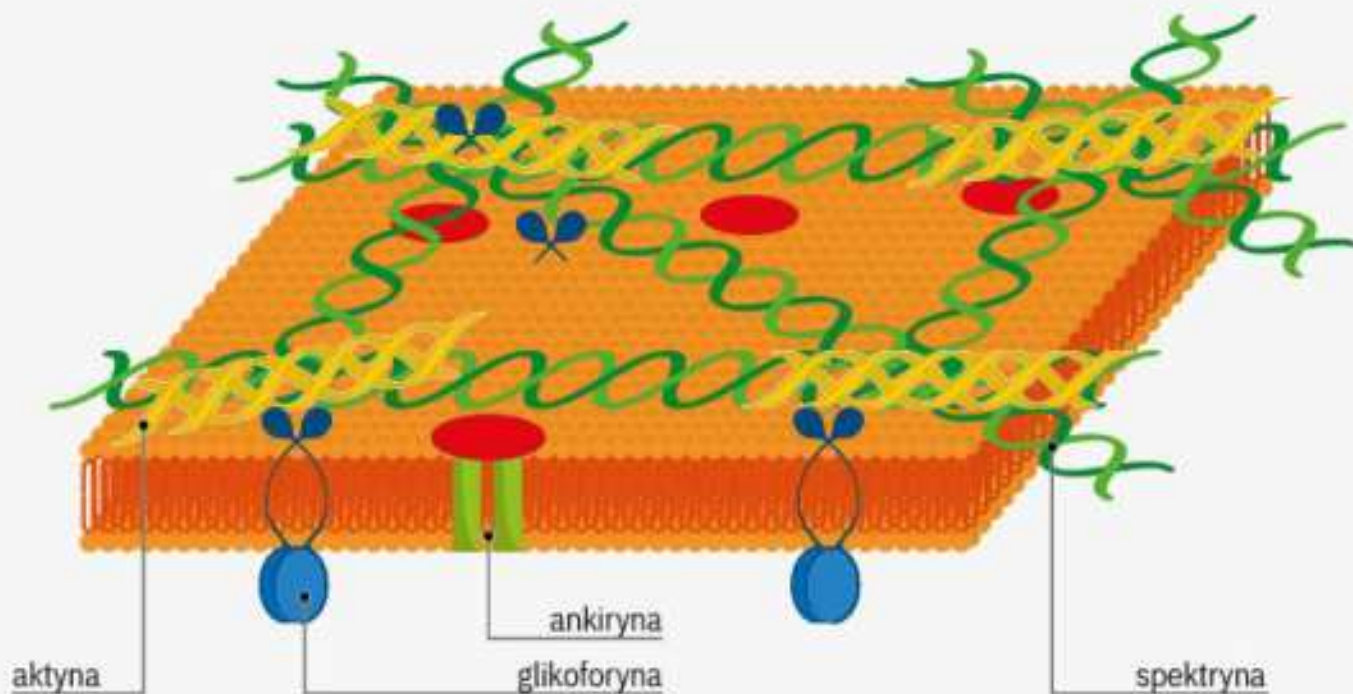
Wykorzystując różne źródła informacji, wyjaśnij: Jakie są różnice między substancjami osmotycznie czynnymi a osmotycznie biernymi?

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego takie cząsteczki jak glukoza czy aminokwasy do transportu przez błonę wymagają białek transportujących.
2. Na podstawie schematu budowy błony komórkowej przedstaw, w jaki sposób białka błonowe łączą się z dwuwarstwą lipidową. Omów ich funkcje.
3. Przybłonowa część cytoszkieletu erytrocytów człowieka ma względnie prostą i regularną strukturę i jest także najlepiej poznanym przykładem kory komórki. Komórki erytrocytów są małe i mają wyróżniający je kształt wklęsniętych krążków. Głównym składnikiem ich kory jest białko spektryna, mające kształt wydłużonych, cienkich i giętkich pręcików o długości około 100 nm. Spektryna tworzy sieć stanowiącą podporę dla błony komórkowej i utrzymującą kształt komórki. Sieć spektrynowa jest połączona z błoną poprzez wewnątrzkomórkowe białka łączące, które wiążą spektrynę z określonymi białkami transbłonowymi.

B. Alberts i in., *Podstawy biologii komórki*. cz. 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 380–381.

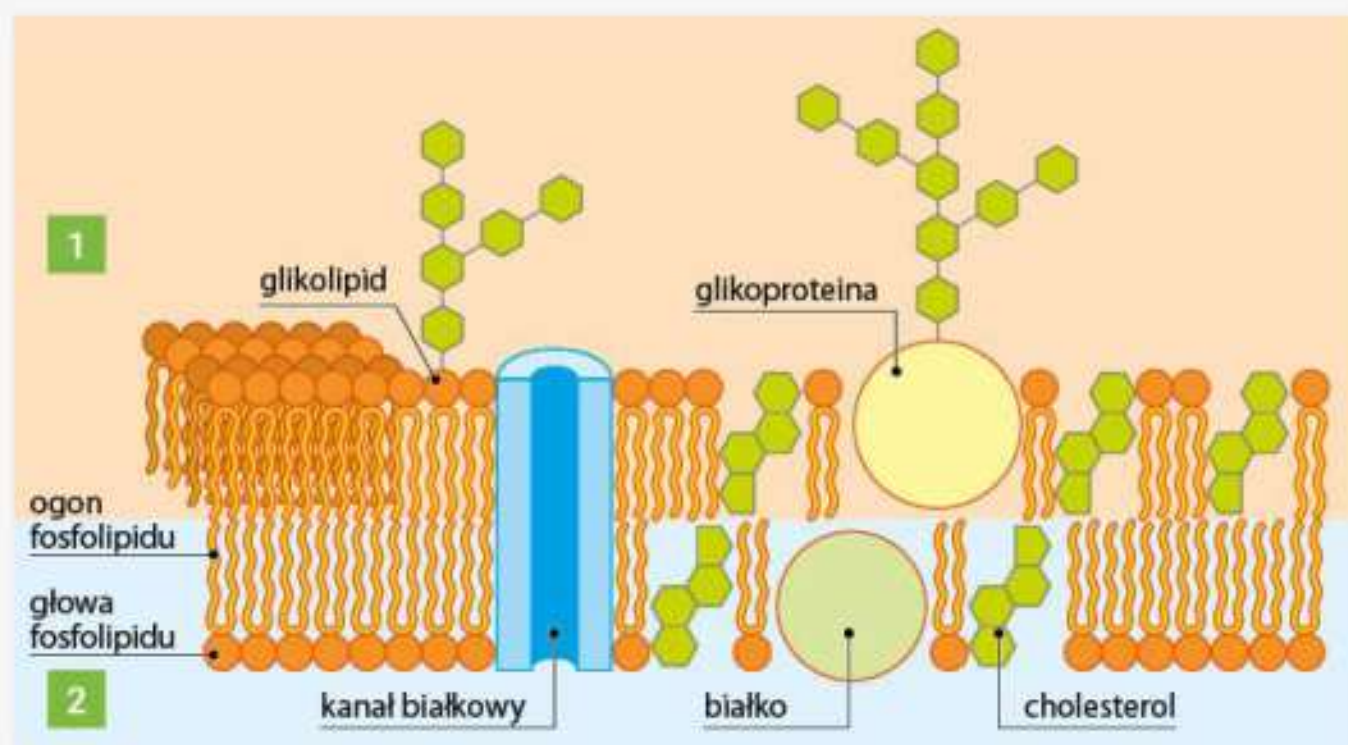
Rysunek przedstawia schemat budowy cytoszkieletu erytrocytów.



- 3.1. Wyjaśnij powiązanie występowania białka spektryny w błonie komórkowej erytrocytów z kształtem erytrocytów.
- 3.2. Określ, jak struktura spektryny wpływa na transport tlenu przez erytrocyty.
4. Płynność błony komórek zwierzęcych jest regulowana przez związek, którego krótkie, sztywne cząsteczki wypełniają przestrzenie między sąsiadującymi cząsteczkami fosfolipidów, powstałe w wyniku obecności zgięć w ich nienasyconych ogonach węglowodorowych.

B. Alberts i in., *Podstawy biologii komórki*. cz. 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 372.

Na rysunku przedstawiono schemat budowy błony komórki zwierzęcej.



4.1. Nazwij związek, który odpowiada za sztywność błony komórki zwierzęcej. Wyjaśnij, dlaczego wskazany związek nie występuje w komórkach roślinnych.

4.2. Podaj, którą część komórki (strona zewnątrzkomórkowa, strona cytoplazmatyczna) oznaczono na rysunku cyframi 1 i 2.

4.3. Wyjaśnij, na czym polega i od czego zależy płynność błon komórkowych.

PODSUMOWANIE LEKCJI

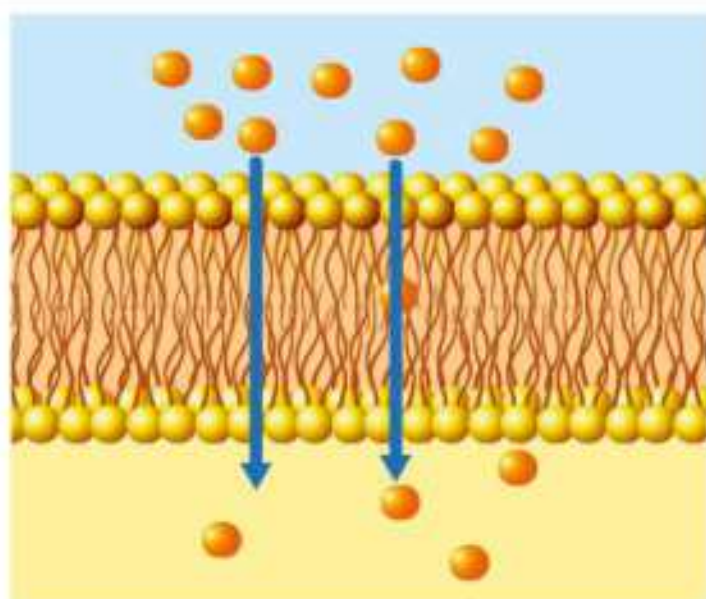
- **Błony biologiczne** występują we wszystkich komórkach. ◀ s. 108
- Wszystkie błony są zbudowane zgodnie z **modelem płynnej mozaiki** – tworzy je płynna dwuwarstwa fosfolipidowa, w której są zawieszone białka integralne, białka peryferyczne o funkcjach przekaźnikowych, receptorowych i enzymatycznych. ◀ s. 110
- Błona biologiczna jest **asymetryczna** i **selektywnie przepuszczalna**. Oddziela komórkę od środowiska zewnętrznego, odbiera bodźce z zewnątrz i umożliwia wymianę substancji z otoczenia. ◀ s. 110

4. Transport przez błony biologiczne

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz sposoby transportu przez błony biologiczne.

Transport przez błony komórkowe odbywa się w sposób **bierny** bez udziału energii ◀ rodzaje transportu przez błonę i **aktywny** (czynny) wymagający nakładu energii.



Ryc. III.4.1. Dyfuzja prosta.

■ Dyfuzja prosta

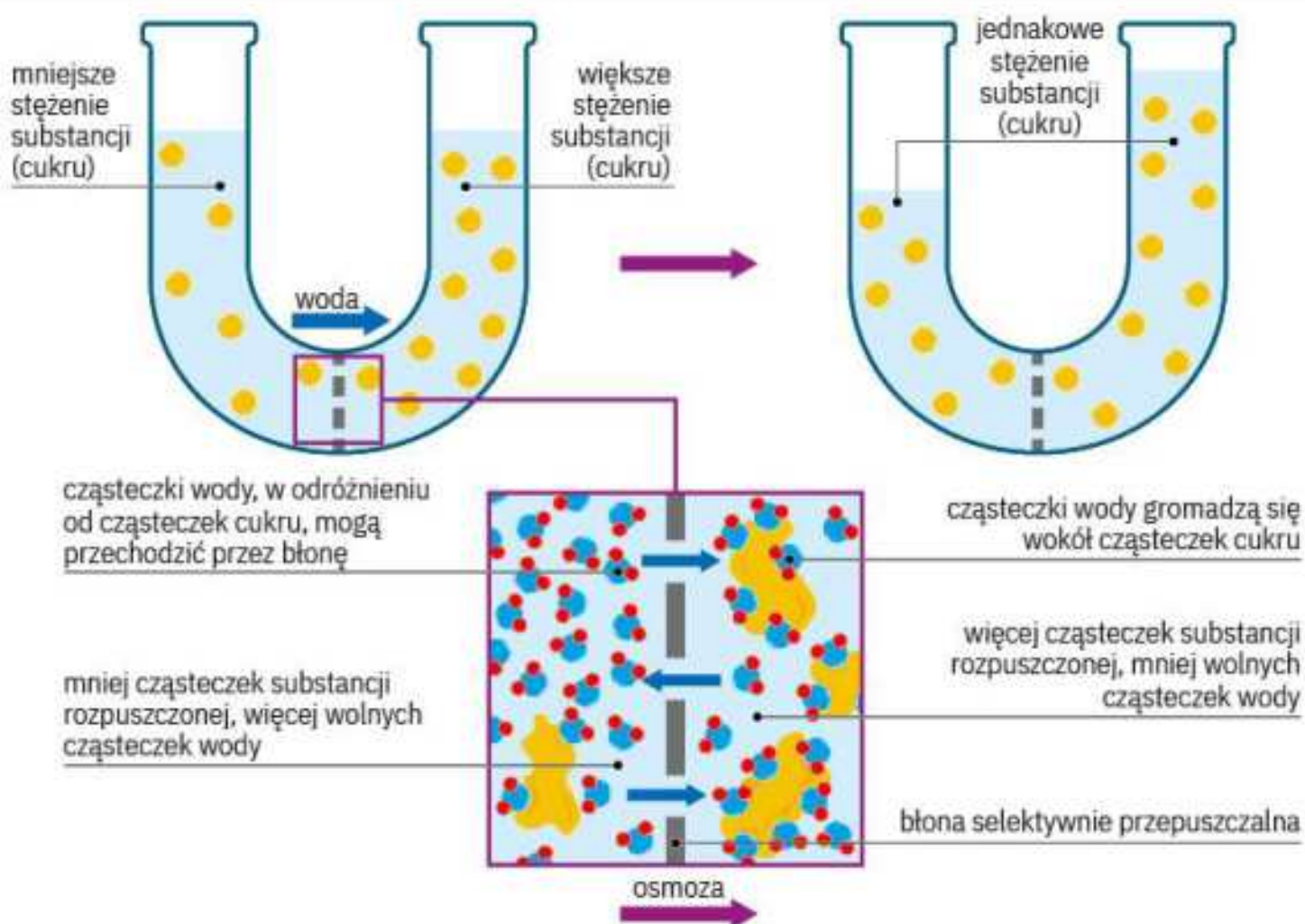
Dyfuzja prosta to bezpośredni transport substancji przez błonę. Cząsteczki przenikają dzięki różnicy stężeń we wnętrzu komórki i w jej otoczeniu – od środowiska o większym stężeniu substancji rozpuszczonych do środowiska o ich mniejszym stężeniu, czyli zgodnie z gradientem stężeń (ryc. III.4.1.).

Transport ten zachodzi bez nakładu energii metabolicznej i udziału specyficznych integralnych białek błonowych, dlatego nosi nazwę transportu biernego. Ruch cząsteczek podczas dyfuzji zachodzi dzięki ciepłu, czyli energii kinetycznej. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta energia

kinetyczna, a tym samym szybciej zachodzi dyfuzja. W ten sposób transportowane są: cząsteczki niepolarne, np. O_2 , CO_2 , i polarne, np. H_2O , NH_3 .

osmoza ➤ Odmianą dyfuzji prostej jest **osmoza**, czyli przenikanie wody (rozpuszczalnika) przez selektywnie przepuszczalną błonę biologiczną z roztworu o niższym stężeniu substancji do roztworu, w którym stężenie jest wyższe (ryc. III.4.2.).

Dyfuzja prowadzi do wyrównania stężeń substancji po obu stronach błony.

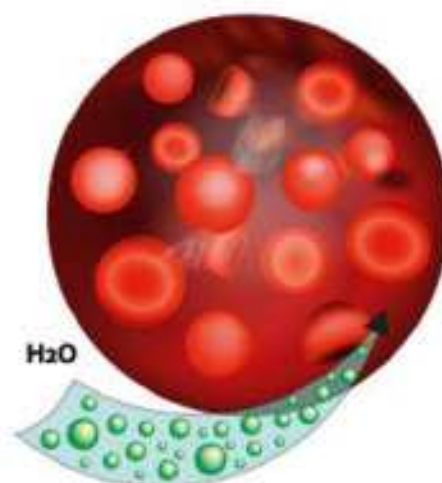


Ryc. III.4.2. Zjawisko osmozy.

Różnica stężeń związków chemicznych po obu stronach błony jest przyczyną powstania ciśnienia osmotycznego, czyli ciśnienia, które pozwoli zapobiec przepływowi wody przez półprzepuszczalną błonę komórkową w kierunku wyższego stężenia rozpuszczonej substancji.

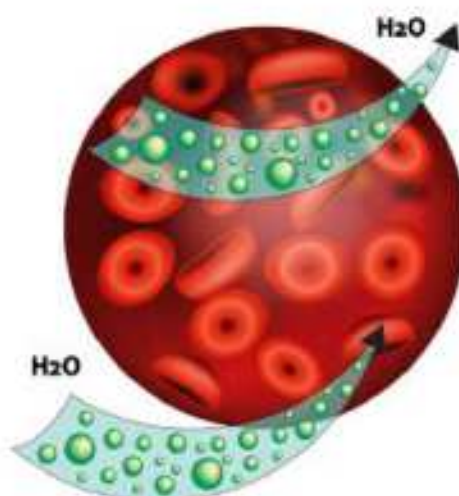
Osmoza stanowi podstawę **toniczności** roztworów, czyli zdolności do pobierania lub utraty wody przez komórkę.

Roztwór hipotoniczny jest roztworem o mniejszym stężeniu substancji rozpuszczonej (o mniejszym ciśnieniu osmotycznym) w porównaniu z wnętrzem komórki. Woda zgodnie z gradientem stężeń przepływa ze środowiska do wnętrza komórki. Umieszczona komórka zwierzęca (krwinka czerwona) w tym roztworze będzie pobierała wodę, co spowoduje zwiększenie jej objętości i może doprowadzić do pęknięcia komórki (**ryc. III.4.3.**).



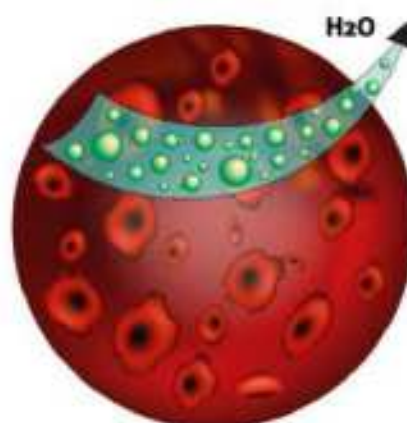
Ryc. III.4.3. Komórka zwierzęca w roztworze hipotonicznym.

Roztwór izotoniczny jest roztworem o stężeniu substancji rozpuszczonej (i ciśnieniu osmotycznym) w równowadze z wnętrzem komórki. Z komórki do roztworu przepływa tyle samo wody co w kierunku przeciwnym. Umieszczona komórka zwierzęca (krwinka czerwona) w tym roztworze będzie taką samą ilość wody pobierała do wnętrza i oddawała na zewnątrz (**ryc. III.4.4.**).



Ryc. III.4.4. Komórka zwierzęca w roztworze izotonicznym.

Roztwór hipertoniczny to roztwór o większym stężeniu substancji rozpuszczonej (o większym ciśnieniu osmotycznym) w porównaniu z wnętrzem komórki. Woda zgodnie z gradientem stężeń wypływa na zewnątrz komórki. Umieszczona komórka zwierzęca (krwinka czerwona) w tym roztworze traci stopniowo wodę, kurczy się i może to doprowadzić do jej śmierci (**ryc. III.4.5.**).

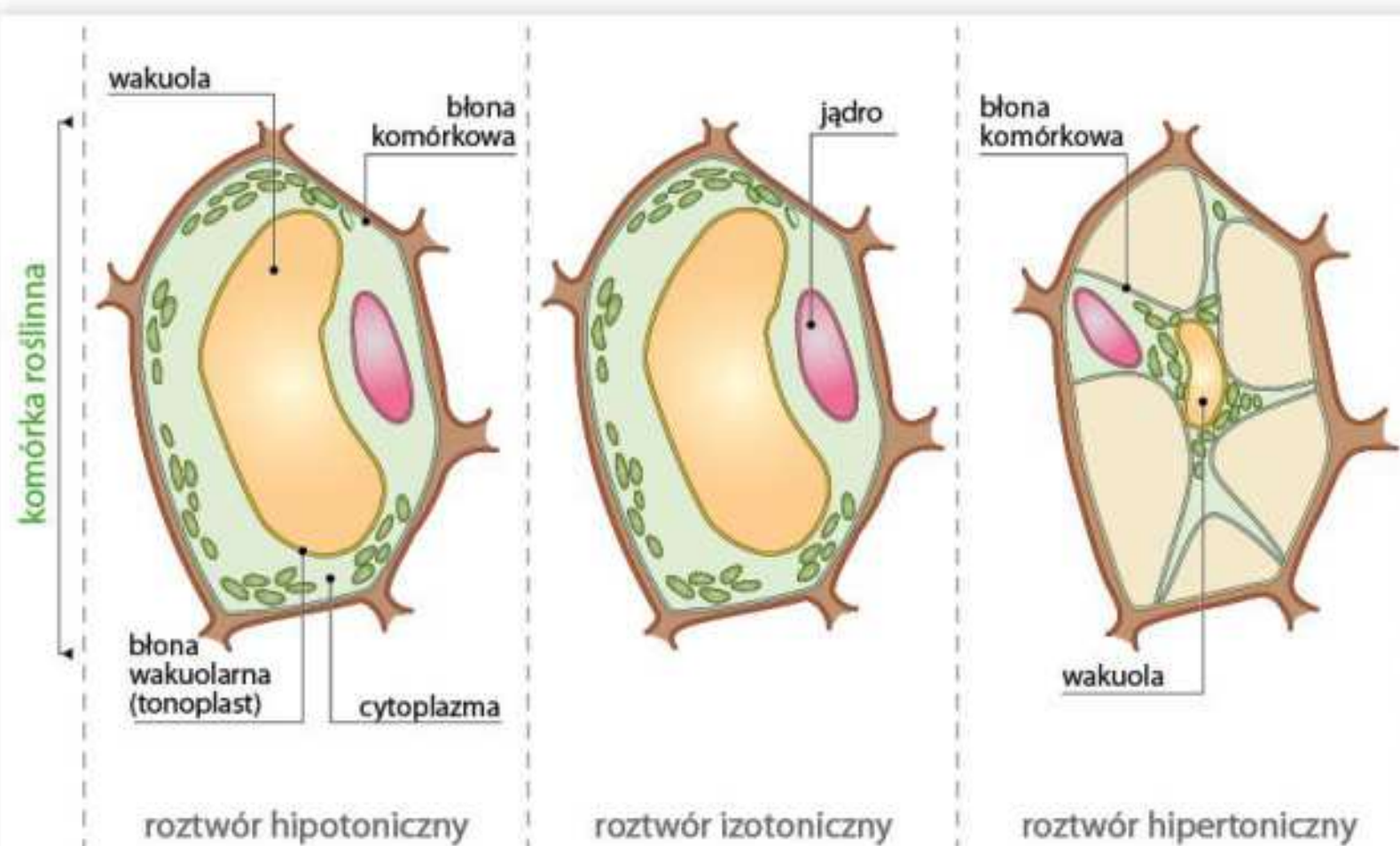


Ryc. III.4.5. Komórka zwierzęca w roztworze hipertonicznym.

rodzaje roztworów

W komórkach roślin, bakterii, grzybów i niektórych protistów sposób reakcji na zmiany stężenia substancji rozpuszczonych w środowisku zależy od tego czy komórki wyposażone są w ścianę komórkową (**ryc. III.4.6.**):

- **w roztworze hipotonicznym** woda dostaje się do komórki, wypełniając wakuolę. Komórka zwiększa swoją objętość i wywiera większe ciśnienie turgorowe na ścianę komórkową. Opór ściany komórkowej chroni przed dalszym powiększaniem się komórki i wnikaniem do niej wody;
- **w roztworze hipertonicznym** komórka roślinna traci wodę i turgor. Cytoplasma komórki kurczy się, a wraz z nią błona komórkowa oddziela się od ściany komórkowej. Wówczas w komórce zachodzi zjawisko plazmolizy;
- **w roztworze izotonicznym** komórka roślinna nie osiąga w pełni jędrności (turgoru) i jest nieznacznie zwiotczała.



Ryc. III.4.6. Równowaga wodna w komórkach roślinnych. Komórki roślinne mają największy turgor (jędrność) w roztworze hipotonicznym. W środowisku hipertonicznym komórka roślinna traci wodę, co powoduje plazmolizę i w efekcie wędnięcie rośliny.

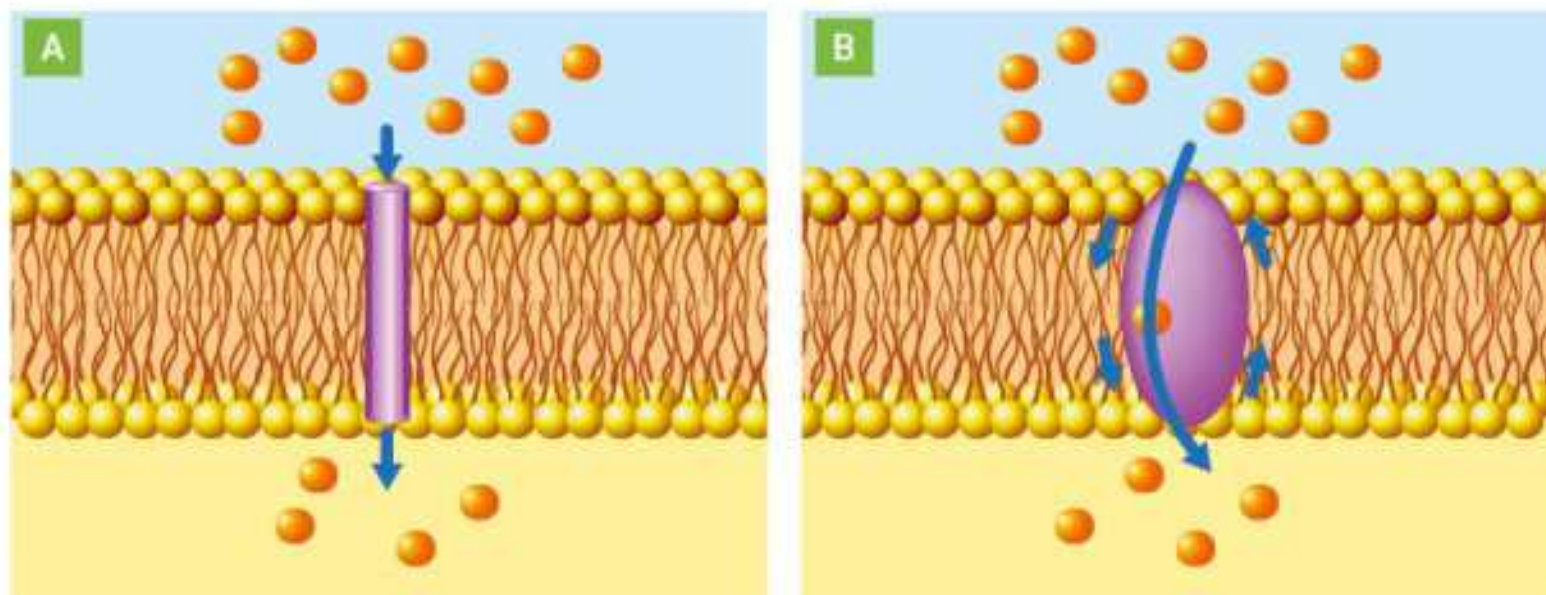
■ **Dyfuzja wspomagana (ułatwiona)**

To transport bierny wspomagany, ponieważ cząsteczki muszą korzystać z pomocy białek błonowych. W tym transporcie uczestniczą dwie klasy białek błonowych: białka kanałowe i nośnikowe.

■ Białka biorące udział w dyfuzji wspomaganej

Białka kanałowe tworzą w poprzek dwuwarstwy lipidowej hydrofilowe korytarze (kanały), przez które są najczęściej transportowane jony (kanały jonowe, np. dla jonów Na^+ i K^+ w błonie komórek nerwowych) oraz cząsteczki wody (kanały zbudowane z białka akwaporyny). Białka budujące kanały odznaczają się swoistością wobec określonych jonów lub cząsteczek. Otwieranie i zamykanie kanałów (zwane bramkowaniem) jest odpowiedzią na określony bodziec chemiczny lub elektryczny pochodzący z wnętrza komórki lub środowiska pozakomórkowego (**ryc. III.4.7.A**). ◀ białka kanałowe

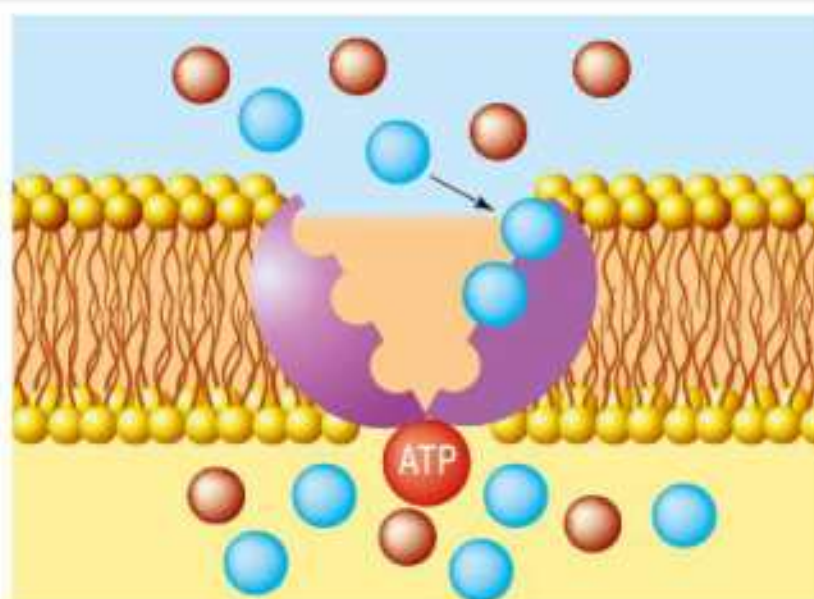
Białka nośnikowe łączą się z cząsteczką transportowaną (zmieniając swoją strukturę przestrzenną) i w takiej postaci przenoszą ją na drugą stronę błony zgodnie z różnicą (gradientem) stężeń. Po spełnieniu funkcji białko nośnikowe wraca do wyjściowej struktury przestrzennej. Tak są transportowane cukry proste, np. glukoza, oraz aminokwasy (cząsteczki polarne). Transport, w którym białko nośnikowe transportuje tylko jedną cząsteczkę zgodnie z gradientem stężeń, nazywamy też **uniportem** (**ryc. III.4.7.B**). ◀ białka nośnikowe



Ryc. III.4.7. Dyfuzja ułatwiona za pomocą białka kanałowego (A) i nośnikowego (B).

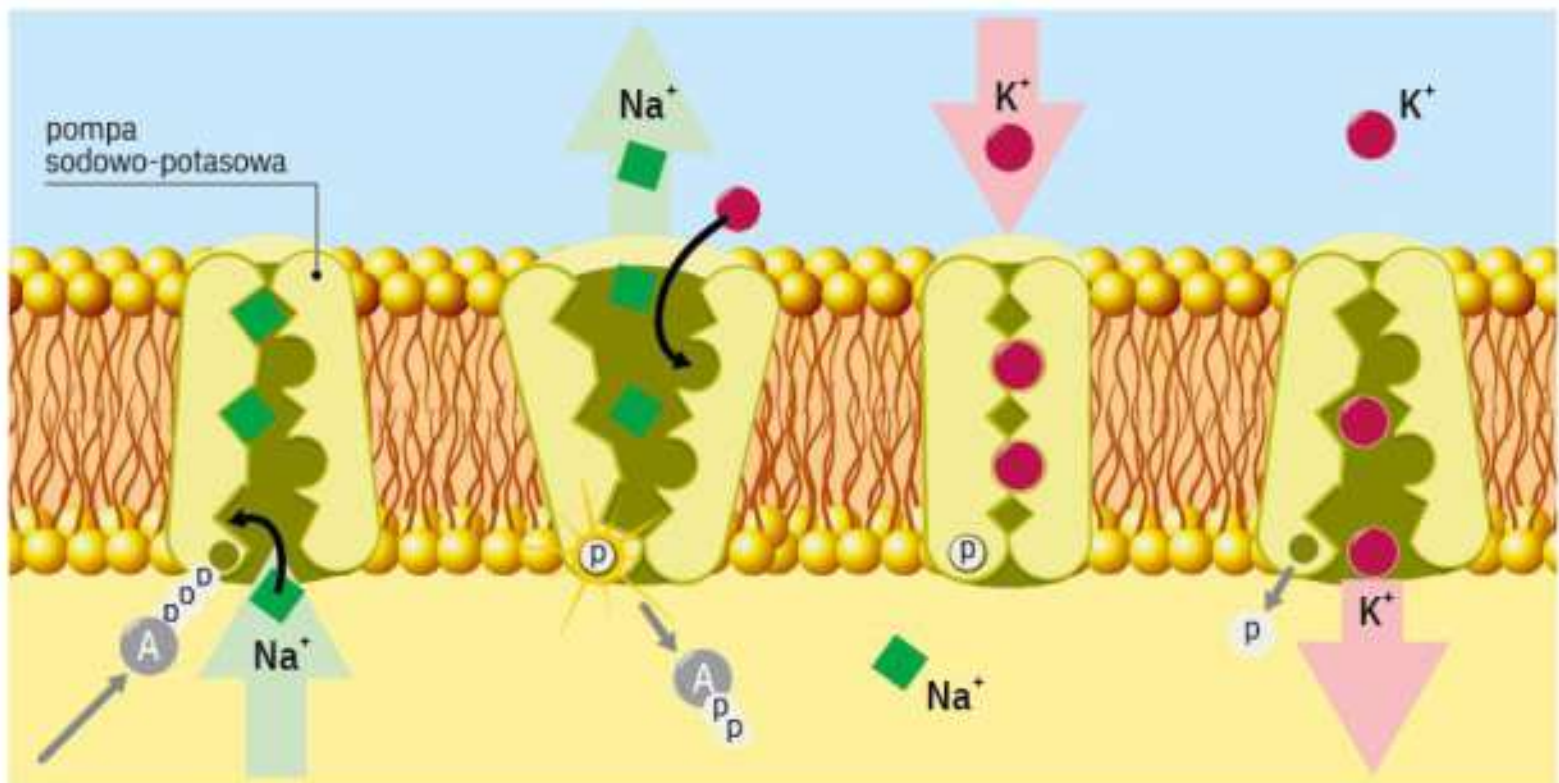
■ Transport aktywny

Zachodzi wbrew różnicy (gradientowi) stężeń, jeśli stężenie transportowanych cząsteczek na zewnątrz komórki jest mniejsze niż w jej wnętrzu (**ryc. III.4.8**). Dlatego ten typ transportu komórkowego wymaga białka przenośnikowego i dostarczenia energii metabolicznej. Energia może być bezpośrednio lub pośrednio wykorzystywana z ATP lub rzadko pochodzi ze światła słonecznego.



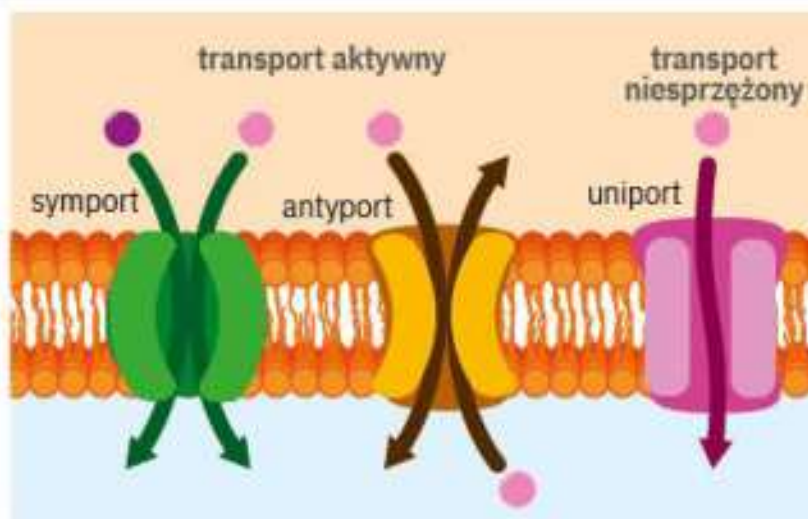
Ryc. III.4.8. Transport aktywny.

Układ, w którym energia jest uwalniana w reakcji hydrolizy ATP, nazywamy pompą. W błonach komórek zwierzęcych powszechnie działa **pompa sodowo-potasowa**, wymieniająca jony sodu (Na^+) na jony potasu (K^+) (ryc. III.4.9.). Dzięki jej działaniu we wnętrzu komórki stale jest utrzymywane niskie stężenie jonów sodu i większe stężenie jonów potasu niż w środowisku pozakomórkowym. Jest to szczególnie ważne dla m.in. utrzymania potencjału błonowego i objętości komórek.



Ryc. III.4.9. Mechanizm działania pompy sodowo-potasowej.

Jony sodu wykazują naturalną tendencję zgodnie z gradientem stężeń do biernego przechodzenia przez błonę komórkową do wnętrza komórki, a jony potasu na zewnątrz. Pompa sodowo-potasowa zapobiega biernemu przemieszczaniu się jonów i przywraca właściwe ich stężenia. Jony sodu wraz z cząsteczką ATP przyłączają się do pompy, powodując hydrolizę ATP. Uwolniona energia powoduje zmianę struktury przestrzennej białka transportującego i przemieszczenie jonów sodu na zewnątrz komórki, czyli wytworzenie gradientu stężeń. W tym samym czasie do wnętrza komórki dostają się jony potasu.



Ryc. III.4.10. Rodzaje transportu sprzężonego (symport, antiport – transport aktywny) i niesprężonego (uniport – transport bierny).

Przykładem transportu aktywnego jest **symport i antiport** (ryc. III.4.10.). **Symportem** nazywamy transport w tym samym kierunku jednej cząsteczki lub jonu sprzężonego z transportem drugiej cząsteczki lub jonu.

Jeśli sprzężone cząsteczki lub jony są transportowane w przeciwnym kierunku, mamy do czynienia z **antiportem**.

Niektóre substancje w różnych komórkach organizmu mogą być transportowane zarówno aktywnie, jak i biernie. Przykład takiej substancji to glukoza, która w erytrocytach i mięśniach człowieka jest transportowana na drodze transportu wspomagającego, a przez komórki nabłonka jelit przechodzi na zasadzie transportu aktywnego.

Transport dużych cząsteczek (makrocząsteczek)

Transport makrocząsteczek odbywa się na drodze endocytozy, czyli pobierania różnych substancji do wnętrza komórki, i egzocytozy, czyli usuwania ich z komórki do przestrzeni pozakomórkowej (ryc. III.4.11.).

transport makrocząsteczek

Podczas endocytozy następuje wpuklenie błony komórkowej do wnętrza komórki i utworzenie pęcherzyka endocytarnego, w którym zostaje zamknięta pobrana substancja.

■ Endocytoza

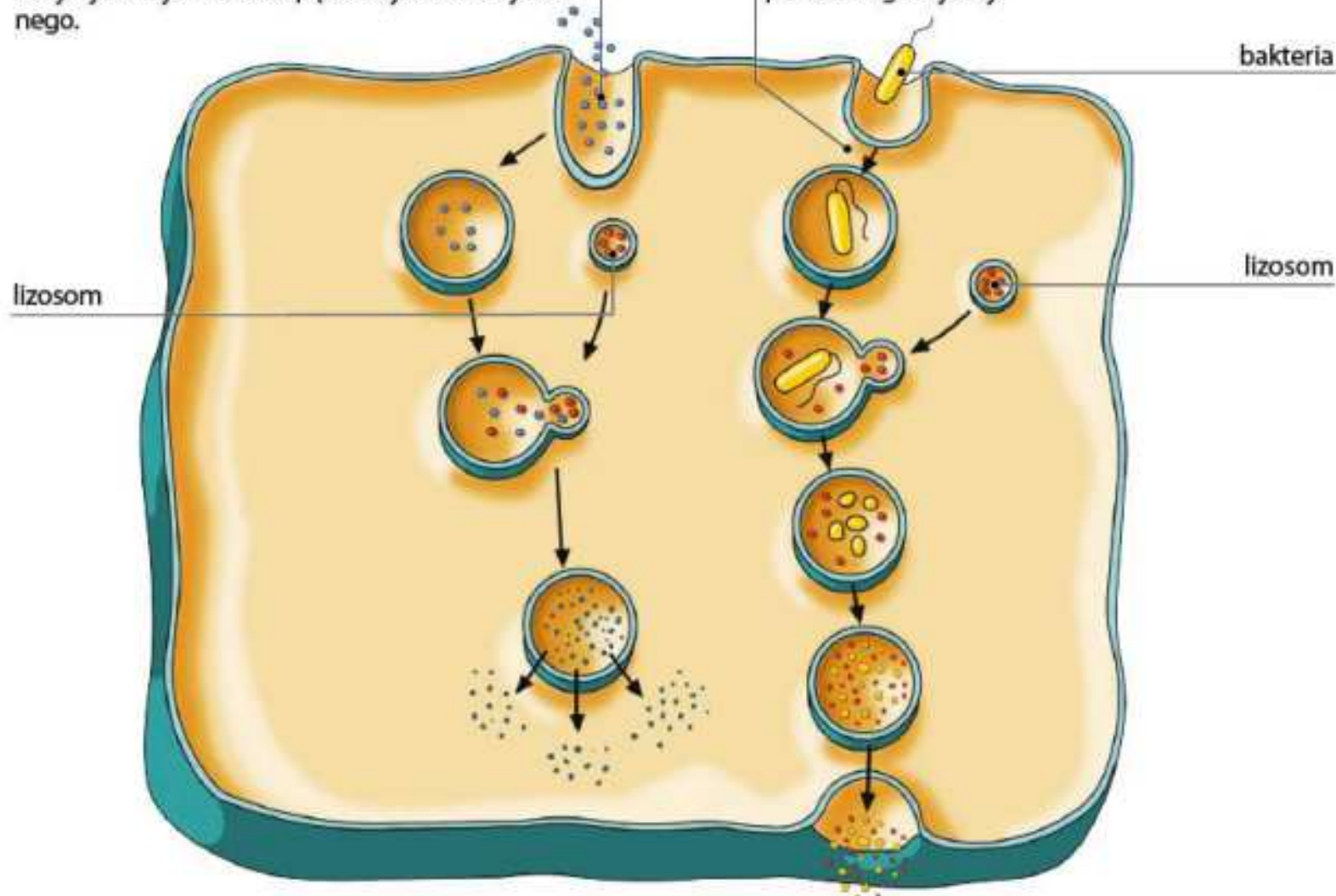
fagocytoza i pinocytoza

Pinocytoza

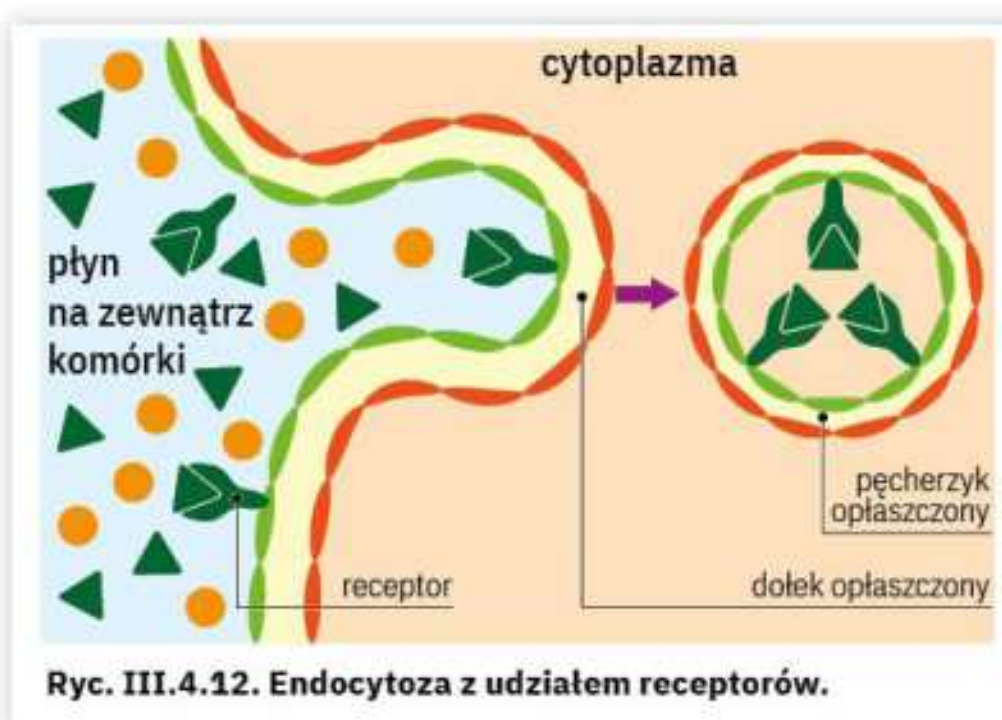
– pobieranie drobin białek czy innych wielkocząsteczkowych substancji rozpuszczonych w wodzie. Nie kończy się egzocytozą, a niestrawione resztki pokarmowe (po trawieniu przez lizosom) są rozproszone w cytoplazmie komórki. Występuje ubytek błony komórkowej zużytej do wytworzenia pęcherzyka endocytarnego.

Fagocytoza

– pobieranie dużych cząsteczek, np. szczątków komórek, komórek mikroorganizmów (jest skuteczną formą obrony przed organizmami chorobotwórczymi u człowieka) i po ich rozłożeniu przez enzymy hydrolityczne lizosomów, usuwanie niestrawionych resztek podczas egzocytozy.



Ryc. III.4.11. Zjawiska endo- i egzocytozy.



Trzecim rodzajem endocytozy jest **endocytoza z udziałem receptorów**. Polega na wybiórczym pobieraniu specyficznych substancji ze środowiska zewnętrznego przy udziale białkowego receptora w błonie komórkowej (miejsce jego występowania w błonie to dołek oplotaszczony). Po związaniu substancji z receptorem powstaje pęcherzyk oplotaszczony z zewnątrz warstwą białka, który przemieszcza się do cytoplazmy. W taki sposób komórki pobierają między innymi z krwi cholesterol,

który jest niezbędny do syntezy błony komórkowej i hormonów steroidowych. Endocytoza receptorowa uczestniczy także w przewodnictwie nerwowym (**ryc. III.4.12.**).

W **egzocytozie** na zewnątrz są usuwane niestrawione resztki pokarmowe lub substancje przeznaczone przez komórkę na eksport do innych komórek, np. białka i lipidy, a w komórkach roślin także wielocukry. Substancje te gromadzą się w pęcherzykach odrywających się od aparatu Golgiego. Pęcherzyki przemieszczają się w kierunku błony komórkowej i po zlaniu się z błoną uwalniają zawartość poza komórkę. Błony pęcherzyków, łącząc się z błoną komórkową, odpowiadają za jej powiększanie.

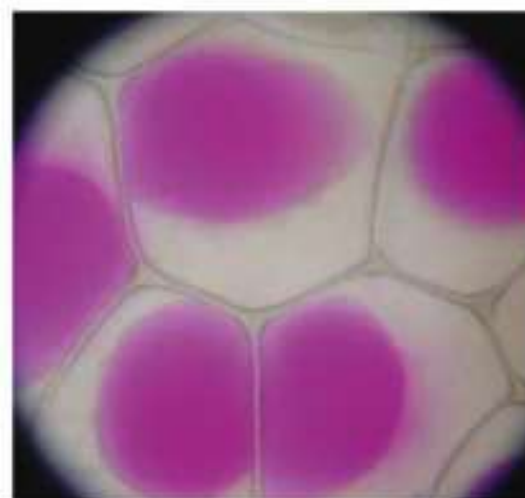
Egzocytoza to proces, który może zachodzić w komórkach nieprzerwanie (egzocytoza konstytutywna) lub jest regulowany przez sygnały z zewnątrz, np. hormony, neuroprzekaźniki czy stężenie określonych metabolitów (egzocytoza regulowana). Przykład egzocytozy regulowanej stanowi wydzielanie hormonu insuliny przez komórki trzustki. Wzrost stężenia glukozy we krwi stanowi sygnał pobudzający trzustkę do produkcji insuliny, która obniża poziom glukozy.

Obserwacja

Obserwacja zjawiska plazmolizy i deplazmolizy w komórkach liścia spichrzowego cebuli

Plazmoliza. Na wewnętrznej stronie łuski spichrzowej cebuli wykonaj kilka prostopadłych nacięć tak, aby powstały kwadraty o wielkości około 10 x 10 mm. Następnie zdejmij skórkę i umieść ją w kropli 5-procentowego roztworu NaCl. Sporządź preparat mikroskopowy i rozpocznij obserwację mikroskopową. Obserwuj kolejne etapy plazmolizy. Wykonaj w zeszycie rysunki komórki w stanie plazmolizy.

Ryc. III.4.13. Zjawisko plazmolizy
– obraz spod mikroskopu.

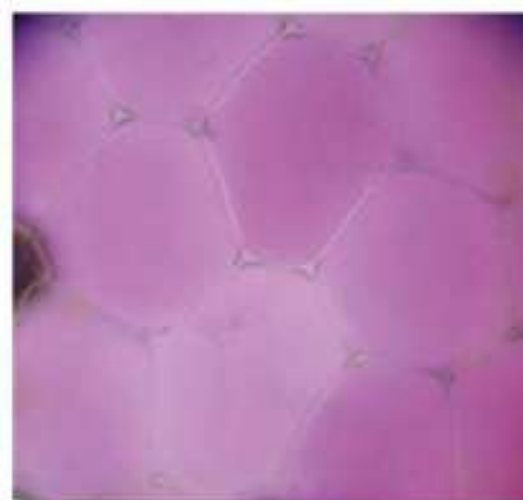


Obserwacja



Deplazmoliza. Preparat mikroskopowy skórki cebuli w stanie plazmolizy przepłucz wodą destylowaną. W tym celu umieść kroplę wody destylowanej po jednej stronie szkiełka nakrywkowego. Po stronie przeciwnej połóż pasek bibuły filtracyjnej, aby roztwór soli pod szkiełkiem wsiąkał w papier, a na jego miejsce pojawiła się woda destylowana. Obserwuj kolejne etapy deplazmolizy. Wykonaj w zeszycie rysunki komórki w stanie deplazmolizy.

Ryc. III.4.14. Zjawisko deplazmolizy
– obraz spod mikroskopu.



ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- Wyjaśnij, na czym polega selektywność błon biologicznych.
- Podaj różnicę między dyfuzją prostą a osmozą.
- Przedstaw, jak będzie zachowywała się komórka zwierzęca i roślinna umieszczona w następujących roztworach: hipotonicznym, hipertonicznym i izotonicznym. Sporządź w zeszycie tabelę, w której zestawisz różnice.
- Określ, jakie znaczenie dla układu nerwowego i mięśniowego ma funkcjonowanie pompy sodowo-potasowej.
- Na podstawie schematu w podręczniku przedstaw różnice i podobieństwa między endocytozą a egzocytozą.
- Przerysuj do zeszytu tabelę i uzupełnij w niej nazwy roztworów i efekt w komórce, a także dorysuj brakujące groty strzałek.

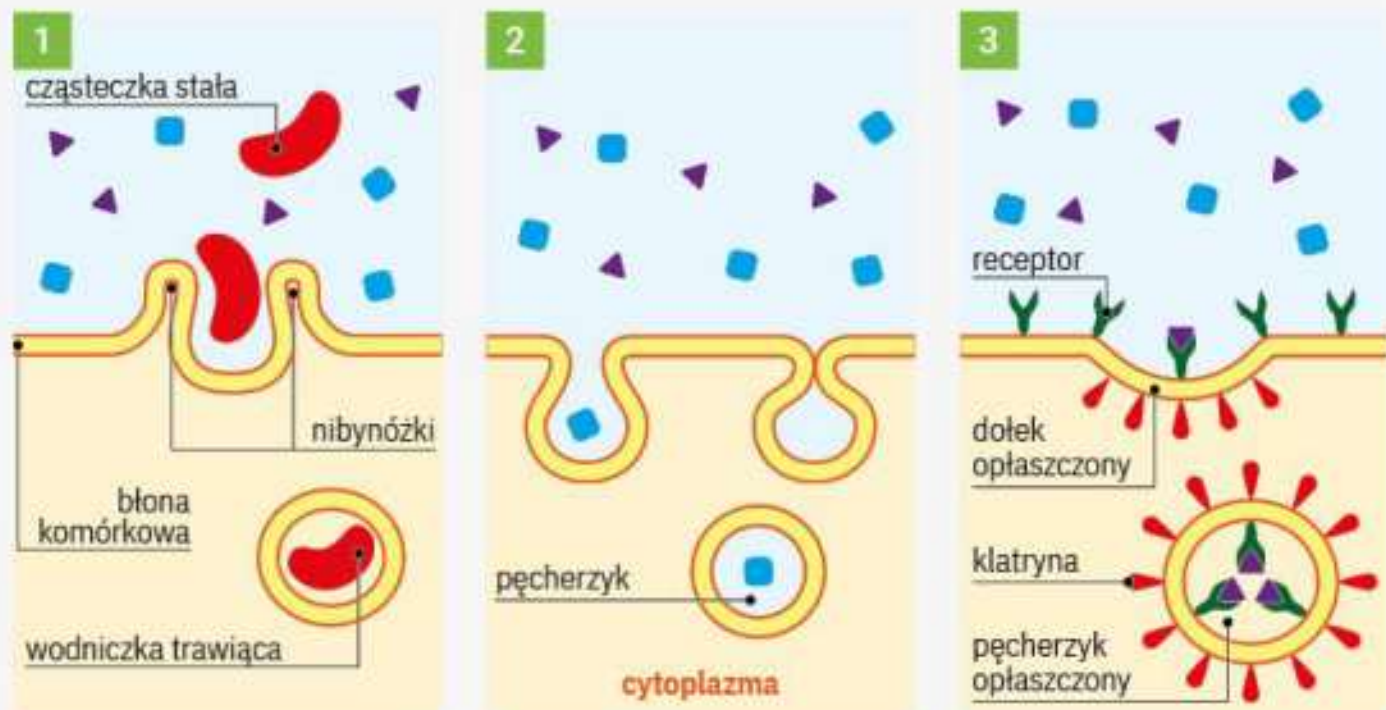
Roztwór zewnętrzny w stosunku do wewnętrznego	Stężenie roztworu zewnętrznego (C_1)	Stężenie roztworu wewnętrznego (C_2)	Efekt w komórce zwierzęcej
...		$C_1 = C_2$ $H_2O \rightleftharpoons H_2O$ $H_2O \rightleftharpoons H_2O$	brak zmiany kształtu
hipertoniczny		$C_1 > C_2$ $H_2O \rightarrow H_2O$	...
...		$C_1 < C_2$ $H_2O \leftarrow H_2O$	komórki pęcznieją i pękają



7. Jedną z form reagowania komórek na bodźce zewnętrzne jest endocytoza, polegająca na wprowadzaniu do wnętrza komórki składników środowiska zewnętrznego. Drogą endocytozy komórki pobierają, na przykład pokarm, czy cząsteczki regulatorowe. Zjawisko to włączone jest w procesy recyrkulacji receptorów oraz transportu wewnątrzkomórkowego. Endocytoza występuje u wszystkich Eukaryota, od pierwotniaków aż po komórki ssaków (z wyjątkiem dojrzałych erytrocytów).

W. Klopocka, *Endocytoza u pierwotniaków i w komórkach tkankowych*, „Kosmos”, 2000, t. 49, nr 4, s. 589.

Na rysunku przedstawiono trzy rodzaje endocytozy.



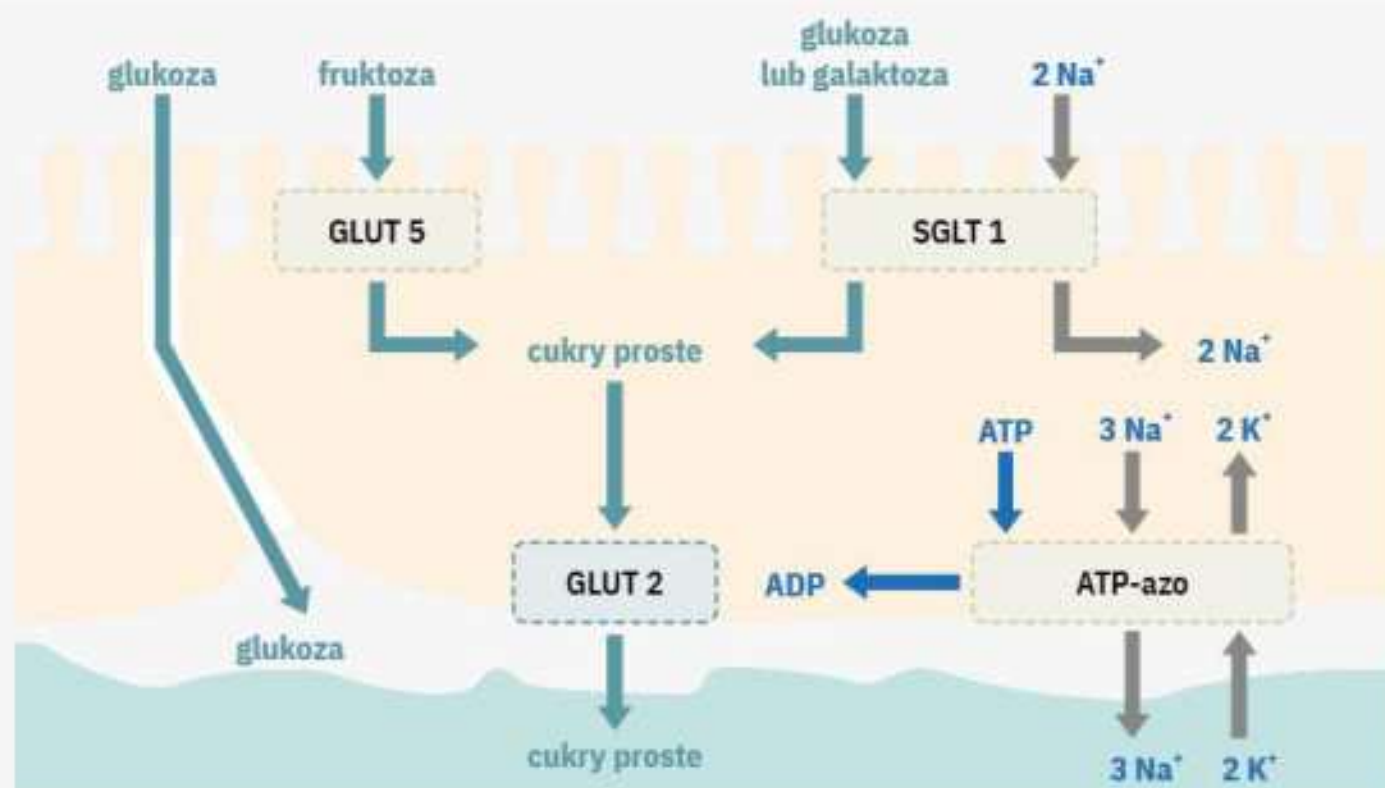
7.1. Określ, który rysunek przedstawia endocytozę receptorową. Odpowiedź uzasadnij.

7.2. Podaj jedną cechę wspólną i jedną różnicę między endocytozą oznaczoną na rysunku numerami 1 i 2.

8. Według większości dostępnych podręczników biochemii i fizjologii, transport glukozy do komórek nabłonkowych jelita odbywa się przy udziale nośnika SGLT 1 (ang. sodium glucose transporter 1). Z kolei transport glukozy z komórek nabłonkowych do naczyń włosowatych zachodzi przy udziale GLUT 2 (ang. glucose transporter 2), obecnego w błonie komórkowej części podstawno-bocznej enterocyty (ang. basolateral membrane). SGLT 1 transportuje glukozę do komórek nabłonkowych jelita wspólnie z jonami sodu. W przeciwieństwie do glukozy, Na^+ transportowane są zgodnie z gradientem stężeń. Wymaga to ciągłego usuwania Na^+ z komórki przy udziale Na^+/K^+ zależnej ATPazy. Galaktoza (produkt rozkładu laktozy zawartej w pokarmach), podobnie jak glukoza, jest transportowana do enterocytów przy udziale tego samego nośnika. Natomiast fruktoza (produkt rozkładu sacharozy zawartej w pożywieniu) jest transportowana ze światła jelita do enterocytów na drodze dyfuzji ułatwionej przy udziale GLUT 5.

E. Stelmańska, *Kluczowe znaczenie nośnika GLUT 2 w transporcie glukozy w komórkach jelit*, „Postępy Biochemii” 2009, 55(4) s. 385..





- 8.1. Przedstaw, jakim rodzajem transportu przechodzi glukoza do komórek nabłonka jelita.
- 8.2. Wyjaśnij, czy transport glukozy do komórek nabłonka jelita jest symportem czy antyportem.
- 8.3. Podaj dwie różnice w transporcie glukozy i fruktozy ze światła jelita do komórek nabłonka jelita.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Transport przez błony może być **bierny** bez nakładu energii metabolicznej (w kierunku mniejszego stężenia transportowanej substancji) i **czynny** z nakładem energii (w kierunku wyższego stężenia transportowanej substancji). ◀ s. 113
- Do **transportu biernego** zaliczamy dyfuzję prostą i dyfuzję ułatwioną (wymagającą specyficznych białek transportujących – kanałowych i nośnikowych). ◀ s. 114
- Szczególnym rodzajem dyfuzji jest **osmoza**, w której woda przenika przez błonę z roztworu o wyższym stężeniu wody do roztworu o niższym stężeniu wody. ◀ s. 114
- Wyróżniamy **trzy rodzaje roztworów**: hipotoniczny, z którego ubywa wody, hipertoniczny, do którego woda napływa, i izotoniczny pozostający w równowadze osmotycznej. ◀ s. 115
- **Zachowanie komórki w roztworach** hipotonicznym, hipertonicznym i izotonicznym zależy od obecności lub braku ściany komórkowej. ◀ s. 116
- **Pompa sodowo-potasowa** jest przykładem transportu aktywnego komórki z udziałem przenośników i energii uzyskiwanej z hydrolizy ATP. ◀ s. 118
- **Transport makrocząsteczek** do wnętrza komórki zachodzi na drodze endocytozy (fagocytozy, pinocytozy, endocytozy z udziałem receptora), a na zewnątrz komórki – na drodze egzocytozy. ◀ s. 119
- **Fagocytoza** to wchłanianie dużych cząsteczek stałych, **pinocytoza** – pobieranie substancji rozpuszczonych w wodzie, a endocytoza z udziałem receptora – pobieranie specyficznych substancji za pomocą receptorów w błonie komórkowej. ◀ s. 119

5. Jądro komórkowe – centrum informacji komórki

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz budowę jądra komórkowego;
- dowiesz się, jak jest zbudowany chromosom metafazowy.

- jądro komórkowe** ➤ **Jądro komórkowe** jest największym i najważniejszym organellum komórki eukariotycznej. Prawie wszystkie komórki mają jedno jądro komórkowe. Ale znane są organizmy, w komórkach których znajdują się **dwa lub więcej jąder**. Dwa jądra komórkowe o zróżnicowanej wielkości i funkcji – makronukleus i mikronukleus (z łac. *nukleus* to jądro komórkowe) występują u orzęsków (*protisty* zwierzęce), a grzyby – workowce i podstawczaki przez część swojego cyklu życiowego przechodzą fazę dwujądrową (fazę jąder sprzężonych). Natomiast z komórek wielojądrowych – komórczaków – są zbudowane plechy niektórych protistów roślinnych i strzępki pleśniaka. Takie komórki powstają przez liczne podziały jądra bez równoczesnego podziału cytoplazmy. Jeśli wcześniej łączą się ze sobą oddzielne komórki jednojądrowe i towarzyszy temu zanikanie błon jądrowych, powstają wówczas zespólnie (syncytia; np. włókna mięśni poprzecznie prążkowanych zwierząt czy powłoki ciała tasiemców). Z kolei w niektórych wyspecjalizowanych komórkach ze względu na pełnione przez nie funkcje **jądro komórkowe zanika**, np. w dojrzałych erytrocytach ssaków czy dojrzałych rurkach sitowych roślin okrytonasiennych.
- komórki wielojądrowe** ➤
- komórki bezjadrzaste** ➤

Jądro komórkowe jest zwykle kuliste lub owalne (w niektórych krwinkach białych może być płatkowate lub nerkowate) i zajmuje najczęściej centralne miejsce w komórce. W dojrzałych komórkach niektórych tkanek roślinnych rozrośnięta wakuola spycha jądro do brzegu komórki. Przeciętnie średnica jądra komórkowego wynosi około 5 μm (mikrometrów).

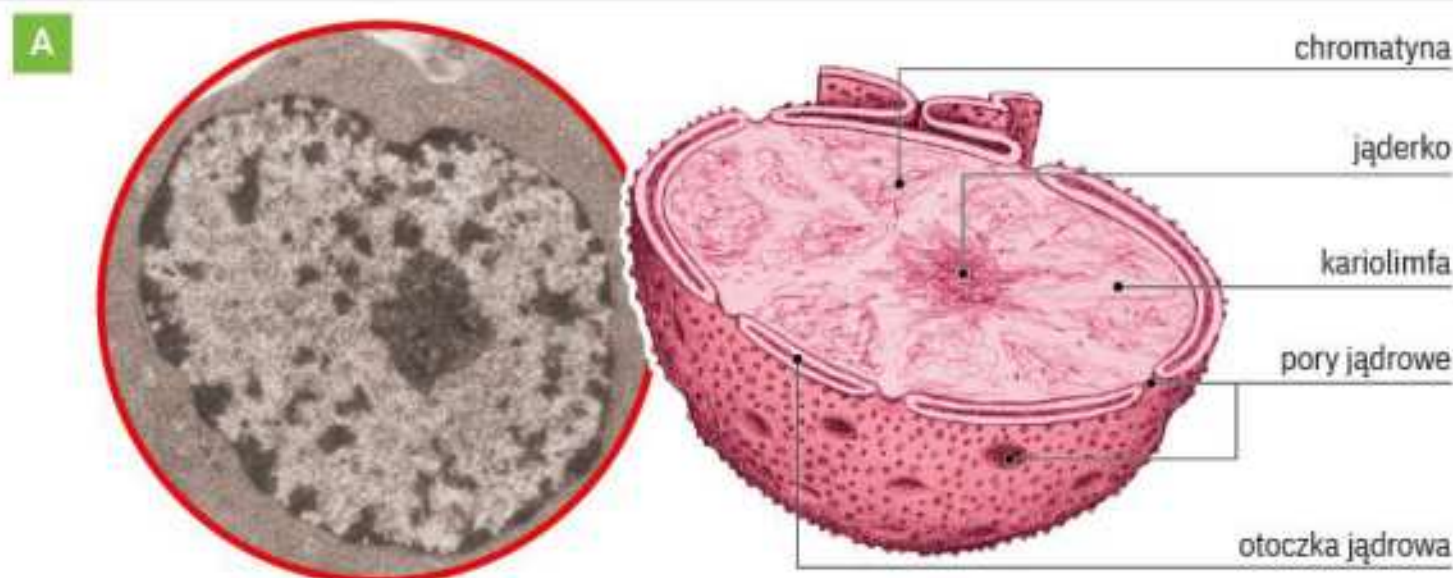
Jądro komórkowe spełnia decydującą funkcję w powielaniu i przekazywaniu materiału genetycznego (DNA) do komórek potomnych oraz organizmów potomnych. Ponadto odpowiada za przebieg większości procesów życiowych komórki.

Budowa jądra komórkowego

- sok jądrowy** ➤ Jądro komórkowe oddziela od cytoplazmy otoczka jądrowa utworzona z **dwóch błon** (ryc. III.5.1.) Wnętrze jądra wypełnia kariolimfa, czyli **sok jądrowy**, w którym zanurzona jest chromatyna. Chromatyna składa się przede wszystkim z DNA (kwas deoksyrybonukleinowy) związanego z białkami o charakterze histonowym (głównie aminokwasy zasadowe). Do pozostałych składników chromatyny należą białka niehistonowe (głównie aminokwasy kwaśne) i RNA (kwas rybonukleinowy) (**tab. III.5.1.**). Zawartość DNA i białek histonowych w chromatynie jest stała i charakterystyczna dla danego gatunku. Natomiast ilość RNA i białek niehistonowych zależy od intensywności metabolizmu komórki.

Tab. III.5.1. Charakterystyka składników chromatyny

Składnik chromatyny	Funkcja
DNA	materiał genetyczny komórki, w którym jest zapisana informacja o budowie białek
RNA	mRNA i tRNA uczestniczy w syntezie białka na rybosomach rRNA bierze udział w tworzeniu podjednostek rybosomów
białka histonowe	wraz z kwasem DNA są głównym składnikiem chromatyny
białka niehistonowe	funkcja strukturalna, regulatorowa i enzymatyczna



Ryc. III.5.1. Budowa jądra komórkowego: (A) mikrofotografia, (B) model przestrzenny.

Pory jądrowe to otwory w otoczce jądrowej, które umożliwiają transport substancji między jądrem komórkowym a cytoplazmą. Za kontrolę tego transportu są odpowiedzialne znajdujące się wewnątrz nich kompleksy białkowe. Liczba porów jądrowych jest zmienna i zależy od aktywności metabolicznej komórki, np. w jądrze komórki wątroby człowieka znajduje się 3000–7000 porów (**ryc. III.5.2.**).

Otoczka jądrowa składa się z dwóch błon: zewnętrznej i wewnętrznej oddzielających wnętrze jądra od otaczającej go cytoplazmy. Wewnętrzna błona jest gładka, a zewnętrzna połączona z rybosomami i przechodzi w siateczkę (retikulum) śródplazmatyczną szorstką.

Chromatyna w dzielącej się komórce ma postać włóknistej sieci. W zależności od stopnia skręcenia występuje w dwóch formach: silnie upakowanej heterochromatyny i słabo skondensowanej (zagęszczonej) **euchromatyny**. Stopień skondensowania decyduje o aktywności genetycznej chromatyny. Luźna struktura euchromatyny wypełniającej wnętrze jądra



Ryc. III.5.2. Pory jądrowe.

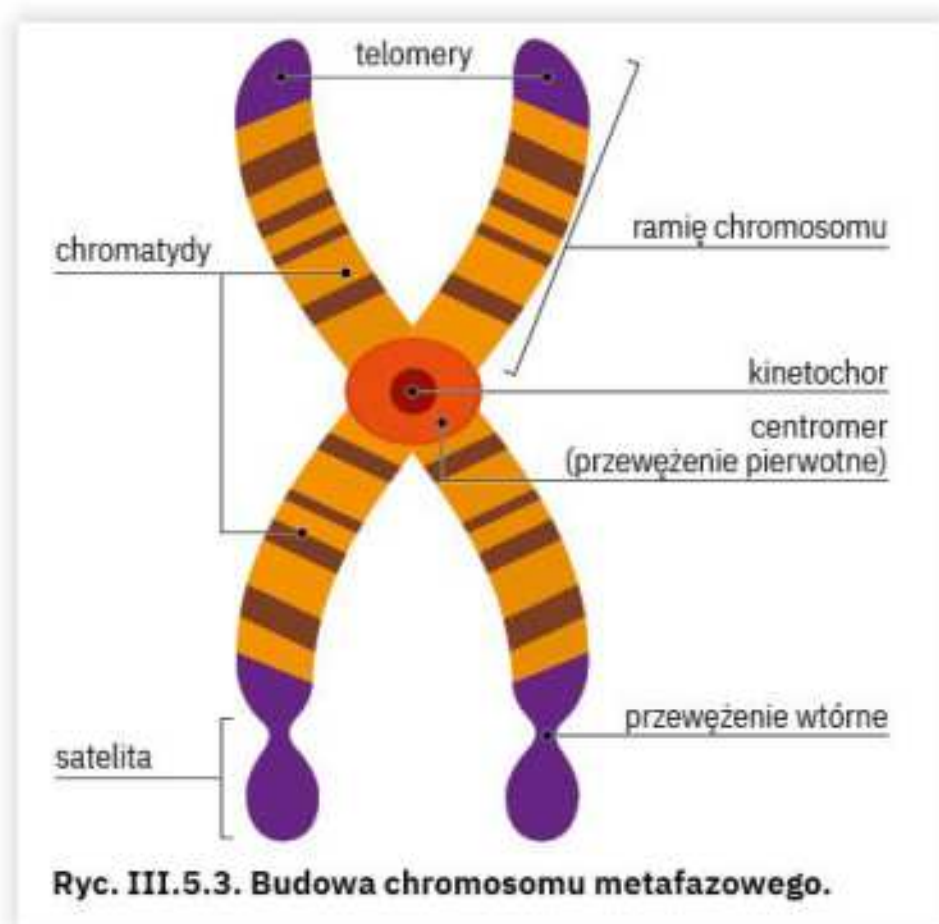
pozwała na odczytywanie informacji genetycznej zapisanej w DNA. Natomiast silnie upakowana struktura heterochromatyny znajdującej się głównie pod otoczką jądrową czyni ją nieaktywną genetycznie. Podczas podziału komórki po wcześniejszym zagęszczeniu chromatyny powstają z niej chromosomy.

Kariolimfa stanowi płynne środowisko jądra komórkowego, w którym jest zanurzona chromatyna, białka enzymatyczne (odpowiedzialne za syntezę DNA i RNA) i jedno lub kilka jąder.

jąderko ➤ **Jąderko** jest nieobłonią strukturą, o zbitej konsystencji, w której zachodzi synteza rRNA. Do jąderka dostają się transportowane z cytoplazmy białka i po połączeniu z rRNA budują podjednostki rybosomów. Podjednostki rybosomów przechodzą przez pory jądrowe do cytoplazmy, gdzie tworzą rybosomy, które uczestniczą w syntezie białka.

Budowa chromosomu metafazowego

chromosomy ➤ **Chromosomy** w komórkach dzielących się nie są dostrzegalne. Dopiero podczas podziału komórki chromatyna ulega kondensacji (zagęszczeniu), tworząc chromosomy. Nazwa „chromosom” pochodzi od wybarwiania tych struktur barwnikami używanymi do sporządzania preparatów mikroskopowych (z gr. *chroma* – kolor, *soma* – ciało).



Maksymalny stopień kondensacji osiągają chromosomy podczas metafazy – jednej z faz podziału komórkowego. Można wówczas dokładnie wyróżnić części chromosomu (**ryc. III.5.3.**).

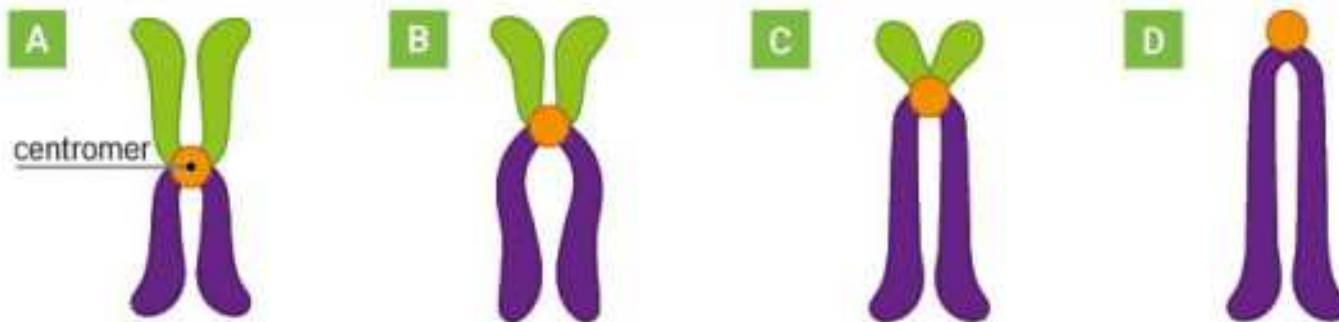
Chromosomy mogą różnić się wielkością, położeniem centromeru i występowaniem grudek chromatyny na końcach ramion (satelity – u człowieka na chromosomach 13, 14, 15, 21 i 22 pary). Niektóre chromosomy mogą mieć dodatkowe przewężenie wtórne, w którym znajduje się organizator jąderka (NOR – ang. *nuclear organizer regions*). W okresie między kolejnymi podziałami komórki, obszar ten ulega kondensacji i tworzy się wokół niego jąderko.

zróżnicowanie chromosomów

➤ Ze względu na położenie centromeru **chromosomy dzielimy na (ryc. III.5.4.):**

- metacentryczne – centromer znajduje się w środku chromosomu i dzieli go na dwa ramiona o równej długości (A);
- submetacentryczne – centromer został przesunięty w kierunku jednego ramienia chromosomu i dzieli go na ramię dłuższe i krótsze (B);

- akrocentryczne – centromer znajduje się w pobliżu końca chromosomu i krótsze ramię jest słabo widoczne (C);
- telocentryczne – centromer znajduje się przy telomerze i chromosom ma tylko jedno ramię (D).

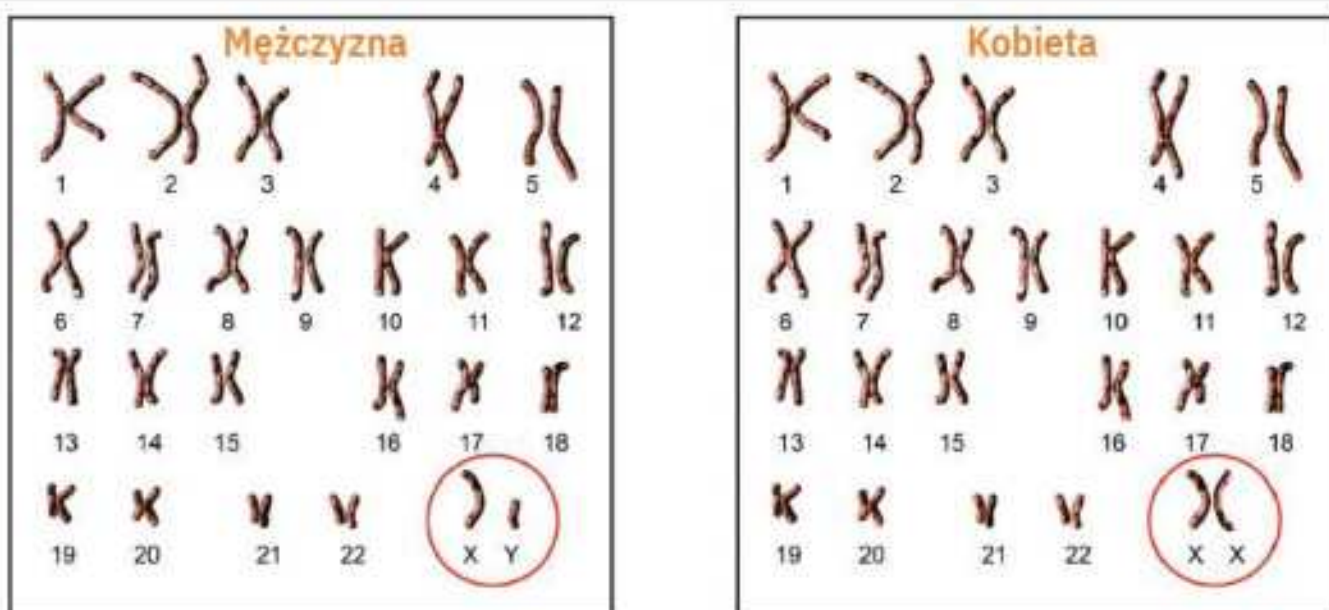


Ryc. III.5.4. Typy chromosomów ze względu na położenie centromeru.

Każdy gatunek ma charakterystyczną dla siebie liczbę chromosomów zwaną **kariotypem**, np. u człowieka jest 46 chromosomów, u muszki owocowej – 8, a u drożdży – 17 (ryc. III.5.5.). Pojęcie to odnosi się zarówno do organizmów, jak i komórek. Kariotyp tworzą dwa rodzaje chromosomów: chromosomy płci (u człowieka chromosom X i Y) oraz autosomy (chromosomy niezależne od płci) (ryc. III.5.5.). Identyczne pod względem kształtu w parze chromosomy określamy jako **homologiczne**. Organizmy w zależności od etapu cyklu rozwojowego lub rodzaju komórek mogą zawierać pojedynczy zestaw (garnitur) chromosomów – **liczbę haploidalną (1n)**, podwójny zestaw chromosomów – **liczbę diploidalną (2n)** lub **zwielokrotniony ponad dwukrotnie – liczbę poliploidalną (np. 3n, 4n)**. Każda komórka somatyczna (budująca ciało) człowieka ma 46 chromosomów (2n). Tylko gamety – komórka jajowa i plemnik mają zredukowaną liczbę chromosomów do połowy – 23 (1n), tak aby w wyniku procesu zapłodnienia (połączenia komórki jajowej z plemnikiem) utworzyły komórkę diploidalną (2n).

◀ kariotyp

komórki
haplo-, diplo-
i poliploidalne

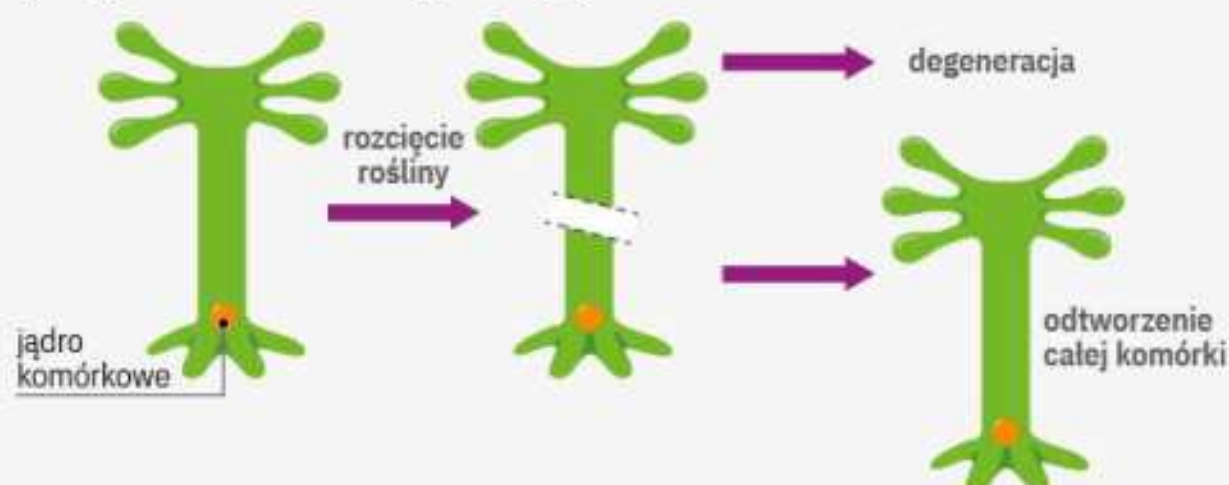


Ryc. III.5.5. Kariotyp człowieka składa się z 22 par chromosomów homologicznych oznaczonych numerami od 1 do 22. Ostatnią parę stanowią chromosomy płci – X i Y. Mężczyźni mają chromosom Y dziedziczony po ojcu i chromosom X po matce; kobiety mają dwa chromosomy X.

U ludzi i większości zwierząt wielokomórkowych w cyklu rozwojowym dominuje faza diploidalna. Spotykamy również organizmy, u których obie fazy są w równowadze, i takie, u których dominuje faza haploidalna lub są wyłącznie diploidalne. Przykłady takich organizmów zostaną przedstawione w następnych rozdziałach podręcznika poświęconych zagadnieniom z botaniki i zoologii.

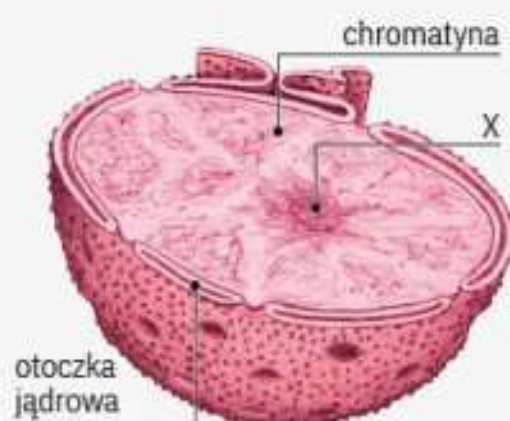
ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, w jaki sposób jądro komórkowe przechowuje informację genetyczną.
2. Określ, jakie znaczenie mają pory jądrowe w otoczce jądrowej.
3. Wyjaśnij różnice w znaczeniu określeń „komórki bezjądrowe” i „komórki bezjądrzaste”. Podaj przykłady.
4. Przedstaw budowę chromosomu metafazowego.
5. Wyjaśnij, jaką funkcję pełni jąderko – nieoblioniona struktura jądra komórkowego.
6. Na rysunku przedstawiono uproszczony schemat doświadczenia, w którym wykorzystano jednokomórkowy glon *Acetabularia mediterranea*. Glon ten jest jedną wielką komórką zbudowaną z chwytника, trzonka i kapelusza. Jądro komórkowe znajduje się w chwytniku. Glon ten odznacza się dużymi właściwościami regeneracyjnymi.



Gdy odetniemy kapelusz, po pewnym czasie odrasta nowy. Wyjaśnij, dlaczego tak się dzieje.

7. Na rysunku przedstawiono budowę jądra komórkowego.



- 7.1. Podaj nazwę struktury oznaczonej X. Wyjaśnij, jaką funkcję pełni ta struktura.
- 7.2. Określ, który rodzaj chromatyny jest aktywny genetycznie.

7.3. Oceń prawdziwość stwierdzeń odnoszących się do budowy jądra komórkowego. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Pory jądrowe w otoczce jądrowej umożliwiają transport substancji między jądrem a cytoplazmą.	...
2. Chromatyna jądrowa składa się przede wszystkim z RNA związanego z białkami histonowymi.	...
3. Błona wewnętrzna otoczki jądrowej jest gładka, a zewnętrzna połączona z rybosomami.	...

8. Prawie wszystkie komórki mają jedno jądro komórkowe. Ale znane są organizmy, w komórkach których znajdują się dwa lub więcej jąder.

8.1. Podaj przykłady organizmów o dwóch jądrach komórkowych.

8.2. Wyjaśnij określenie komórczak. Podaj przykłady.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Jądro komórkowe** stanowi centrum zarządzania komórki. ◀ s. 124
- Najczęściej występuje w komórce jedno jądro, ale bywają **komórki dwujądrowe i wielojądrowe**. ◀ s. 124
- W niektórych wyspecjalizowanych komórkach ze względu na pełnione funkcje **jądro komórkowe zanika**. ◀ s. 124
- Jądro komórkowe jest otoczone podwójną błoną – otoczką jądrową z **porami jądrowymi**. ◀ s. 125
- Wnętrze jądra wypełnia **sok jądrowy**, w którym jest zanurzona chromatyna zbudowana z DNA, RNA, białek histonowych i niehistonowych. ◀ s. 124
- Obecne w jądrze komórkowym **jaderko** odpowiada za syntezę rybosomowego RNA (rRNA) i podjednostek rybosomów. ◀ s. 126
- Chromatyna przed podziałem jądra komórkowego ulega kondensacji, tworząc **chromosomy**. ◀ s. 126
- **Chromosomy są zróżnicowane** ze względu na wielkość, położenie centromeru czy występowanie satelit. ◀ s. 126
- Kompletny zestaw chromosomów danego organizmu nazywamy **kariotypem**. ◀ s. 127
- Pojedynczy zestaw chromosomów mają **komórki haploidalne**, podwójny – komórki **diploidalne**, a zwiększony ponad dwukrotnie – komórki **poliploidalne**. ◀ s. 127

6. Cytoplazma – wewnętrzne środowisko komórki

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, co wchodzi w skład cytoplazmy;
- poznasz budowę cytoszkieletu;
- dowiesz się, co jest możliwe dzięki ruchom cytozolu.

Wnętrze komórki poza jądrem komórkowym wypełnia cytoplazma. **Składa się z:**

cytoplazma podstawowa

- **cytoplazmy podstawowej** (cytozolu), czyli wodnego koloidu zawierającego białka, aminokwasy, lipidy, kwasy tłuszczowe, sole mineralne (m.in. wapnia Ca^{2+} , magnezu Mg^{2+} , sodu Na^+);
- **organelli komórkowych.**

Przez cytoplazmę podstawową następuje transport wielu związków chemicznych między organellami komórkowymi. W obszarze całej cytoplazmy zachodzą ważne reakcje biochemiczne, m.in. pierwszy etap oddychania komórkowego (glikoliza) czy biosynteza białka.

Składniki cytoszkieletu

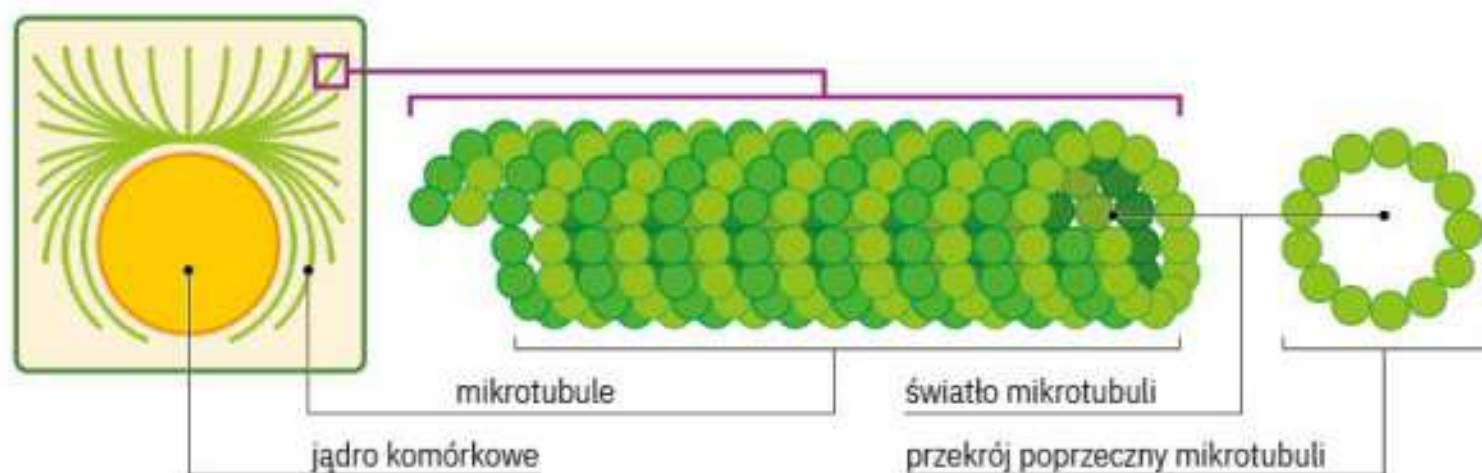
Cytozol komórek eukariotycznych nie stanowi jednolitego roztworu związków chemicznych. Występują w nim przechodzące w różnych kierunkach długie i cienkie włókna białkowe. Tworzą one przestrzenny układ mikrotubul, filamentów aktynowych (mikrofilamentów) i filamentów pośrednich. Ten system włókien białkowych nazywamy cytoszkieletem. **Cytoszkielet** jest strukturą bardzo dynamiczną. Odpowiada za utrzymanie lub zmianę kształtu komórki. Dzięki cytoszkieletowi komórki mogą być elastyczne i zdolne do wykonywania ruchów.

cytoszkielet

mikrotubule

- **Mikrotubule**

To dynamiczne struktury w postaci długich, pustych rurek, których ściany zbudowane są z 13 kolumn cząsteczek. Białka budujące mikrotubule to bardzo podobne, globularne białka: α -tubulina i β -tubulina. Łączą się one, tworząc dimery. W wyniku przyłączania dimerów tubuliny do końców mikrotubul następuje ich wydłużanie, a przez odrywanie dimerów następuje ich skracanie. Średnica mikrotubul wynosi 25 nm. Struktury te odpowiadają m.in. za ruch chromosomów podczas podziału jądra komórkowego czy organelli komórkowych (np. pęcherzyków wydzielniczych, mitochondriów), a także całej komórki (składniki wici i rzęsek). Mikrotubule nadają kształt komórkom, szczególnie zwierzęcym, które są pozbawione sztywnej ściany komórkowej. W komórkach zwierzęcych i niektórych grzybów mikrotubule powstają w centrosomie, czyli nieobłonionym obszarze cytoplazmy znajdującym się blisko jądra komórkowego (ryc. III.6.1.).

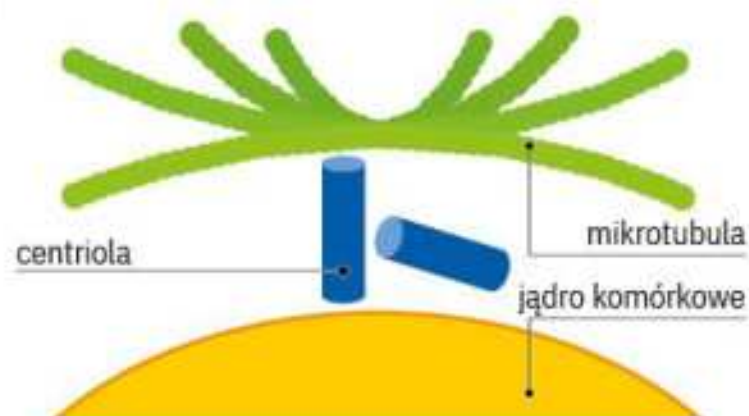


Ryc. III.6.1. Mikrotubule.

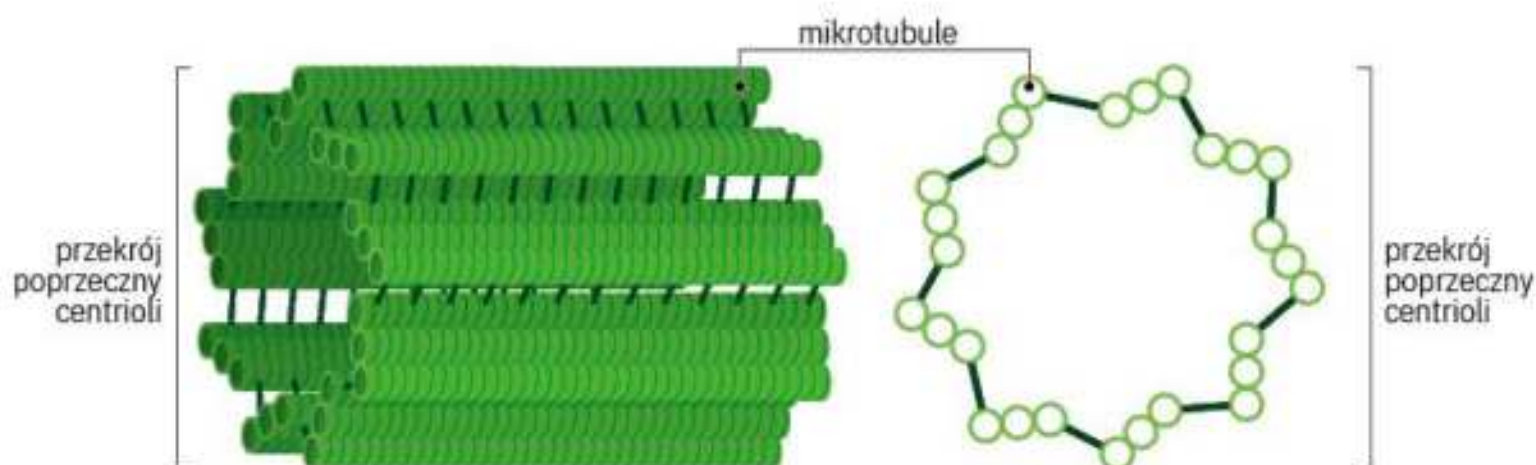
Centrosom składa się z pary centrioli i substancji białkowej, z której podczas interfazy (fazy między kolejnymi podziałami komórkowymi) wyrastają liczne mikrotubule (**ryc. III.6.2.**). Mikrotubule uczestniczą w odciąganiu chromosomów podczas podziału komórki, tworząc wrzeciono kariokinetyczne (podziałowe). Przed podziałem komórkowym centrosom ulega podwojeniu. W wyniku tego powstają dwa centrosomy (każdy z dwiema centriolami), które wędrują do przeciwnych biegunów komórki.

Centriole składają się z dziewięciu zestawów mikrotubul, z których każdy posiada trzy mikrotubule (**ryc. III.6.3.**). Razem tworzą pierścień.

W skład centrioli oprócz białek wchodzi także DNA i RNA. Ich obecność pozwala na powielanie się centrioli przed podziałem komórki niezależnie od jądra komórkowego.

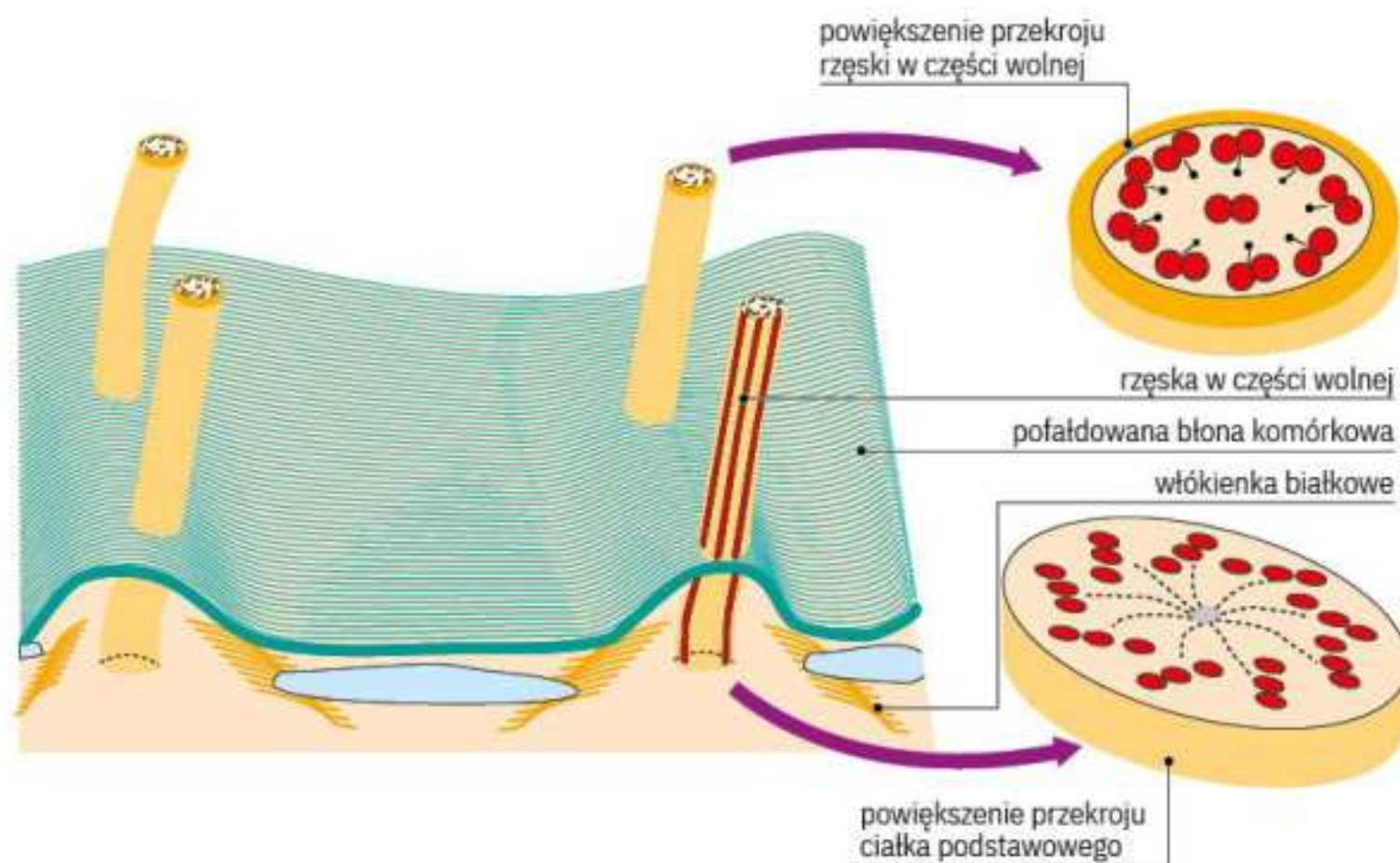


Ryc. III.6.2. Schemat centrosomu.



Ryc. III.6.3. Schemat budowy centrioli: przekrój poprzeczny i podłużny.

Mikrotubule budują także ruchliwe wyrostki: wici i rzęski. Są to cylindryczne wypustki cytoplazmatyczne otoczone błoną komórkową. Wici są długie, ale występują zwykle pojedynczo lub po kilka, natomiast rzęski są krótkie i jest ich wiele. Plan budowy tych struktur u wszystkich organizmów eukariotycznych jest taki sam (ryc. III.6.4.).

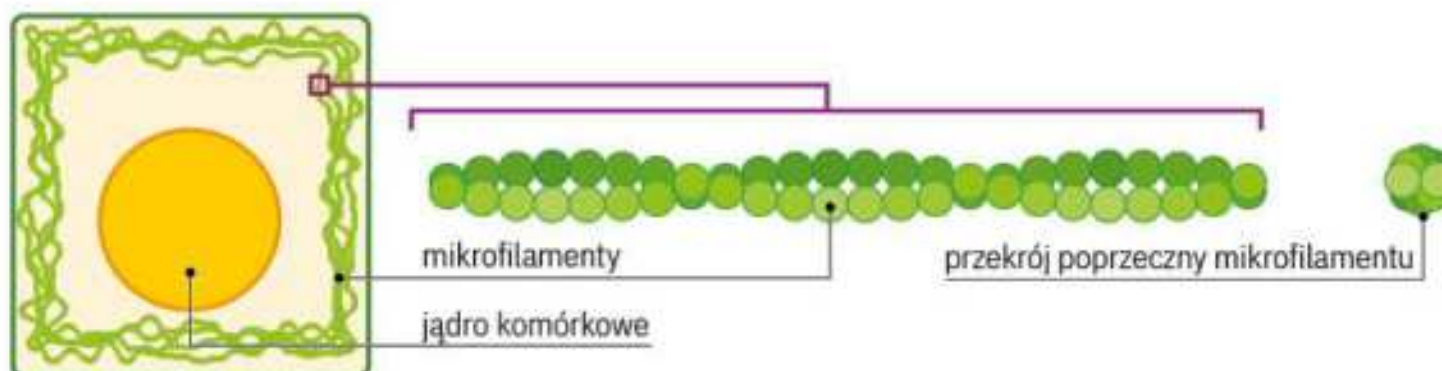


Ryc. III.6.4. Model przekroju poprzecznego wici i rzęski.

W przekroju poprzecznym wici i rzęski dziewięć par mikrotubul koncentrycznie otacza dwie pojedyncze mikrotubule centralne (układ $9 \times 2 + 2$). Całość jest okryta wypustką błony komórkowej. Natomiast ciało podstawowe (kinetosom) ma budowę podobną do centrioli (dziewięć tripletów mikrotubul).

mikrofilamenty ► ■ **Filamenty aktynowe (mikrofilamenty)**

To cienkie struktury o średnicy 7 nm. Zbudowane są z dwóch splecionych łańcuchów białka globularnego aktyny. Łącząc się z białkiem miozyną, uczestniczą w skurczu włókien i komórek mięśniowych. Mikrofilamenty odpowiadają za utrzymanie kształtu komórki, ponieważ łączą się z białkami błony komórkowej i budują warstwę szkieletową pod błoną. W związku z tym największe zagęszczenie mikrofilamentów obserwujemy pod błoną komórkową. Jednocześnie decydują one o zmianach kształtu komórki poprzez tworzenie pseudopodiów (wypustek) podczas ruchu komórek ameboidalnych czy wpukleń błony komórkowej podczas pobierania cząsteczek na drodze fagocytozy. Mikrofilamenty podczas podziału komórek zwierzęcych tworzą pierścień zaciskowy, który umożliwia rozdzielenie cytoplazmy do komórek potomnych.

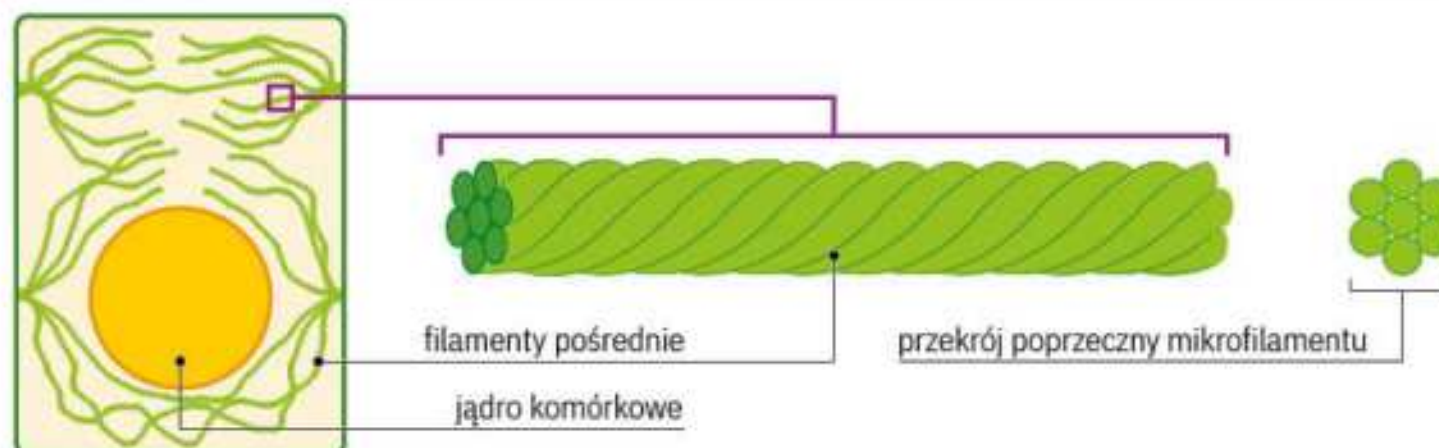


Ryc. III.6.5. Filamenty aktynowe.

■ Filamenty pośrednie

◀ filamenty pośrednie

Filamenty pośrednie stanowią najbardziej stabilne elementy cytoszkieletu. Są to mocne, elastyczne włókna, podobne do sznurów, o średnicy około 10 nm. Budują je różne białka fibrylarne, np. keratyna, desmina, lamina. Znajdują się w całej cytoplazmie komórki, tworząc gęstą sieć otaczającą jądro komórkowe i przebiegającą aż do biegunów komórki. Dzięki takiej budowie zapewniają komórce wytrzymałość na rozciąganie (przenoszą siły mechaniczne działające w komórce). Dlatego filamenty pośrednie są dobrze rozwinięte w komórkach nabłonka, które są szczególnie narażone na urazy mechaniczne. Filamenty pośrednie wzmacniają również otoczkę jądra komórkowego oraz komórki nerwowe (tzw. neurofilamenty) i mięśniowe.

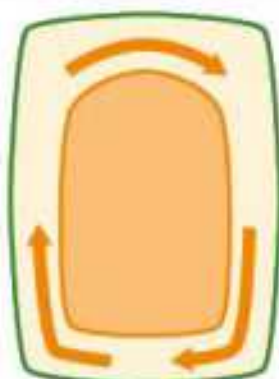


Ryc. III.6.6. Filamenty pośrednie.

Ruch cytozolu

◀ ruch cytozolu

Cytozol komórek eukariotycznych dzięki obecności cytoszkieletu może wykonywać ruchy wewnątrzkomórkowe. Pozwalają one na transport substancji wewnątrz komórki i przemieszczanie się organelli komórkowych. Ruchy cytozolu umożliwiają także wymianę substancji między komórką a środowiskiem wewnątrzkomórkowym. Szczególnie dobrze widoczne są ruchy w komórkach roślinnych, w których obserwujemy przemieszczanie się chloroplastów zawieszonych w cytozolu (ryc. III.6.7.).



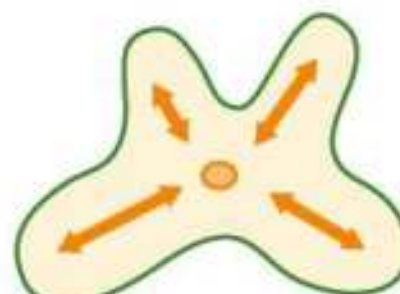
ruch rotacyjny

Cytozol przepływa w jednym kierunku, dookoła zazwyczaj centralnie położonej wakuoli.



ruch cyrkulacyjny

Zachodzi zazwyczaj w komórkach, w których znajduje się kilka mniejszych wakuol. Ruch cytozolu zachodzi między wakuolami.



ruch pulsacyjny

Cytozol przepływa raz w jednym, raz w drugim kierunku wokół wakuoli.

Ryc. III.6.7. Rodzaje ruchów w komórkach roślinnych.

Obserwacja

Obserwacja ruchu cytozolu w komórkach liścia moczarki kanadyjskiej

Aby zaobserwować ruch cytozolu w komórkach liścia moczarki kanadyjskiej, przed wykonaniem preparatu mikroskopowego należy okazy rośliny oświetlać żarówką o mocy 100 W z odległości ok. 30–40 cm przez mniej więcej 1 godzinę. Ruch cytozolu odbywa się najintensywniej w temperaturze 25–30°C.

Przygotuj preparat mikroskopowy z liścia moczarki pochodzącego ze szczytowej części łodygi. Pod mikroskopem obserwuj ruch chloroplastów wraz z cytozolem.

Na podstawie obserwacji wykonaj w zeszycie rysunki kilku komórek z chloroplastami. Na rysunku zaznacz kierunek ruchu cytozolu i określ jego rodzaj.



Ryc. III.6.8. Ruch cytozolu w komórkach, obraz mikroskopowy.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Sporządź w zeszycie tabelę, w której przedstawisz budowę i funkcje elementów cytoszkieletu.
2. Wyjaśnij podobieństwa i różnice między wiciami i rzęskami. Przedstaw ich funkcje.
3. Cytozol komórek eukariotycznych dzięki obecności cytoszkieletu może wykonywać ruchy wewnątrzkomórkowe. W komórkach roślinnych wyróżnia się ruch cytoplazmy: rotacyjny, cyrkulacyjny i pulsacyjny.

Przedstaw znaczenie ruchu cytoplazmy w komórkach roślinnych.



4. *Cytoskielet, czyli obecna w każdej komórce eukariotycznej wewnątrzkomórkowa sieć włókien (polimerów) białkowych, odgrywa zasadniczą rolę w utrzymaniu kształtu komórek, dynamice błon, transporcie wewnątrzkomórkowym i pozycjonowaniu organelli, polaryzacji komórek, ich ruchu i podziałach.*

H. Fabczak i in., *Cytoskielet i ruch komórki*, „Kosmos”, 2018, t. 67, nr 1, s. 13.

Rozpoznaj dwie funkcje, które w komórce pełnią mikrotubule.

- A. Budują organelle ruchu: wici i rzęski.
- B. Są odpowiedzialne za ruch pełzakowaty komórek.
- C. Umożliwiają skurcz komórek mięśnia poprzecznie prążkowanego.
- D. Pozwalają na zachowanie kształtu komórki.
- E. Umożliwiają rozdzielenie chromosomów w trakcie podziału jądra komórkowego.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Cytoplazma składa się z **cytoplazmy podstawowej** (cytozolu) – koloidalnego roztworu i zawieszonych w nim **organelli komórkowych**. ◀ s. 130
- W cytoplazmie komórek eukariotycznych występuje **cytoskielet** – struktura utworzona z białkowych filamentów: mikrotubul, mikrofilamentów i filamentów pośrednich. ◀ s. 130
- **Mikrotubule** uczestniczą w ruchach organelli komórkowych i całej komórki. ◀ s. 130
- **Mikrofilamenty** są odpowiedzialne za różne ruchy komórek, a filamente pośrednie pełnią funkcję podporową komórki. ◀ s. 132

7. System wewnątrzkomórkowych błon plazmatycznych

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz struktury wewnętrzne błon plazmatycznych;
- dowiesz się, jaką funkcję pełni siateczka śródplazmatyczna;
- poznasz budowę i funkcje aparatu Golgiego oraz lizosomów.

System wewnątrzkomórkowych błon plazmatycznych jest w komórce odpowiedzialny za syntezę oraz transport białek i lipidów wewnątrz komórki lub poza nią, a także za detoksykację trucizn. Tworzą go: siateczka śródplazmatyczna (retikulum endoplazmatyczne), rybosomy, aparaty Golgiego, lizosomy, peroksosomy i glioksosomy.

◀ system błon plazmatycznych

► Siateczka śródpłazmatyczna

Siateczka śródpłazmatyczna (retikulum endoplazmatyczne, ER) przyjmuje kształt sieci błonowych rurek i spłaszczonych pęcherzyków (cystern). Rozciągają się one niemal na całym obszarze komórki aż po błonę zewnętrzną otoczki jądrowej. Siateczka śródpłazmatyczna występuje we wszystkich komórkach mających jądro komórkowe z wyjątkiem plemników i erytrocytów ssaków. Wyróżniamy dwa rodzaje siateczki: **szorstką i gładką**, różniące się budową i pełnioną funkcją. Pomimo tych różnic oba rodzaje siateczki są ze sobą połączone.

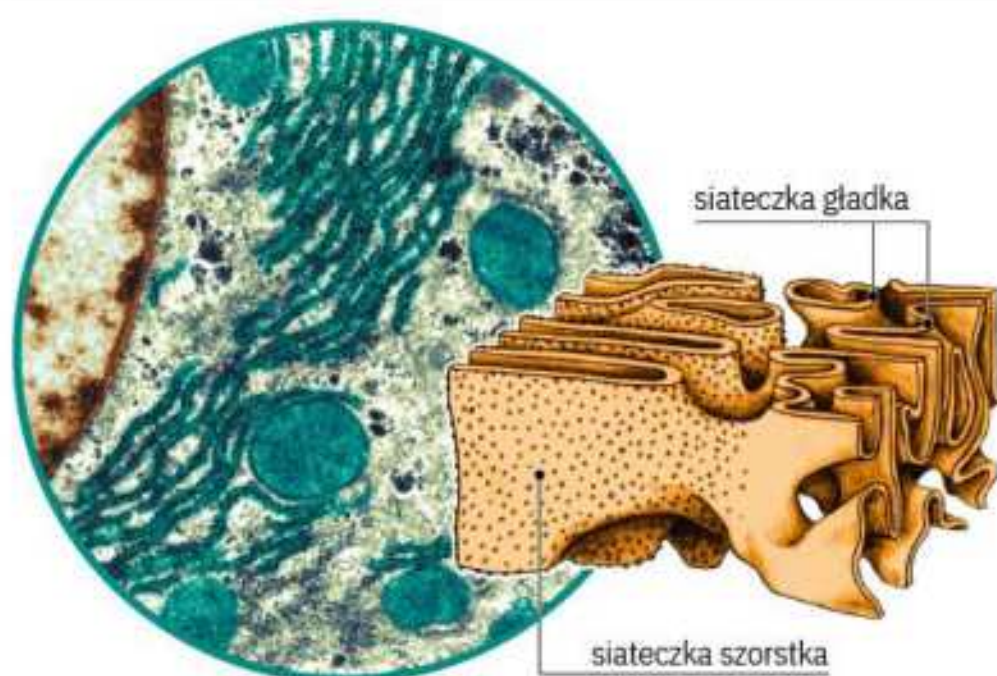
siateczka
gładka

► **Siateczka gładka (SER)** jest utworzona z rurek, których zewnętrzna powierzchnia nie łączy się z rybosomami (**ryc. III.7.1.**). Zachodzi w niej synteza lipidów i związków lipopodobnych (w tym kwasów tłuszczowych, fosfolipidów i steroidów). W związku z tym siateczka gładka występuje licznie w komórkach gruczołów zwierząt produkujących hormony płciowe (jądra i jajniki) czy w komórkach kory nadnerczy, gdzie są wydzielane różne hormony steroidowe. Uczestniczy także w neutralizowaniu (detoksykacji) używek i toksyn (m.in. alkoholu, pestycydów, szeregu leków, trucizn), dlatego licznie występuje w komórkach wątroby.

siateczka
szorstka

► **Siateczka szorstka (RER)** ma postać spłaszczonych woreczków, na których zewnętrznej powierzchni znajdują się rybosomy (**ryc. III.7.1.**). Rybosomy związane z siateczką szorstką nazywamy związanymi dla odróżnienia wolnych rybosomów rozmieszczonych w cytozolu. Siateczka szorstka bierze udział w syntezie i przemianach metabolicznych białek przeznaczonych w komórce na eksport (np. enzymy trawienne), a także białek błonowych. W związku z tym siateczka obficie występuje w komórkach intensywnie produkujących białka wydzielane poza komórkę, np. w komórkach nabłonka gruczołowego trzustki (wydzielają enzymy trawienne) czy w komórkach ślinianek (wydzielają enzym amylazę ślinową). W siateczce szorstkiej białka wcześniej utworzone na rybosomach ulegają także modyfikacji (dołączenie węglowodanów, uzyskanie odpowiedniej struktury przestrzennej) i dostają się do lizosomów jako białka enzymatyczne.

Oba rodzaje siateczki śródpłazmatycznej dzielą obszar komórki na przedziały (rejony subkomórkowe), w których mogą jednocześnie zachodzić różne rodzaje procesów metabolicznych, np. syntezy i rozkładu.



Ryc. III.7.1. Mikrofotografia i model przestrzenny siateczki śródpłazmatycznej.

Specyficzne formy siateczki śródplazmatycznej

Retikulum endoplazmatyczne jako całość może przyjmować formę charakterystyczną dla określonych typów komórek.

W ciele komórek nerwowych siateczka wraz z wolnymi rybosomami tworzy **tigroidy** (tzw. ciała Nissla). W miejscach tych zachodzi synteza białka.

W komórkach mięśniowych siateczka gładka nazywa się **retikulum sarkoplazmatycznym**. W niej są magazynowane jony wapnia Ca^{2+} , których uwolnienie stanowi sygnał dla zainicjowania skurczu mięśnia.

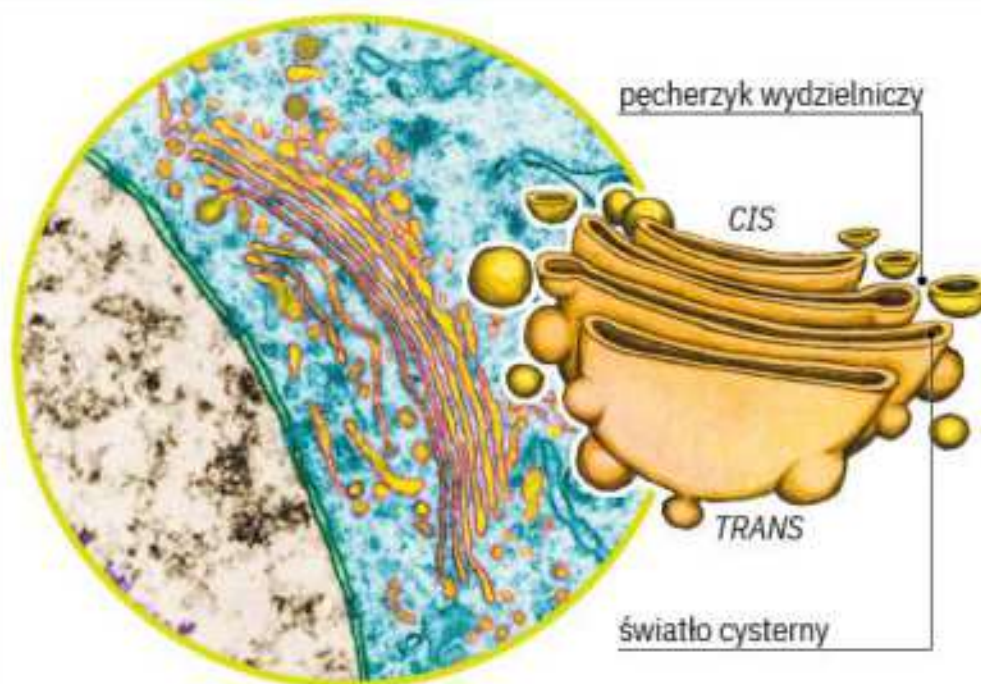
W komórkach olbrzymich szpiku kostnego ssaków (tzw. megakariocytach) z retikulum gładkiego są zbudowane **blony demarkacyjne**, które oddzielają od siebie powstające płytki krwi.

Aparat Golgiego

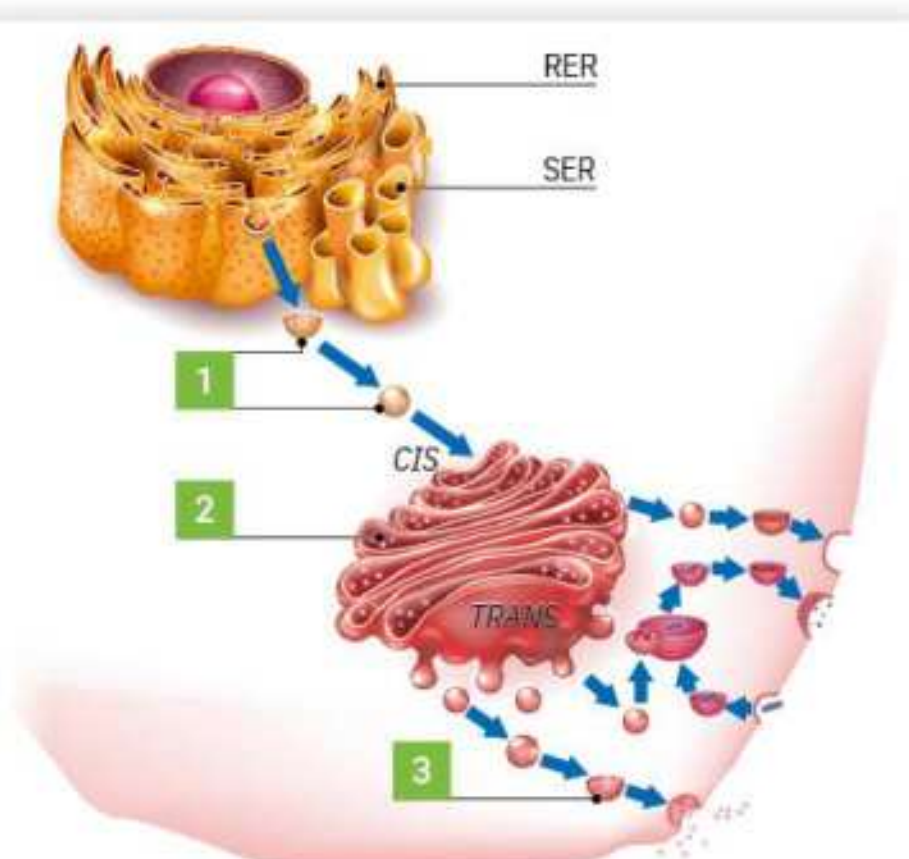
aparat
Golgiego

Powstałe w siateczce śródplazmatycznej substancje są transportowane w formie pęcherzyków m.in. do aparatu (układu) Golgiego (**ryc. III.7.2.**). Aparat Golgiego składa się ze stosu łukowato wygiętych, nakładających się na siebie spłaszczonych woreczków – cystern (**diktiosomu**) zbudowanych z błon siateczki gładkiej. Wokół spłaszczonych cystern aparatu są rozmieszczone oddzielające się niewielkie pęcherzyki. Aparaty Golgiego łączą się bezpośrednio z siateczką śródplazmatyczną i zwykle są luźno rozmieszczone w cytoplazmie. Struktury te znajdują się tylko w komórkach eukariotycznych. Liczba aparatów w komórce wynosi od jednego do kilkuset. Występują licznie w komórkach wydzielniczych, np. w komórkach trzustki.

W stosie cystern wyróżnia się dwie strefy (powierzchnie): **wejściową (cis)** oraz **wyjściową (trans)**. Strefa *cis* aparatu znajduje się najbliżej siateczki śródplazmatycznej, a strefa *trans* skierowana jest ku błonie komórkowej (**ryc. III.7.3.**). Do strefy *cis* dostają się pęcherzyki transportujące powstałe z siateczki śródplazmatycznej. Następnie błona pęcherzyków ulega zlaniu z błoną cysterny strefy *cis* aparatu. W dalszej części następuje modyfikacja transportowanych substancji. Modyfikacja białek polega na przyłączaniu do nich reszt fosforanowych (**proces fosforylacji**) i cukrowych (**proces glikozylacji**, podczas którego powstają glikoproteiny).



Ryc. III.7.2. Mikrofotografia i model przestrzenny aparatu Golgiego.



Ryc. III.7.3. Schemat syntezy i modyfikacji białek wydzielanych przez komórkę: (1) synteza białek na rybosomach siateczki szorstkiej, wstępna modyfikacja w kanałach siateczki gładkiej i zamknięcie cząsteczek białka w pęcherzykach transportujących, odrywających się od siateczki, (2) zlewanie się pęcherzyków transportujących z błoną aparatu Golgiego (strefa *cis*), dalsza modyfikacja białek (w procesie fosforylacji i glikolizacji), sortowanie do miejsc przeznaczenia, (3) powstanie pęcherzyków wydzielniczych odrywających się od aparatu Golgiego (strefa *trans*) wędrujących w kierunku błony komórkowej, po zlaniu z którą zawartość jest usuwana na zewnątrz komórki w procesie egzocytozy.

W strefie *trans* następuje pakowanie cząsteczek zmodyfikowanych białek do pęcherzyków wydzielniczych odrywających się od aparatu Golgiego. Wędrują one przez cytozol w kierunku błony komórkowej, z którą się zlewają, uwalniając zawartość na zewnątrz komórki (proces egzocytozy). Niektóre z pęcherzyków transportują białka do odpowiednich struktur komórki, np. lizosomów, czy zostają wbudowane w błonę komórkową.

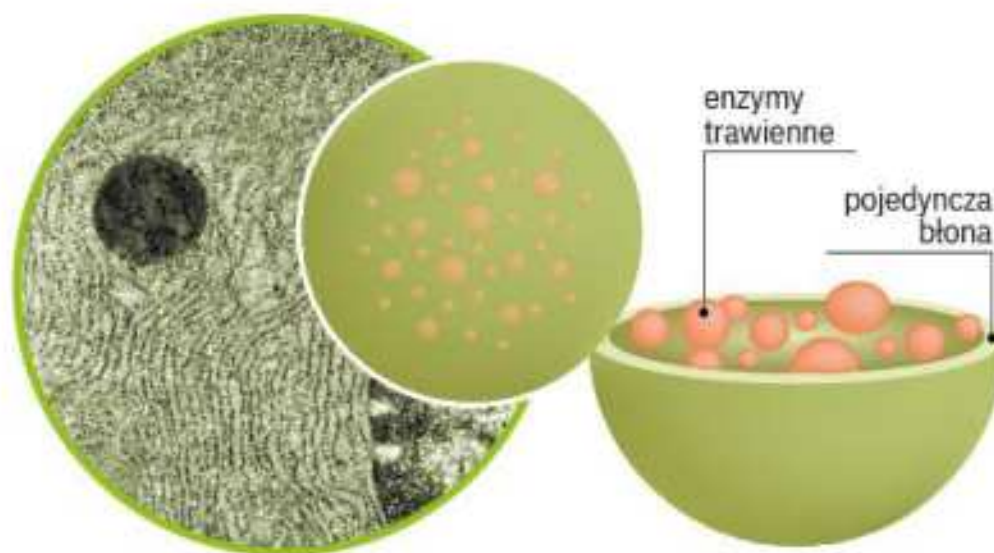
Aparat Golgiego jest odpowiedzialny także za syntezę niektórych makrocząsteczek. W komórkach roślinnych w aparacie następuje synteza polisacharydów wykorzystywanych przez komórkę do budowy ściany komórkowej, a w komórkach zwierzęcych – mukopolisacharydów (cukrów) chrząstki.

Aparat Golgiego bierze również udział w powstaniu akrosomu plemnika, czyli części jego główki, która dzięki obecności enzymów hydrolitycznych rozpuszcza osłonkę komórki jajowej i pozwala na wniknięcie plemnika. Z odrywających się pęcherzyków aparatu powstają lizosomy.

lizosomy ► **Lizosomy**

Lizosomy to małe, kuliste pęcherzyki, otoczone pojedynczą błoną (**ryc. III.7.4.**). Występują tylko w komórkach eukariotycznych i uczestniczą w nich w **trawieniu wewnątrzkomórkowym**. Ich liczba jest zależna od typu komórki i wynosi od jednego do kilkuset lizosomów w cytozolu komórki (np. w komórkach żernych – makrofagach układu odpornościowego człowieka). Lizosomy zawierają enzymy trawienne (hydrolityczne), które rozkładają wchłonięte przez komórkę na drodze endocytozy substancje (białka, lipidy, kwasy nukleinowe, polisacharydy) i toksyny oraz organizmy patogenne czy zużyte lub uszkodzone organelle komórkowe. Enzymy lizosomalne najlepiej działają w środowisku lekko kwaśnym (pH około 5). Uwolnienie ich do cytozolu nie grozi komórce samostrawieniem, ponieważ odczyn cytozolu jest obojętny. Uzyskane w wyniku trawienia w lizosomach końcowe produkty mogą być transportowane do cytozolu i ponownie wykorzystywane przez komórkę do nowych syntez lub usuwane. Dzięki lizosomom komórka stale odnawia swoje

struktury (**zjawisko autofagii**). Enzymy hydrolityczne, takie jak w lizosomach komórek zwierzęcych, zawierają niektóre wakuole komórek roślinnych i grzybowych. W komórkach roślinnych biorą one udział w trawieniu wewnątrzkomórkowym, a w komórkach grzybów wydzielają enzymy trawienne na zewnątrz i uczestniczą w **trawieniu zewnątrzkomórkowym**.



Ryc. III.7.4. Mikrofotografia i model przestrzenny lizosomu.

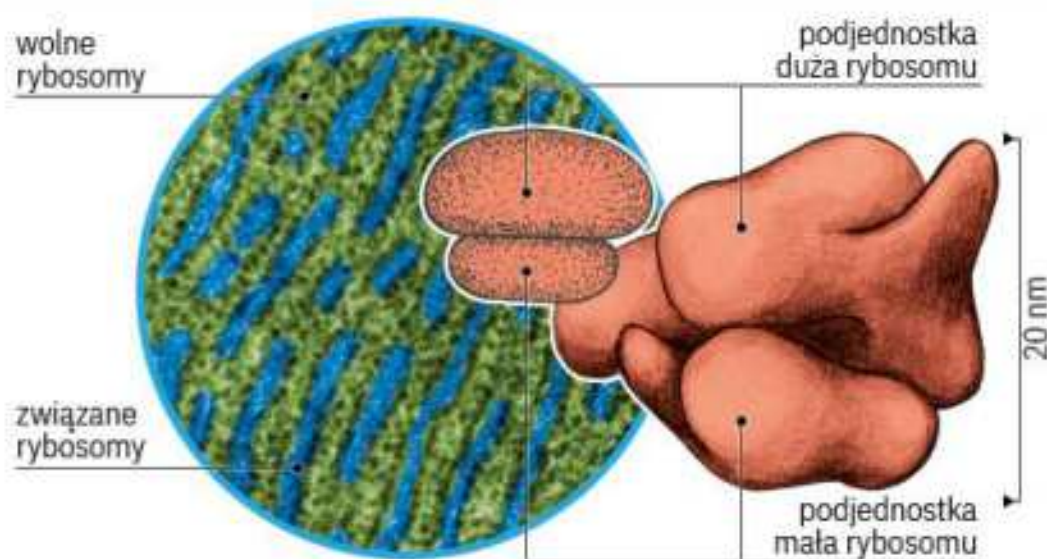
Peroksysomy i glioksysomy – mikrociałka

Peroksysomy to małe, otoczone pojedynczą błoną organelle komórkowe. Występują w komórkach roślinnych i zwierzęcych. Biorą udział w procesach utleniania biologicznego. Peroksysomy zawierają enzymy, które katalizują reakcje metaboliczne przenoszenia wodoru z różnych substratów na tlen. Jako produkt uboczny tych reakcji powstaje nadtlenek wodoru (H_2O_2). Związek ten może być wykorzystywany przez peroksysomy do neutralizowania niektórych substancji. Natomiast nadmiar nadtlenku wodoru, szkodliwy dla komórki, rozkładany jest przez peroksysomy za pomocą enzymu katalazy (do wody i tlenu). W komórkach wątroby ludzkiej peroksysomy neutralizują alkohol etylowy (utleniają go do aldehydu octowego) i inne toksyczne związki. Niektóre peroksysomy rozkładają kwasy tłuszczowe na mniejsze cząsteczki, które następnie są wykorzystywane przez mitochondria jako paliwo organiczne w procesie oddychania komórkowego.

Peroksysomy roślin stanowią organelle strukturalnie podobne do peroksysomów zwierząt. W komórkach roślin wyróżniono dwie klasy peroksysomów: peroksysomy liści i glioksysomy. Peroksysomy liści łącznie z chloroplastami i mitochondriami biorą udział w procesie **fotorespiracji**.

Kiedy z kiełkujących nasion rozwinię się liścienie, a komórki zyskują zdolność do przeprowadzania fotosyntezy, glioksysomy przekształcają się w peroksysomy.

Rybosomy są strukturami nieotoczonymi błoną, w których zachodzi synteza białek. Liczba rybosomów w komórce jest dość duża (od kilku do kilku milionów) i zależy od tempa syntezy białka, np. w komórce ludzkiej trzustki znajduje się ich kilka milionów. Rybosomy występują w dwóch częściach komórki: w cytozolu jako wolne struktury lub związane z błonami siateczki śródplazmatycznej czy błonami jądrowymi. Na **rybosomach wolnych** zachodzi synteza większości białek spełniających określone funkcje w cytoplazmie, np. enzymów wewnątrzkomórkowych, białek cytoszkieletu. Natomiast **rybosomy związane z błonami** syntetyzują białka budujące błony biologiczne, białka przeznaczone do określonych organelli czy na eksport z komórki, np. hormony białkowe, kolagen czy enzymy lizosomalne. Dlatego w komórkach ludzkiej trzustki, które wydzielają enzymy trawienne, liczba rybosomów związanych z błonami jest duża.



Ryc. III.7.5. Mikrofotografia komórek trzustki z rybosomami wolnymi i związanymi z błonami oraz schemat budowy rybosomu.

Pojedynczy rybosom, zarówno wolny, jak i związany z błonami, przypomina kształtem spłaszczony grzybek (**ryc. III.7.5.**). Składa się z dwóch podjednostek: małej i dużej, zbudowanych z rybosomalnego kwasu rybonukleinowego (rRNA) i białek.

Rozmiary rybosomów określamy na podstawie współczynnika sedymentacji (tzw. stałej sedymentacji Svedberga), czyli szybkości opadania cząstek w roztworze podczas wirowania. Jednostką współczynnika sedymentacji jest swedberg, który oznaczamy w skrócie literą S ($1 \text{ swedberg} = 10^{-13} \text{ s}$). Wielkość współczynnika sedymentacji zależy m.in. od masy i kształtu cząsteczek, które są poddawane wirowaniu.

W komórce eukariotycznej poza rybosomami wolnymi i związanymi z błonami określanymi mianem rybosomów cytoplazmatycznych występują również **rybosomy w mitochondriach i chloroplastach**. W komórkach prokariotycznych rybosomy występują tylko w cytozolu. Cytoplazmatyczne rybosomy komórek eukariotycznych są nieco większe od prokariotycznych, mitochondrialnych i plastydowych (**tab. III.7.1.**).

rybosomy
w mitochondriach
i chloroplastach

Tab. III.7.1. Porównanie rybosomów prokariotycznych i eukariotycznych

Cecha		Komórka	
		prokariotyczna	eukariotyczna
stała sedymencacji	podjednostki małej	30S	40S
	podjednostki dużej	50S	60S
	rybosomu	70S	80S

duża podjednostka

50S
60S

mała podjednostka

30S
40S

→

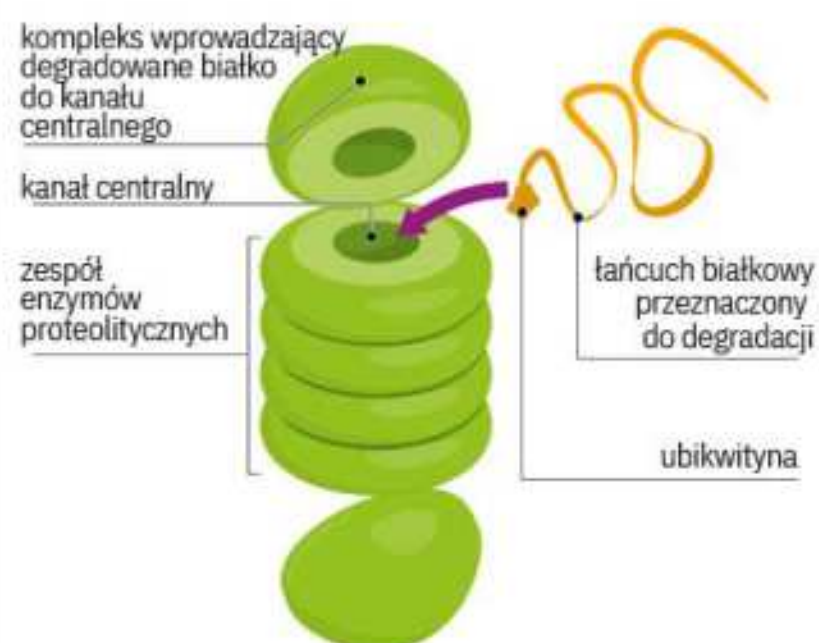
70S
80S

miejsce w komórce	w cytozolu	• związane z błonami siateczki śródplazmatycznej i błonami jądrowymi • wolne w cytoplazmie • w mitochondriach i chloroplastach małe rybosomy (tzw. prokariotyczne)
-------------------	------------	--

Proteasom

◀ proteasomy

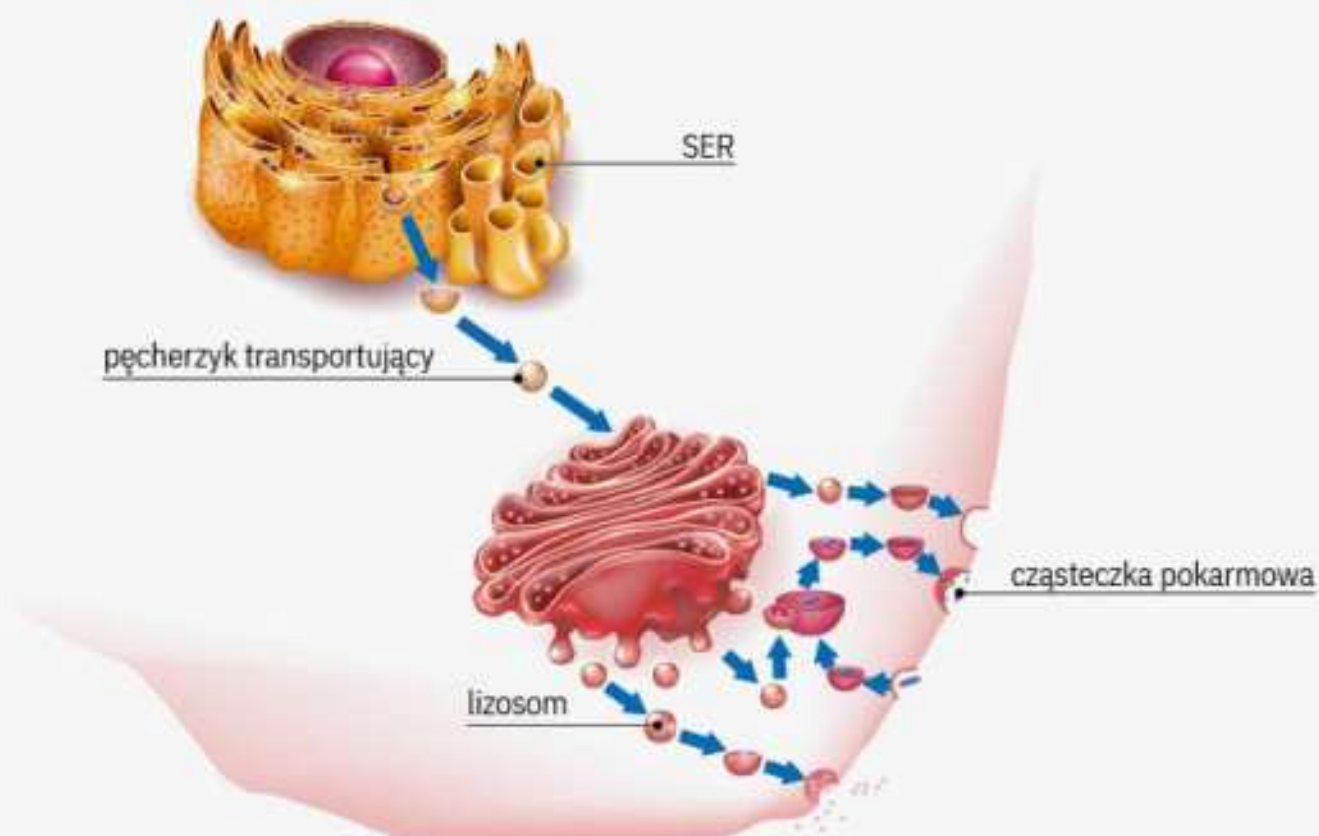
W rozkładzie białek w komórce oprócz lizosomów uczestniczą także proteasomy. **Proteasom** kształtem przypomina cylinder, na którego końcach znajdują się kompleksy białkowe (**ryc. III.7.6.**). Są one odpowiedzialne za dostarczenie białek do rozkładu. Natomiast część środkową proteasomu stanowią kompleksy enzymów proteolitycznych (enzymy z klasy hydrolaz rozkładające wiązania peptydowe łączące aminokwasy w białkach). Białka przeznaczone do degradacji łączą się z białkiem **ubikwityną** (małocząsteczkowe białko, które u organizmów eukariotycznych naznacza białka przeznaczone do degradacji poza lizosomami) i w takiej postaci zostają poddane działaniu enzymów proteolitycznych.



Ryc. III.7.6. Schemat budowy proteasomu.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wykaż różnice w budowie i funkcjach siateczki śródplazmatycznej szorstkiej i gładkiej.
2. Przedstaw etapy transportu białek syntetyzowanych na błonach szorstkiej siateczki śródplazmatycznej, uwzględniając ich syntezę, dojrzewanie, modyfikację i sortowanie przez aparat Golgiego oraz transport do określonych części komórki.
3. Wytłumacz, w jaki sposób komórka zabezpiecza się przed samostrawieniem.
4. Omów różnice w budowie i występowaniu rybosomów eukariotycznych i prokariotycznych.
5. Wyjaśnij podobieństwa i różnice w budowie i funkcjach peroksysomów i glioksysomów.
6. Na rysunku przedstawiono zależność między organellami systemu błon wewnątrzkomórkowych.



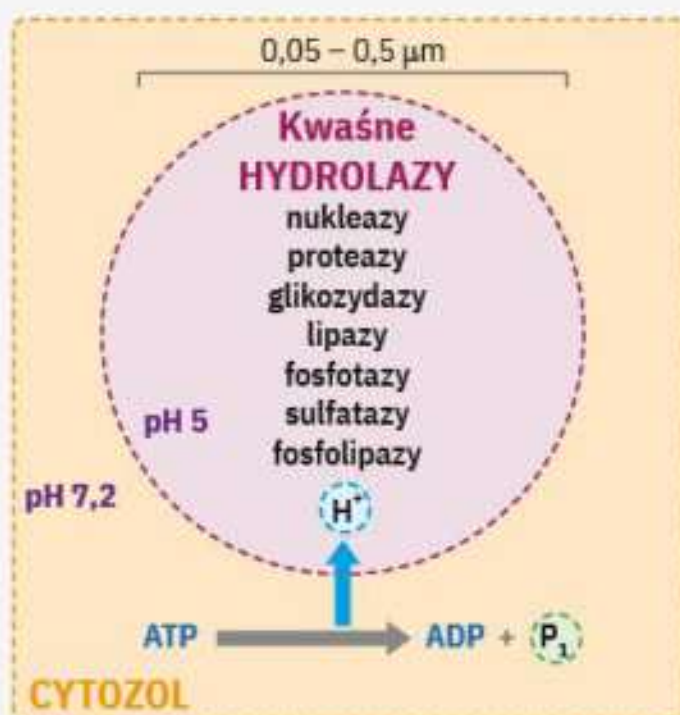
- 6.1. Wyjaśnij, jaką funkcję w przedstawionym procesie pełnią lizosomy.
- 6.2. Wytłumacz, na czym polega współdziałanie retikulum endoplazmatycznego szorstkiego i aparatu Golgiego.
7. Wybierz zdanie, które zawiera poprawną informację dotyczącą rybosomów.
 - A. Rybosomy są strukturami otoczonymi błoną, w których zachodzi synteza białek.
 - B. Rybosomy występują tylko w cytozolu komórki.
 - C. Pojedynczy rybosom składa się z dwóch podjednostek: malej i dużej, zbudowanych z rybosomalnego kwasu rybonukleinowego (rRNA) i białek.
 - D. Rybosomy występują tylko w komórkach eukariotycznych.

8. Lizosomy to małe kuliste pęcherzyki otoczone pojedynczą błoną komórkową. Występują tylko w komórkach eukariotycznych i uczestniczą w trawieniu wewnątrzkomórkowym dzięki enzymom hydrolitycznym, które rozkładają substancje wchłonięte przez komórkę na drodze endocytozy.

Schemat przedstawia budowę lizosomu.

8.1. Wyjaśnij, w jaki sposób lizosom zapewnia wewnątrz niskie pH.

8.2. Wymień trzy związki chemiczne, które są trawione przez przedstawiony lizosom.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- W obszarze cytoplazmy jest rozmieszczony **system błon biologicznych** – siateczka śródplazmatyczna i aparat Golgiego. ◀ s. 135
- **Siateczka śródplazmatyczna** dzieli cytoplazmę podstawową na przedziały, co zapewnia rozdział procesów metabolicznych. ◀ s. 136
- **Siateczka gładka** (bez rybosomów) bierze udział w syntezie lipidów i procesach detoksykacji, a **szorstka** w przyczepionych do jej powierzchni rybosomach syntetyzuje i transportuje białka. ◀ s. 136
- **Aparat Golgiego**, zbudowany ze spłaszczonych cystern, odpowiada za syntezę cukrów i modyfikację białek wydzielniczych. ◀ s. 137
- Białka przeznaczone na eksport są syntetyzowane w **rybosomach** siateczki szorstkiej, następnie wędrują do kanałów siateczki gładkiej, gdzie podlegają wstępnej modyfikacji. Dalej zapakowane w pęcherzyki wędrują do aparatu Golgiego, gdzie po końcowej modyfikacji odrywają się od błon aparatu i są usuwane na zewnątrz komórki w procesie egzocytozy. ◀ s. 140
- **Lizosomy i peroksysomy** są małymi strukturami otoczonymi pojedynczą błoną komórkową. Lizosomy zawierają enzymy trawienne, które rozkładają makrocząsteczki, zużyte struktury komórkowe czy cząsteczki pobrane przez komórkę na drodze endocytozy. Peroksysomy są odpowiedzialne za procesy utleniania biologicznego. W komórkach roślin wyodrębniono dwie klasy peroksysomów: peroksysomy liści (uczestniczą w fotooddychaniu) i glioksysomy (przekształcające tłuszcze w cukry u roślin oleistych). ◀ s. 138
- **Rybosomy** to struktury nieotoczone błoną komórkową. Są zbudowane z rRNA i białka. Występują związane z siateczką śródplazmatyczną lub luźno rozmieszczone w cytoplazmie komórki. Zachodzi w nich synteza białek. ◀ s. 140
- W komórkach eukariotycznych obok rybosomów cytoplazmatycznych wyróżniamy **rybosomy mitochondriów i chloroplastów**, których wielkość jak taka sama, jak rybosomów komórek prokariotycznych ◀ s. 140
- Białka są degradowane w lizosomach lub w kompleksach enzymów proteolitycznych, tzw. **proteasomach**. ◀ s. 141

8. Organelle komórkowe otoczone dwiema błonami

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz budowę i właściwości mitochondrium;
- dowiesz się, jak są zbudowane i jakie funkcje pełnią plastydy;
- poznasz teorię endosymbiozy.

Mitochondria i plastydy są organellami otoczonymi dwiema błonami komórkowymi. Zachodzą w nich procesy związane z przetwarzaniem energii w komórce. Energia, z której korzysta komórka, ma postać energii chemicznej zawartej w cząsteczkach substancji pokarmowych lub energii świetlnej. Aby komórka mogła z niej korzystać, musi ją przekształcić w bardziej dostępną dla siebie formę. Mitochondria występują we wszystkich komórkach eukariotycznych, a plastydy tylko w komórkach roślin oraz protistów roślinnych.

mitochondria ► Mitochondria

Mitochondria są organellami odpowiadającymi za oddychanie komórkowe – proces metaboliczny, podczas którego przy udziale tlenu, cukrów, tłuszczów i innych substratów energetycznych powstaje energia chemiczna zmagazynowana w **wysoko-energetycznych wiązaniach adenozynotrójfosforanu** (ATP). Szczegółowo proces oddychania będzie omówiony w rozdziale *Metabolizm komórkowy*.

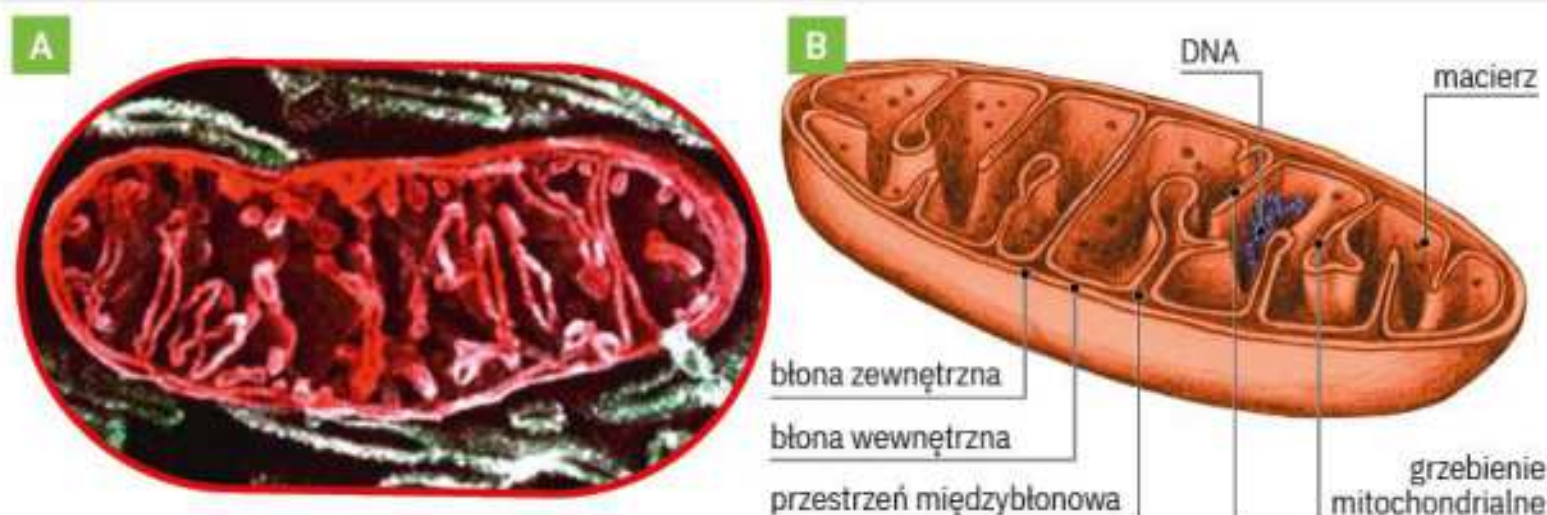
liczba
mitochondriów
w komórce

► **Liczba mitochondriów** zależy od zapotrzebowania komórki na energię. W komórkach o dużej aktywności metabolicznej, np. mięśniowych czy nerwowych, może ich być ponad 1000. Stosunkowo niewiele mitochondriów znajduje się w komórkach kości czy chrząstki, a nie ma ich w erytrocytach człowieka i innych ssaków. Mitochondria mogą zmieniać swoje kształty i rozmiary, a także położenie w komórce. Ułatwia to bezpośrednie dostarczenie energii w postaci ATP do odpowiedniego regionu komórki, np. w plemniku znajdują się w witce, która wprowadza go w ruch. Brak ruchu mitochondriów obserwuje się tylko w komórkach mięśni szkieletowych i mięśniu serca.

budowa
mitochondrium

► **Budowa mitochondrium** wynika z funkcji, jakie te organelle pełnią. To owalne lub cylindryczne struktury otoczone dwiema błonami. Błona zewnętrzna jest gładka i przepuszczalna dla wielu substancji drobnocząsteczkowych i jonów. Błona wewnętrzna jest pofałdowana i tworzy tak zwane **grzebienie mitochondrialne**, które zwiększają jej powierzchnię (**ryc. III.8.1.**). Na grzebieniach mitochondrialnych znajdują się enzymy uczestniczące w przekształcaniu energii cząsteczek substancji pokarmowych w energię zmagazynowaną w ATP. Stopień pofałdowania ściśle wiąże się z zapotrzebowaniem komórki na energię. Błona wewnętrzna jest nieprzepuszczalna głównie dla jonów, a swobodnie przechodzą przez nią gazy (O_2 , CO_2).

i woda. Dla wielu substancji transport przez błonę wewnętrzną wymaga obecności specyficznych przenośników błonowych. Między błoną zewnętrzną i wewnętrzną znajduje się przestrzeń międzybłonowa (perimitochondrialna). Wnętrze mitochondrium wypełnia koloidalna **macierz (łac. *matrix*) mitochondrialna**. Znajdują się w niej enzymy biorące udział w oddychaniu komórkowym (cykl Krebsa), jak również cząsteczki kolistego mitochondrialnego DNA (mtDNA), mitochondrialnego tRNA i rybosomy, w których zachodzi synteza części białek mitochondrialnych (pozostałe są syntetyzowane przez rybosomy cytoplazmatyczne). Kolisty DNA mitochondrialny stanowią około 1% całkowitej ilości DNA w komórce. Obecność w mitochondrium DNA i rybosomów pozwala na wzrost i podział tych organelli.



Ryc. III.8.1. Mikrofotografia (A) i model przestrzenny mitochondrium (B).

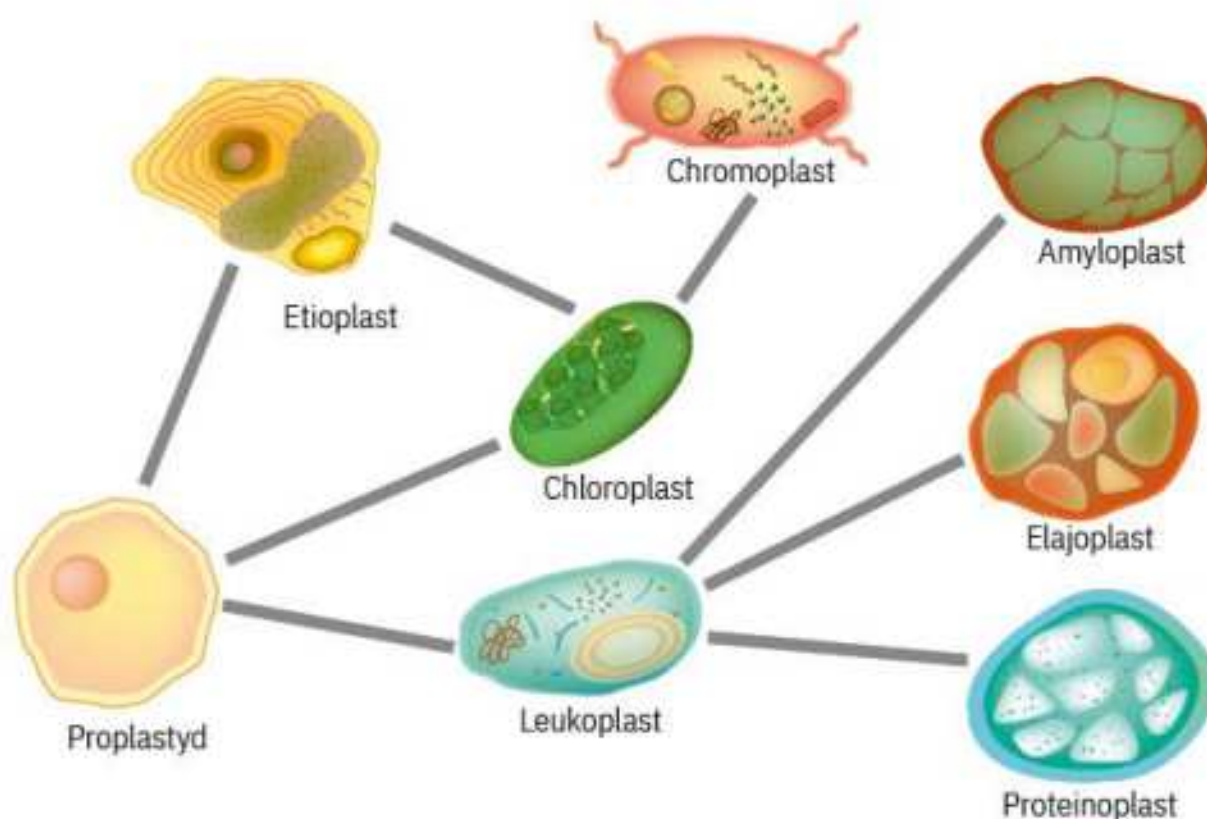
Plastydy

plastydy

Plastydy stanowią grupę struktur o zróżnicowanej budowie i funkcjach. Wszystkie plastydy są otoczone podwójną błoną komórkową, między którą występuje przestrzeń międzybłonowa, a ich wnętrze wypełnia macierz z kolistym DNA i rybosomami. Wspólną cechą, która je łączy, jest także pochodzenie. Wszystkie rodzaje plastydów powstają z form młodocianych zwanych proplastydami, które występują w słabo zróżnicowanych komórkach roślinnych, np. komórkach zarodka rośliny.

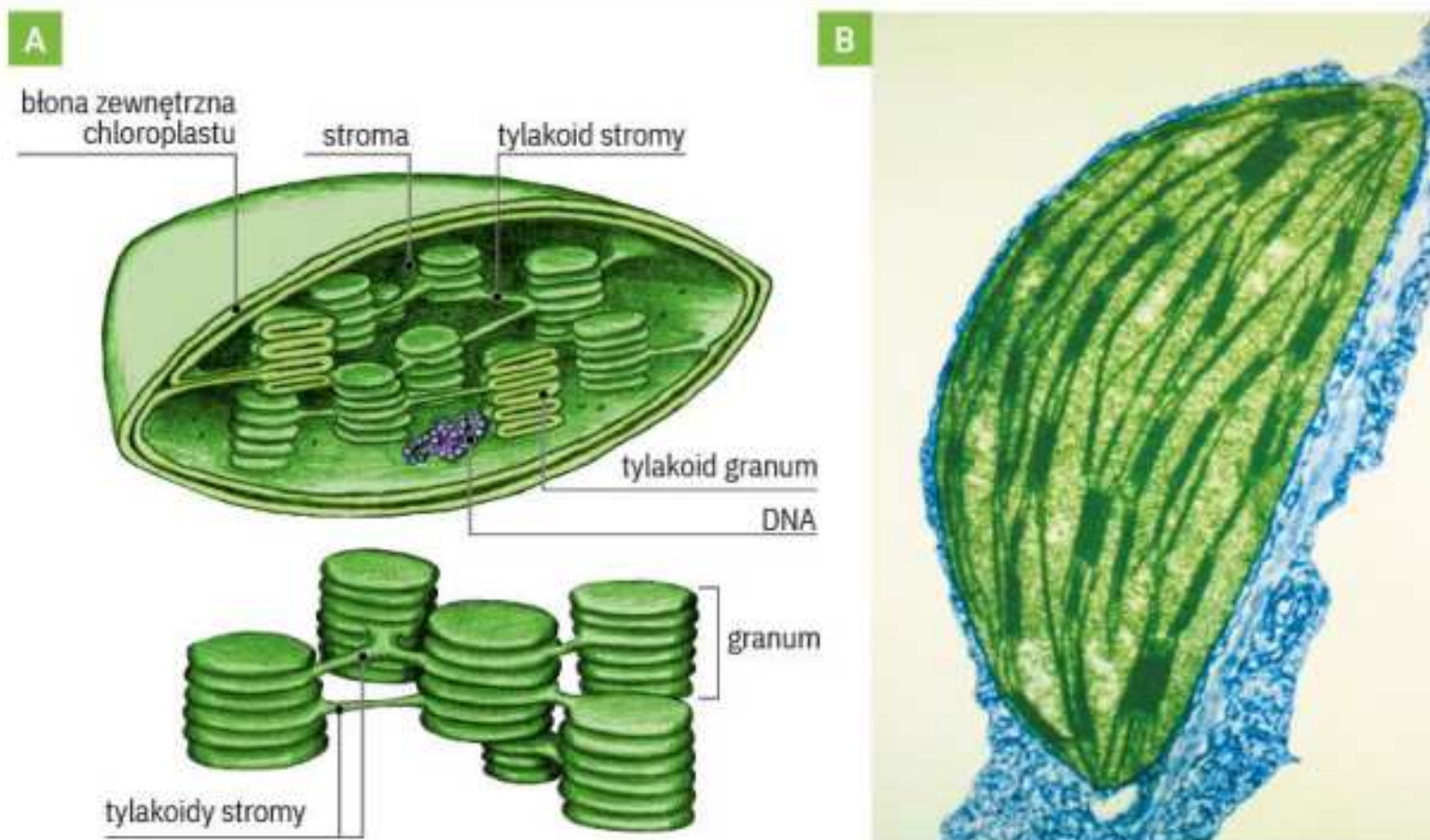
Plastydy dzielimy na dwie grupy: plastydy barwne, do których należą chloroplasty i chromoplasty, oraz plastydy bezbarwne, czyli etioplasty i leukoplasty. Poszczególne rodzaje plastydów w zależności od czynników zewnętrznych mogą przekształcać się w inne (**ryc. III.8.2.**). Chromoplasty mogą bezpośrednio powstawać z proplastydów i nadawać np. barwę płatkom kwiatów, a także z chloroplastów jako objaw ich degeneracji. Następuje wówczas rozkład chlorofilu, czego objawem jest żółknięcie liści i ujawnienie tłumionych przez ten barwnik karotenoidów: żółtych ksantofili i czerwono-pomarańczowych karotenów. Natomiast etioplasty powstają z proplastydów w komórkach, które zachowały zdolność do fotosyntezy, ale znajdują się w ciemności. Leukoplasty, magazynujące materiały zapasowe (proteinoplasty – białka, elajoplasty – tłuszcze, amyloplasty – skrobię), pod wpływem światła wykształcają barwniki asymilacyjne i tylakoidy, przekształcając się w chloroplasty.

podział plastydów



Ryc. III.8.2. Rodzaje plastydów i możliwości ich wzajemnego przekształcania się.

chloroplasty ► Najbardziej wyspecjalizowanymi plastydami są **chloroplasty**. Powstają z proplastydów na skutek działania światła. Chloroplasty mają kształt dysku i podobnie jak mitochondria są otoczone podwójną błoną białkową, między którą znajduje się przestrzeń międzybłonowa (ryc. III.8.3.).



Ryc. III.8.3. Model przestrzenny (A) i mikrofotografia (B) chloroplastu.

Błona zewnętrzna jest gładka i dobrze przepuszczalna w porównaniu z błoną wewnętrzną, słabo przepuszczalną i tworzącą system spłaszczonych woreczków zwanych **tylakoidami**. Tylakoidy mogą się układać jeden na drugim (tzw. grana) w stosy o różnej wysokości zwane **tylakoidami gran**, w których błony wbudowany jest zielony barwnik chlorofil oraz białka enzymatyczne. Drugim rodzajem tylakoidów są **tylakoidy stromy**, czyli długie, pojedyncze rurki łączące ze sobą tylakoidy gran. Wnętrze chloroplastu wypełnia koloidalna **stroma**, czyli macierz chloroplastu, w której znajdują się kolisty chloroplastowy DNA (chDNA), rybosomy oraz liczne enzymy.

tylakoidy

Chlorofil oraz enzymy stanowią układ pochłaniający energię słoneczną i przekształcający ją w energię chemiczną zgromadzoną w ATP. W chloroplastach dzięki tej przemianie zachodzi fotosynteza. Produktem ubocznym tego procesu jest tlen. Pierwszy etap fotosyntezy ma miejsce w granach, a drugi (faza ciemna) – w stromie. Oprócz chlorofilu w chloroplastach występują karotenoidy – żółte i pomarańczowe barwniki, które mają również zdolność do pochłaniania energii świetlnej.

Chloroplasty, podobnie jak mitochondria, mają zmienny kształt i są ruchliwymi organellami w komórce. Ich przemieszczanie związane jest z działaniem światła – gromadzą się w miejscach o małej intensywności nasłonecznienia, a rozpraszają się przy silnym nasłonecznieniu.

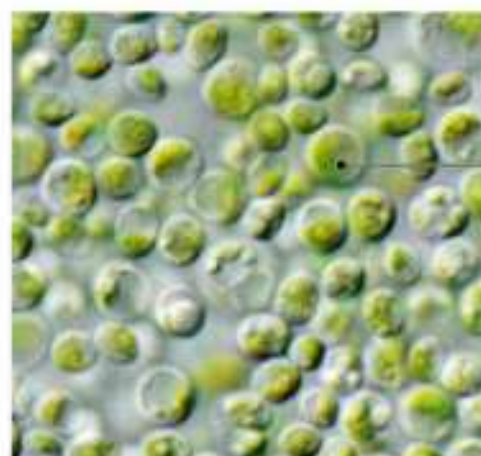
Obserwacja



1. Obserwacja chloroplastów w komórkach chlorelli

Z kawałka wilgotnej kory za pomocą igły preparacyjnej zdejmij niewielką ilość zielonego nalotu (skupiska chlorelli). Następnie przenieś go do kropli wody i igłą preparacyjną rozdrobnij nalot, aby oddzielić od siebie pojedyncze komórki. Wykonaj preparat mikroskopowy. Przeprowadź obserwację i wykonaj w zeszycie rysunek spod mikroskopu (**ryc. III.8.4.**).

Ryc. III.8.4. Chloroplasty
w komórkach chlorelli.

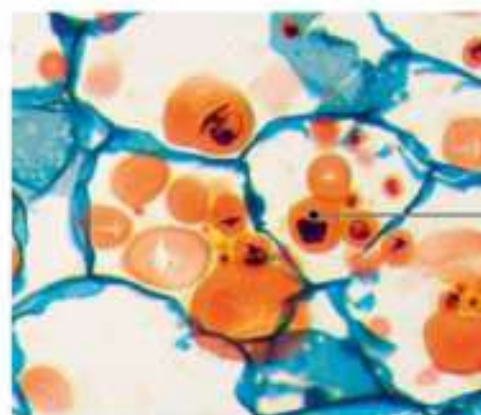


chloroplast

2. Obserwacja leukoplastów w bulwie ziemniaka

Wykonaj preparat mikroskopowy z miąższu bulwy ziemniaka. Przeprowadź obserwację i wykonaj w zeszycie rysunek spod mikroskopu (**ryc. III.8.5.**).

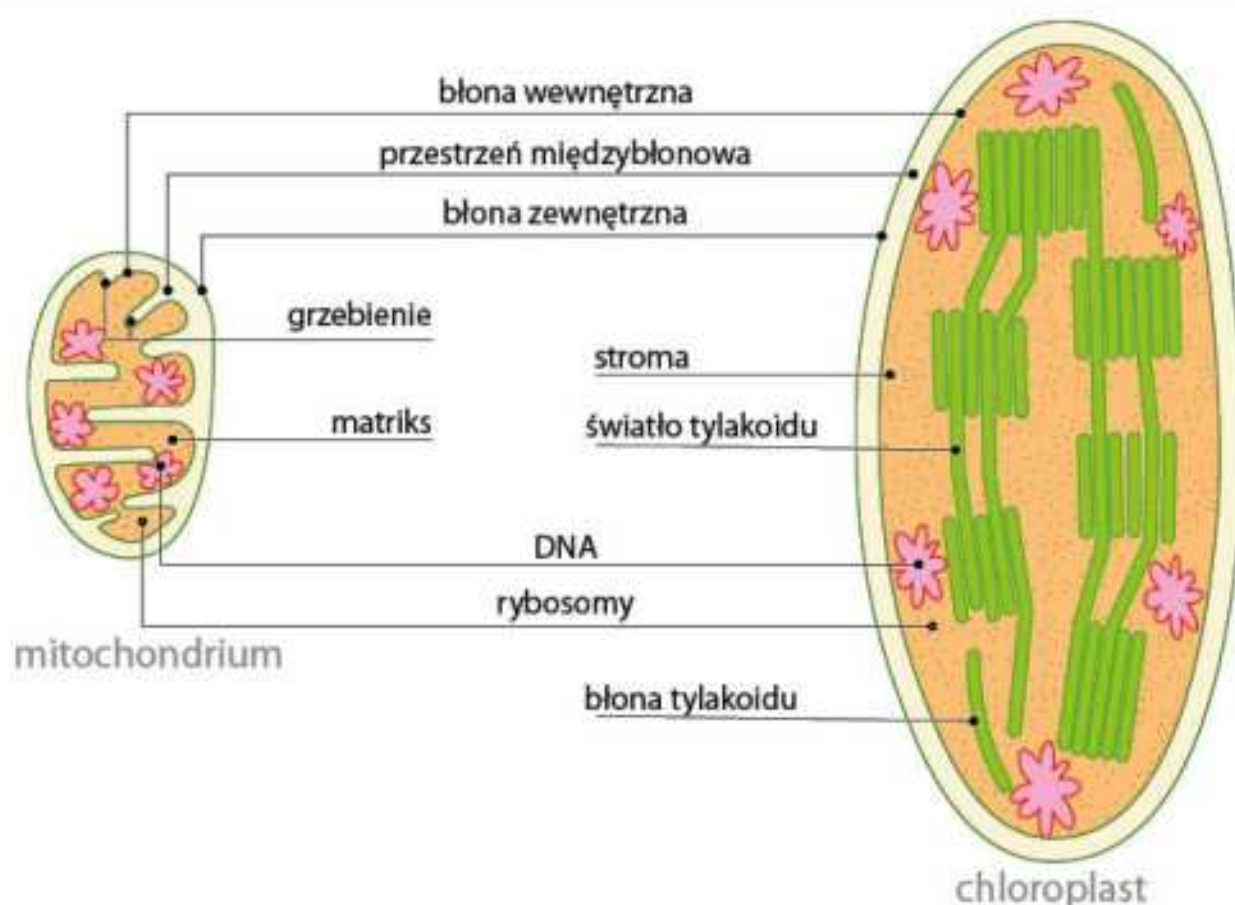
Ryc. III.8.5. Leukoplasty
w komórkach bulwy ziemniaka.



leukoplast

► Teoria endosymbiozy

Budowa mitochondriów i chloroplastów w komórce eukariotycznej wykazuje wiele podobieństw. Poza jądrem komórkowym są jedynymi organellami otoczonymi dwiema błonami komórkowymi. Mitochondria i chloroplasty są podobnej wielkości (ryc. III.8.6.).

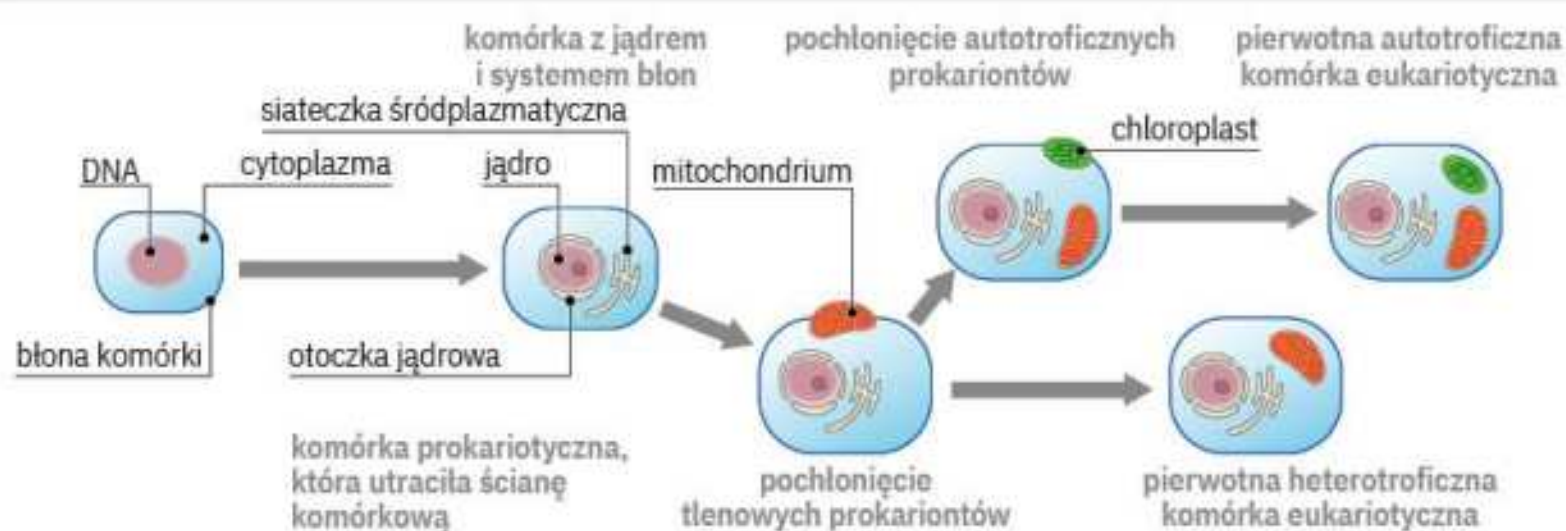


Ryc. III.8.6. Porównanie budowy mitochondrium i chloroplastów.

Obie struktury zawierają własny materiał genetyczny w postaci kolistej cząsteczki DNA oraz rybosomy mniejsze od rybosomów cytoplazmatycznych, co pozwala im na syntezę około 10% swoich białek. Mitochondria i chloroplasty mogą dzielić się niezależnie od podziałów komórki. Cechy te wyraźnie różnią mitochondria i chloroplasty od innych organelli komórkowych i dają im dużą autonomię w komórce. Dlatego obie organelle nazywamy **półautonomicznymi** (nie autonomicznymi, ponieważ nie wszystkie białka są syntetyzowane w mitochondriach i chloroplastach). Także procesy metaboliczne, które zachodzą w obu organellach, mają pewne cechy wspólne. W chloroplastach zachodzi fotosynteza, a w mitochondriach – oddychanie komórkowe. Podczas tych procesów dzięki systemowi przenośników wbudowanych w błony wewnętrzne obu organelli odbywa się transport elektronów prowadzący do powstania ATP.

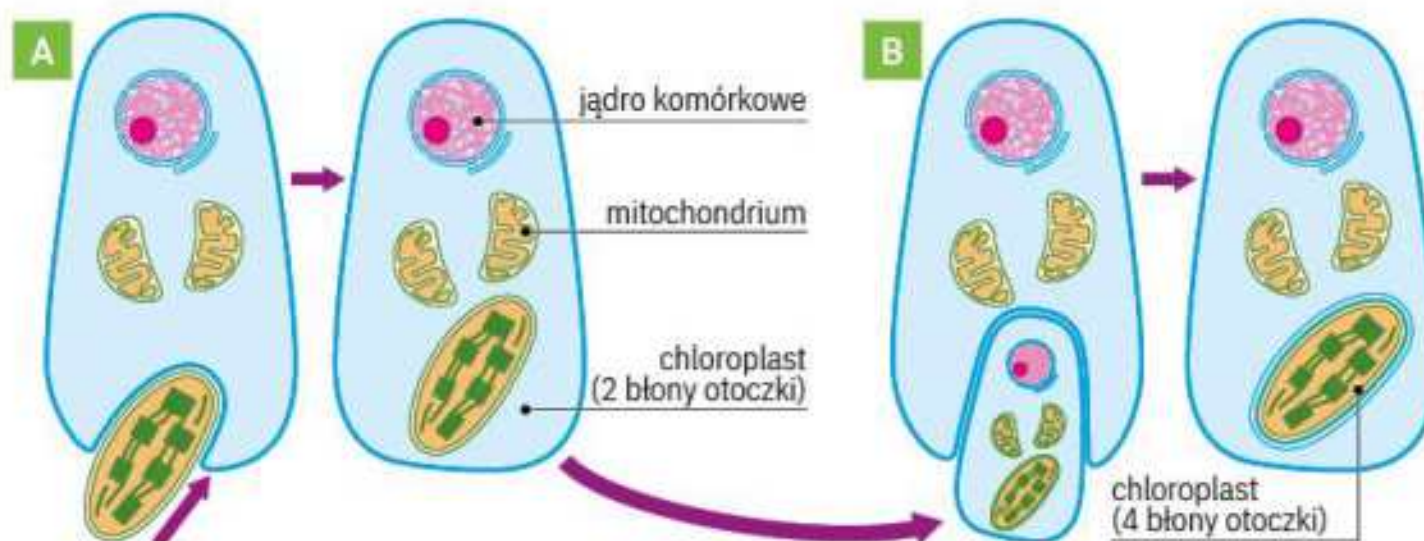
Mitochondria i chloroplasty przypominają jednokomórkowe organizmy prokariotyczne. Między innymi wskazują na to rybosomy mitochondrialne i chloroplastowe, które przypominają rybosomy komórek prokariotycznych. Także wielkość obu organelli jest podobna do organizmów prokariotycznych. Tłumaczy to **teoria endo-**

symbiozy (ryc. III.8.7.). Zgodnie z nią, mitochondria i chloroplasty pochodzą od samodzielnie żyjących komórek bakterii, które zostały wchłonięte półtora miliarda lat temu przez komórkę eukariotyczną na drodze fagocytozy i nie zostały strawione. Komórki te z komórką gospodarza (eukariotyczną) stworzyły specyficzny rodzaj symbiozy. Następnie na drodze ewolucji zaczęły przekazywać część materiału genetycznego do jądra komórki gospodarza, a same przekształciły się w organelle komórkowe. Świadczy o tym własny kolisty DNA niezwiązany z białkami histonowymi, rybosomy podobne wielkością do rybosomów prokariotycznych oraz obecność dwóch błon otaczających organelle, z których wewnętrzna przypomina budowę błonę komórkową bakterii, a zewnętrzna błonę komórki eukariotycznej. Uważa się, że jako pierwsze zostały wchłonięte bakterie purpurowe, które dały początek mitochondriom (a te cudzożywnym tlenowcom), a następnie sinice (cyjanobakterie), z których powstały chloroplasty (a z tych autotroficzne tlenowce).



Ryc. III.8.7. Schemat teorii endosymbiozy.

Uważa się, że chloroplasty krasnorostów i zielenic powstały podczas pojedynczej endosymbiozy określanej jako endosymbioza pierwotna (ryc. III.8.8.).



Ryc. III.8.8. Schemat endosymbiozy (A) pierwotnej, (B) wtórnej.

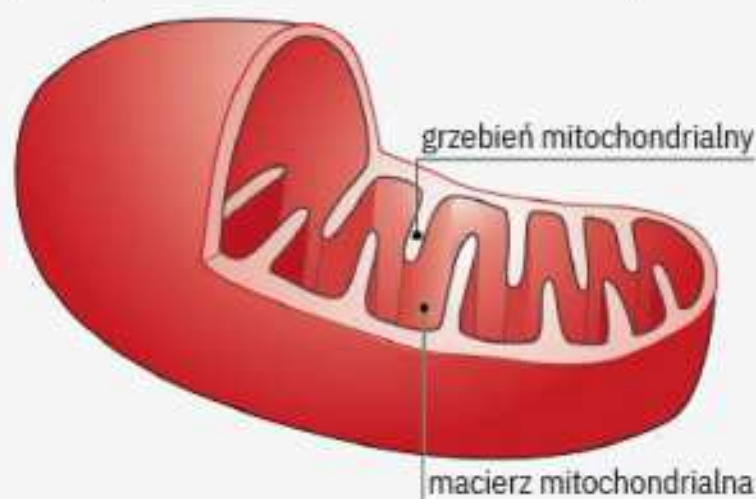
Podczas tego procesu wykształciły się chloroplasty otoczone podwójną błoną komórkową. Natomiast u protistów roślinnych chloroplasty powstały podczas endosymbiozy wtórnej. Prawdopodobnie przodkowie fotosyntetyzujących protistów wchłonęli na drodze fagocytozy całą komórkę eukariotyczną, która wcześniej wchłonęła bakterie fotosyntetyzujące. W związku z tym pojawiły się dodatkowe błony komórkowe otaczające chloroplast. Ewoluściści zakładają, że taki proces zachodził kilkakrotnie.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wykaż na podstawie budowy mitochondrium przystosowanie do pełnionej funkcji.
2. Wyjaśnij przyczynę różnicy liczby mitochondriów w komórkach kanalików nerkowych i w komórkach naskórka.
3. Określ, czy mitochondria są zdolne do syntezy białka.
4. Przedstaw przyczynę obecności trzech lub czterech błon komórkowych u protistów roślinnych.
5. Wskaż po jednym przykładzie roślin, które zawierają następujące rodzaje leukoplastów: amyloplasty, elajoplasty i proteinoplasty.
6. Wymień cechy mitochondriów i chloroplastów, które świadczą o ich niepełnej autonomii.
7. Podaj dowody, które wskazują na endosymbiotyczne pochodzenie mitochondriów i chloroplastów.
8. Rysunek przedstawia schemat budowy mitochondrium.

8.1. Wyjaśnij związek budowy mitochondrium z pełnioną funkcją w komórce.

8.2. Omów znaczenie różnicy w budowie błony mitochondrium w procesach metabolicznych komórki.

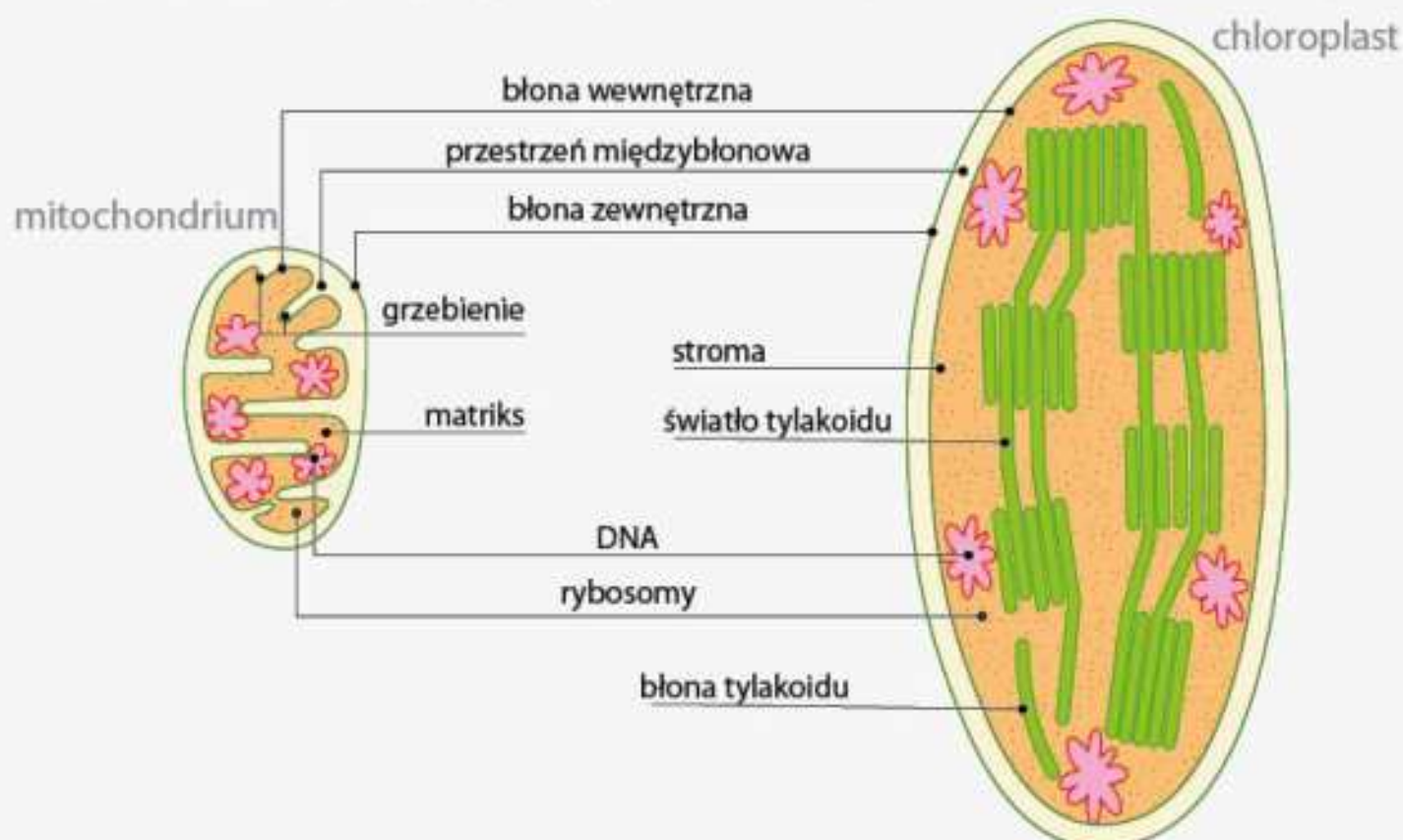


9. Mitochondria i chloroplasty są podobnej wielkości i przypominają jednokomórkowe organizmy prokariotyczne. Pochodzenie tych organeli tłumaczy **teoria endosymbiozy**.

Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń dotyczących endosymbiotycznego pochodzenia chloroplastów i mitochondriów. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Obecność kolistego DNA związanego z białkami histonowymi.	...
2. Otoczenie organeli dwiema (lub więcej w przypadku chloroplastów) błonami.	...
3. Podobieństwo strukturalne rybosomów chloroplastowych i mitochondrialnych do rybosomów eukariotycznych/ 80S.	...
4. Powstawanie mitochondriów i chloroplastów przez podział istniejących.	...

10. Budowa mitochondriów i chloroplastów w komórce eukariotycznej wykazuje wiele podobieństw. Poza jądrem komórkowym są jedynymi organellami otoczonymi dwiema błonami komórkowymi.



10.1. Uzasadnij stwierdzenie, że mitochondria i chloroplasty są organellami półautonomicznymi. Podaj trzy argumenty.

10.2. Porównaj znaczenie w procesach metabolicznych błony wewnętrznej mitochondrium i chloroplastów.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Mitochondria** stanowią centra energetyczne komórki. Zachodzi w nich oddychanie komórkowe, czyli utlenianie związków organicznych, podczas którego powstaje energia gromadzona w postaci ATP. ◀ s. 144
- **Liczba mitochondriów w komórce**, a także stopień pofałdowania ich błony wewnętrznej (tzw. grzebienie mitochondrialne) zależą od aktywności metabolicznej komórki. ◀ s. 144
- Mitochondria są **otoczone dwiema błonami komórkowymi**, mają własny materiał genetyczny w postaci kolistego DNA i rybosomów. ◀ s. 144
- **Plastydy** są organellami występującymi w komórkach roślin i protistów roślinnych. Podobnie jak mitochondria, są otoczone dwiema błonami komórkowymi i mają własny materiał genetyczny w postaci kolistego DNA i rybosomów. ◀ s. 145
- **Plastydy dzielimy na** proplastydy, leukoplasty, chromoplasty, chloroplasty i etioplasty. W chloroplastach zachodzi fotosynteza, czyli przekształcanie energii świetlnej w energię chemiczną nowo powstających związków organicznych. ◀ s. 145
- Chloroplasty i mitochondria są **organellami półautonomicznymi** ze względu na obecność materiału genetycznego w postaci DNA i rybosomów, dzięki któremu syntetyzują część swoich białek. ◀ s. 148
- Pochodzenie chloroplastów i mitochondriów wyjaśnia **teoria endosymbiozy**. ◀ s. 148

9. Organelle właściwe tylko dla niektórych typów komórek. Połączenia między komórkami

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz budowę i funkcje wakuoli;
- poznasz budowę i funkcje ściany komórkowej;
- dowiesz się, jakie połączenia występują między komórkami.

składniki plazmatyczne

- W budowie komórki wyróżniamy dwa rodzaje składników: **składniki plazmatyczne** (żywe) i **nieplazmatyczne** (martwe). Do części plazmatycznych należą jądro komórkowe i cytozol ze wszystkimi znajdującymi się w nim organelami komórkowymi.

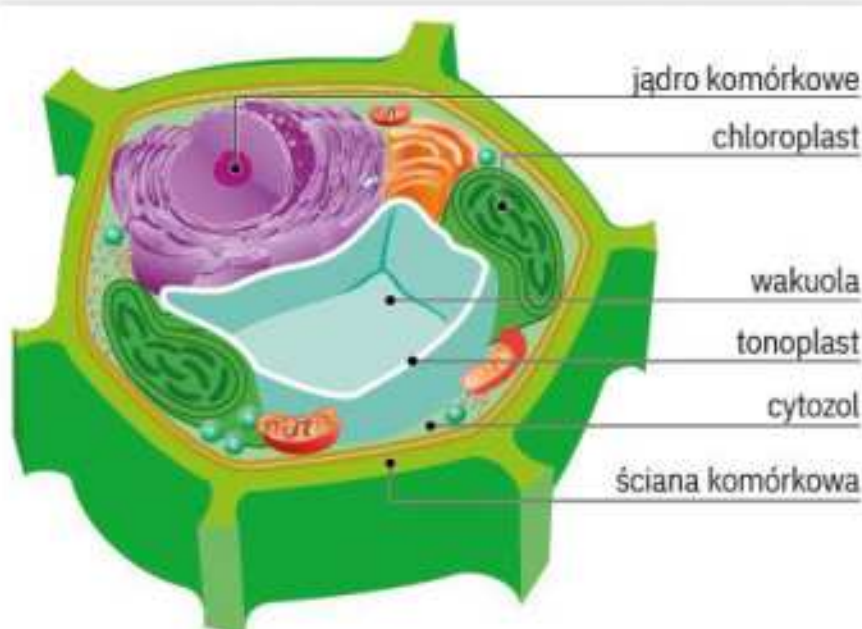
Części nieplazmatyczne to wakuola i ściana komórkowa. Razem z plastydami omówionymi w poprzednim rozdziale występują one tylko w niektórych rodzajach komórek.

wakuole ► **Wakuole (wodniczki)**

Wakuole występują w komórkach roślin, grzybów, niektórych protistów i zwierząt. Liczba i wymiary tych organeli komórkowych są różne i zależą od rodzaju tkanki oraz stadium rozwojowego. W komórkach grzybów znajduje się kilka małych wakuol, a w komórkach roślinnych – jedna lub kilka dużych. W dojrzałych komórkach roślinnych wakuola może zajmować nawet 90% ich objętości. Może ona powstawać z małych prawakuoli, które odrywają się od siateczki śródplazmatycznej, lub z pęcherzyków oddzielających się od aparatu Golgiego. W komórkach niektórych

grzybów wakuole powstają z rozpadu dużych wakuoli na kilka mniejszych. Wakuole zwierząt są mniejsze i liczniejsze od wakuoli roślin. Wakuola jest otoczona pojedynczą błoną komórkową zwaną **tonoplastem** (ryc. III.9.1.).

Wnętrze wakuoli wypełnia **sok komórkowy** (wakuolarny). Podstawowym jego składnikiem – oprócz wody i jonów nieorganicznych (głównie wapń, potas i chlorki) – są związki organiczne: białka, cukry, kwasy organiczne. Związki organiczne są okresowo przechowywane w wakuolach jako materiały zapasowe, np. białka w wakuolach komórek spi-



Ryc. III.9.1. Rozmieszczenie wakuoli w komórce roślinnej i jej budowa.

chrzowych nasion czy glikogen i tłuszcze w wakuolach grzybów. W soku komórkowym roślin gromadzą się również uboczne i szkodliwe produkty przemiany materii, tzw. **metabolity wtórne**, ponieważ komórki roślinne, w odróżnieniu od komórek zwierzęcych, nie mają struktur usuwających toksyczne substancje do otoczenia. Metabolity wtórne spełniają również funkcję obronną rośliny przed roślinożercą lub patogenami (odstraszając zapachem, smakiem). Należą do nich:

- **glikozydy**, które nadają roślinom określony aromat, a także zabarwienie płatkom kwiatów, owocom i liściom (żółte flawony i czerwone, niebieskie i fioletowe antocyjany, których odcień zależy od pH środowiska);
- **alkaloidy**, które są bezbarwnymi, silnie toksycznymi związkami o gorzkim i cierpkim smaku, często stosowanymi w lecznictwie (np. nikotyna, kofeina, teina, atropina, chinina czy morfina);
- **garbniki**, które występują w korze i drewnie dębowym, korze wierzbowej i świerkowej oraz niektórych owocach, nadają również roślinom gorzki i cierpki smak; znalazły także zastosowanie w przemyśle garbarskim do wyprawiania skór zwierząt.

W soku komórkowym toksyczne metabolity mogą się również odkładać w postaci ciał stałych – nierozpuszczalnych w wodzie **kryształów szczawianu wapnia** (ryc. III.9.2.).



Ryc. III.9.2. Różne formy kryształów szczawianów wapnia: (A) proste, (B) druzy, (C) rafidy.

Główną funkcją wakuoli zarówno w komórkach roślin, jak i grzybów jest utrzymywanie jędrności (turgoru, uwodnienia), czyli odpowiedniego ciśnienia hydrostatycznego poprzez regulację stężenia substancji w wakuoli i cytoplazmie. Ponadto wakuole roślin i grzybów (wakuole lityczne) zawierają enzymy hydrolityczne, których działanie jest podobne do lizosomów w komórkach zwierzęcych, czyli uczestniczą w rozkładzie białek i cukrów. Biorą także udział w degradacji niepotrzebnych struktur komórkowych, których pozbywają się starzejące się komórki.

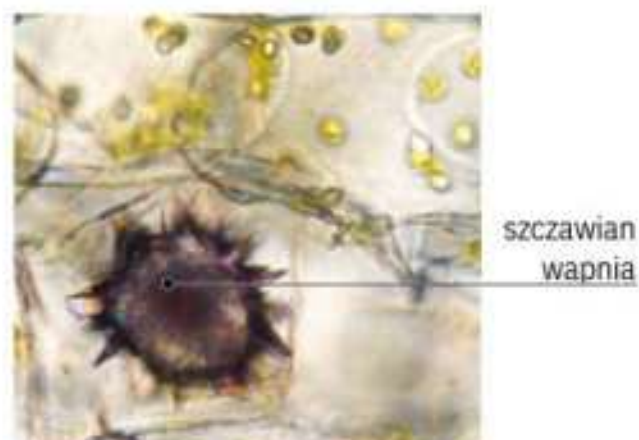
W komórkach protistów zwierzęcych i w niektórych komórkach zwierząt wakuole nazywamy **wodniczkami**. Wyróżniamy dwa rodzaje wodniczek – **wodniczki pokarmowe** i **tętniące**. Wodniczki pokarmowe są formowane podczas endocytozy i uczestniczą w trawieniu pokarmu po połączeniu z lizosomami. Natomiast wodniczki tętniące usuwają nadmiar wody z komórki, utrzymując tym samym właściwe stężenie jonów w środowisku wewnętrznym komórki (osmoregulację).



Obserwacja

Obserwacja mikroskopowa kryształów szczawianu wapnia w wakuolach komórek łodygi rabarbaru

Przygotuj skrawek poprzeczny z łodygi rabarbaru. Wykonaj preparat mikroskopowy i następnie obserwuj kryształy szczawianu wapnia w wakuolach komórek miąższu. Wykonaj w zeszycie rysunek spod mikroskopu i napisz, jaką postać przyjmują kryształy (ryc. III.9.3.).



Ryc. III.9.3. Kryształy szczawianu wapnia w wakuolach komórek roślinnych.

ściana komórkowa

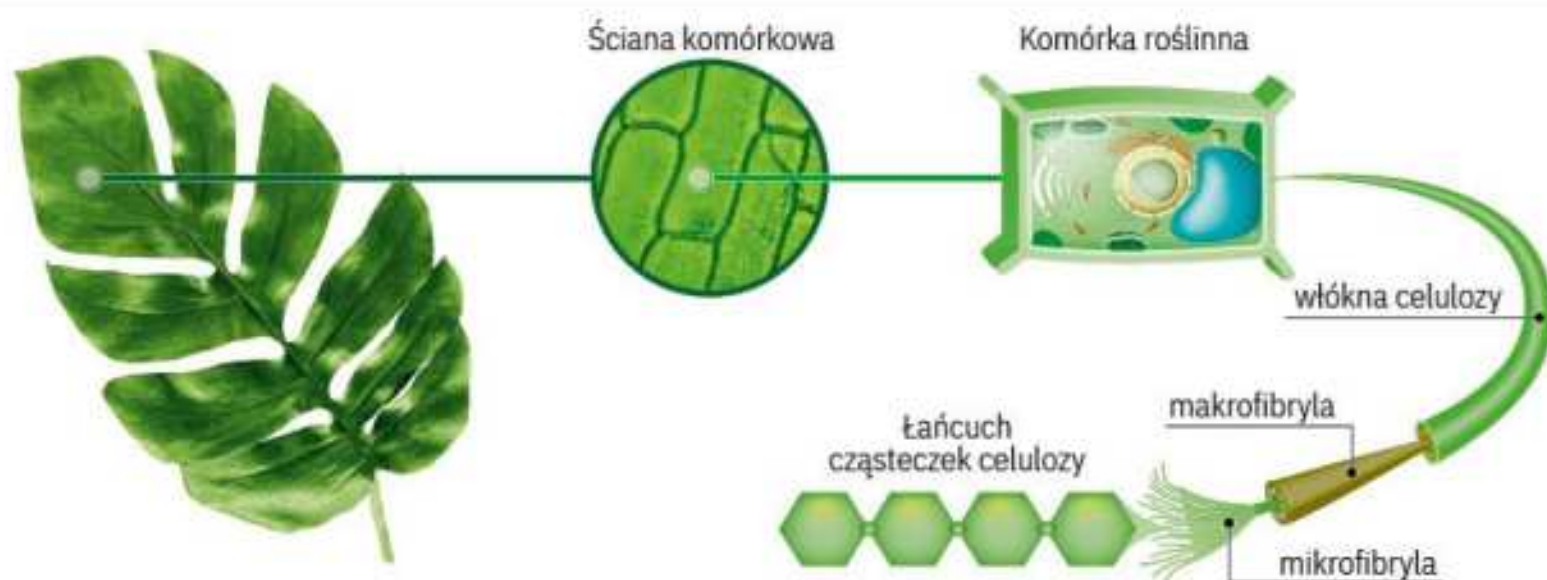
Ściana komórkowa

Ściana komórkowa występuje u bakterii, grzybów, roślin i niektórych protistów. Jest podstawową strukturą odróżniającą komórkę roślinną od zwierzęcej. Główną funkcją ściany komórkowej roślin jest nadawanie kształtu i sztywności komórkom, ochrona ich przed uszkodzeniami mechanicznymi i wnikaniem organizmów chorobotwórczych, a także zapobieganie nadmiernemu parowaniu.

Główny składnik budulcowy ściany komórkowej roślin i niektórych protistów to **celuloza (błonnik)**. Ściana komórkowa grzybów jest zbudowana z **chityny**, a bakterii – z **mureiny**.

Ściana komórkowa roślin i niektórych protistów

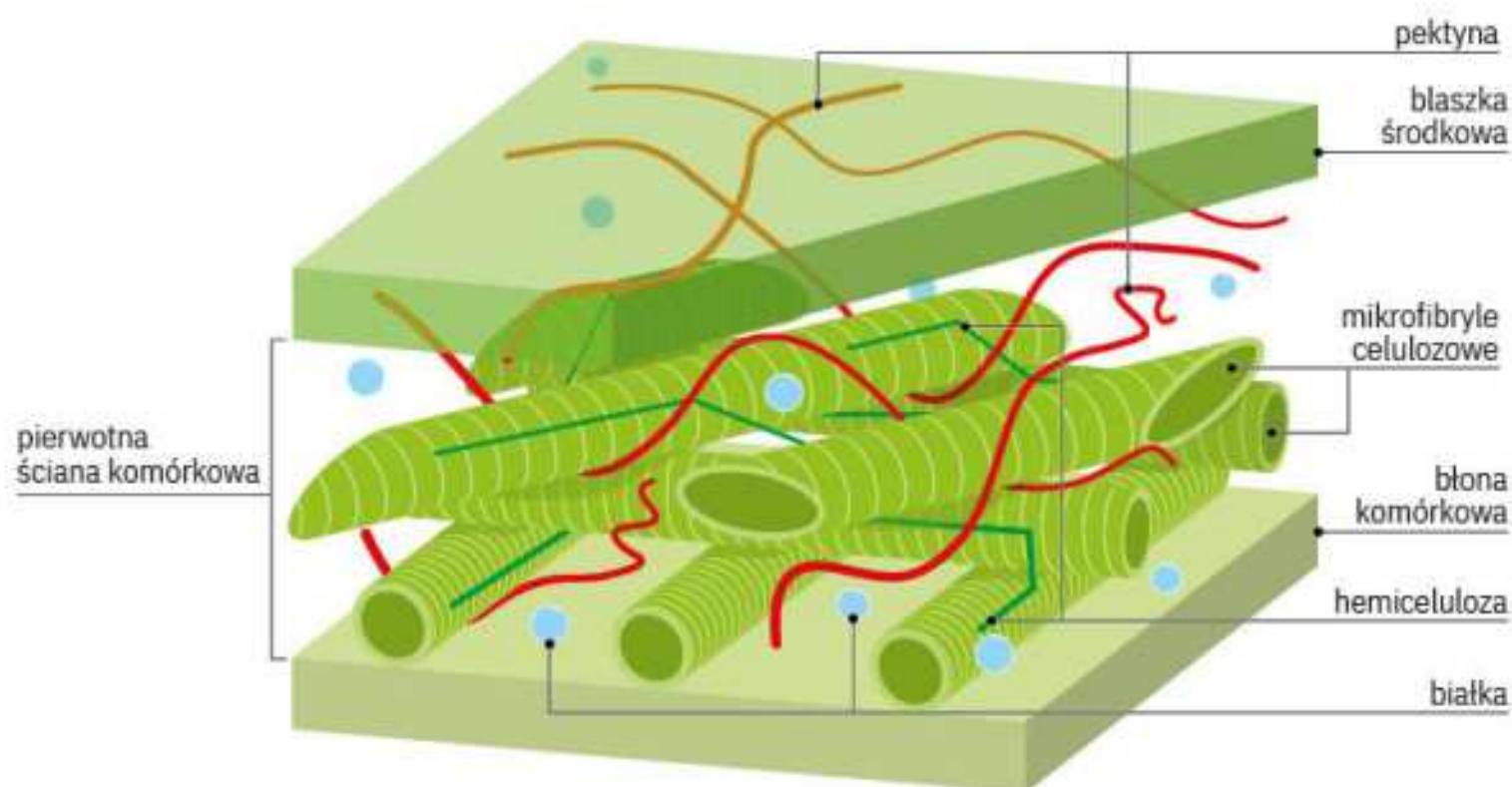
Celuloza stanowi rusztowanie dla ściany komórkowej roślin i niektórych protistów. Synteza celulozy jest związana z działaniem siateczki śródplazmatycznej i aparatu Golgiego. Długie, ściśle przylegające do siebie cząsteczki celulozy tworzą **fibryle elementarne**. Struktury te łączą się w większe pęczki – **mikrofibryle**. Zespół złożony z około 200–400 mikrofibryli tworzy **makrofibryle**, czyli włókna celulozowe (ryc. III.9.4.).



Ryc. III.9.4. Schemat ułożenia cząsteczek celulozy w ścianie komórkowej.

Taki układ cząsteczek celulozy zapewnia odporność na czynniki chemiczne i chroni przed wnikaniem patogenów.

W tak utworzone rusztowanie z włókien celulozy są wbudowane substancje wypełniające wolne przestrzenie (**ryc. III.9.5.**). To inne polisacharydy, takie jak pektyny i hemicelulozy, oraz woda i nieznaczne ilości białek strukturalnych i enzymatycznych. Pektyny i hemicelulozy są wytwarzane w aparacie Golgiego i transportowane w pęcherzykach do miejsc tworzenia się ściany komórkowej.



Ryc. III.9.5. Model budowy ściany komórki roślinnej.

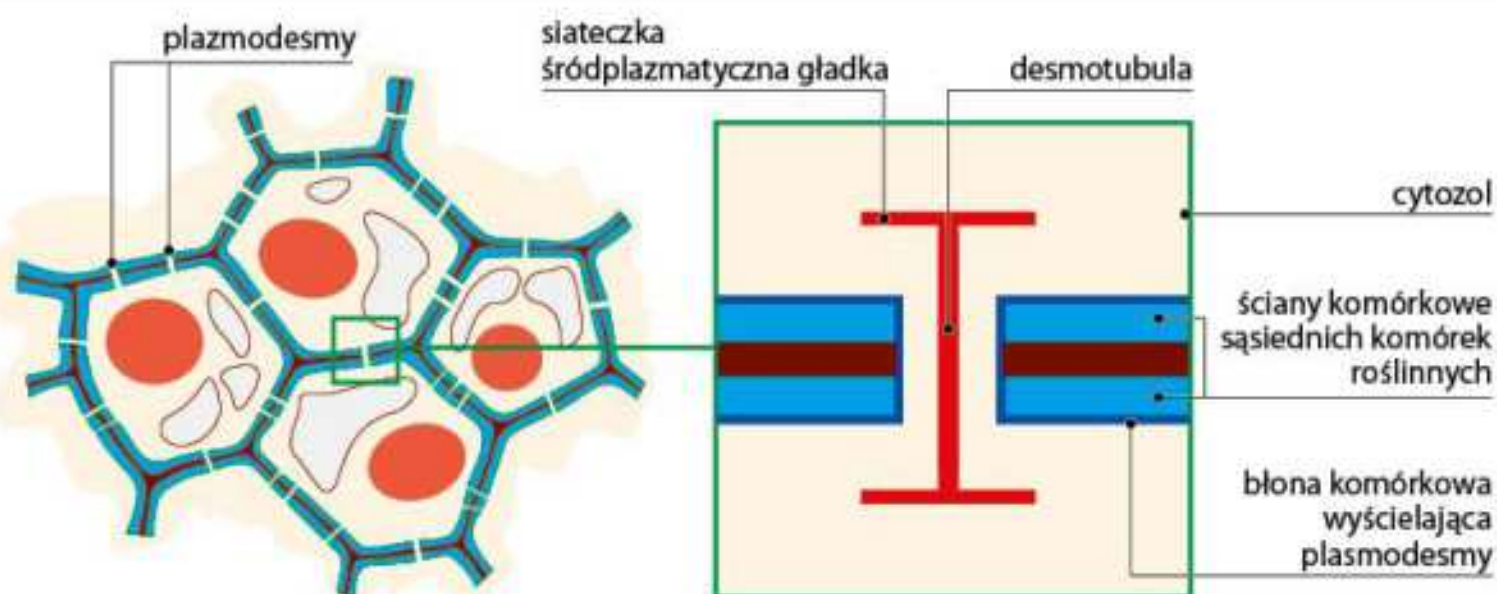
Młode komórki otacza cienka i elastyczna **pierwotna ściana komórkowa**, w której zawartość celulozy wynosi 20–35% suchej masy. Sąsiadujące komórki między pierwotnymi ścianami wytwarzają **blaszkę środkową**, zbudowaną głównie z pektyn. Po rozpuszczeniu blaszki środkowej komórki rozsuwają się, co możemy zaobserwować np. podczas dojrzewania owoców. Po zakończeniu wzrostu komórki ściana komórkowa zostaje wzmocniona poprzez odkładanie się na niej substancji utwardzających lub warstwy ściany wtórnej. **Wtórna ściana komórkowa** buduje głównie celuloza, której zawartość jest znacznie większa niż w ścianie pierwotnej i stanowi 60–90% suchej masy. Włókna celulozowe są wyraźnie grubsze i ułożone regularnie. Tworzą one system równolegle biegnących pasm. Często wtórna ściana komórkowa jest zbudowana z kilku warstw, co zapewnia komórce dużą wytrzymałość mechaniczną. U niektórych roślin w ścianie dojrzałych komórek znajdują się również inne substancje. Jeśli między włókna celulozy wnikają takie substancje, jak lignina (drzewnik), krzemionka czy węglan wapnia, to zmianę nazywamy **inkrustacją (wysyceniem)**. Natomiast odkładanie się kutyny, suberyny, gum czy śluzów na powierzchni ściany nazywamy **adkrustacją (powlekaniem)**.

inkrustacja
i adkrustacja ściany
komórkowej

► Połączenia międzykomórkowe

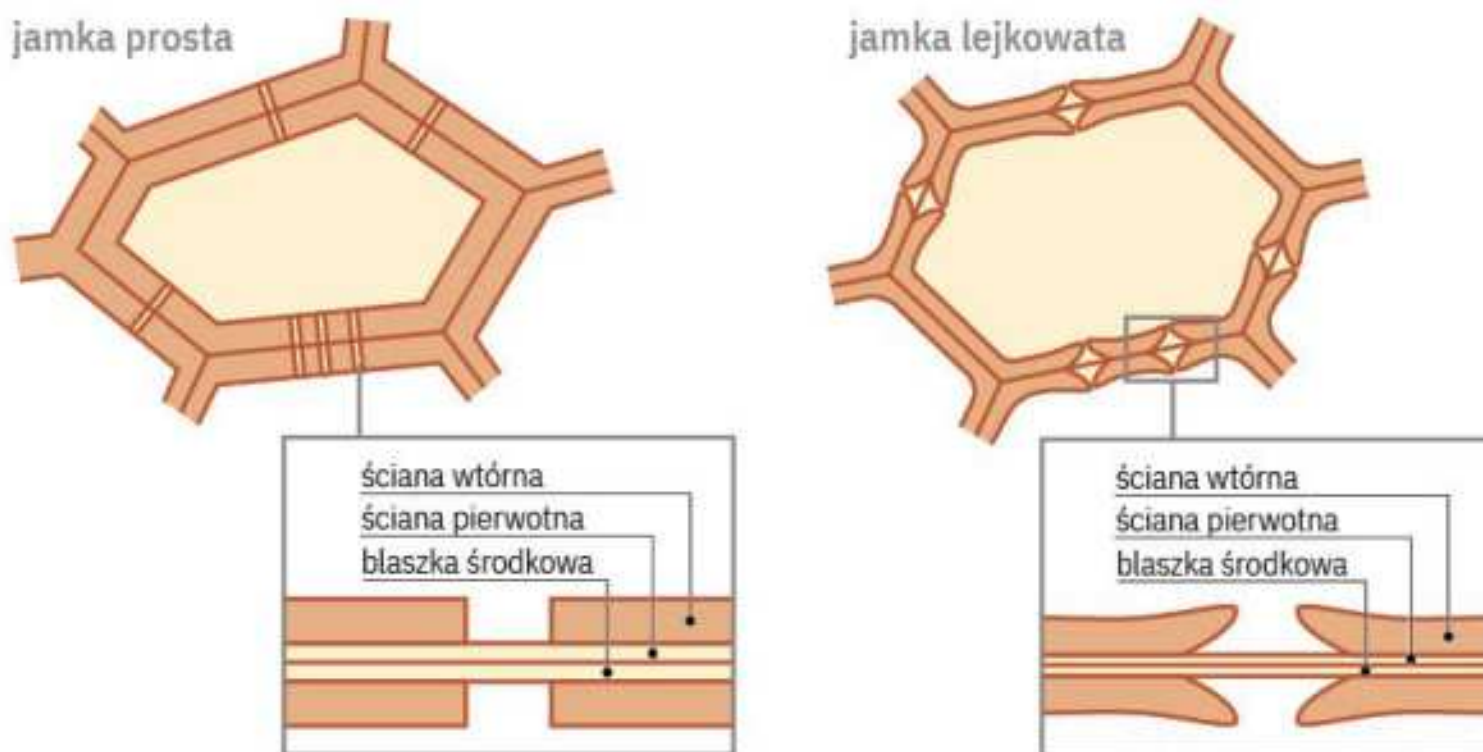
Komórki roślin i zwierząt, łącząc się ze sobą, tworzą większe jednostki funkcjonalne – tkanki. W tkankach komórki sąsiadują ze sobą i utrzymują między sobą stałe połączenia. Ułatwia to im wymianę substancji i informacji.

plazmodesmy ► Komórki roślinne kontaktują się między sobą za pomocą **plazmodesmów**, czyli cienkich pasm cytozolu łączących siateczki śródplazmatyczne gładkie sąsiadujących komórek. Pasma te przechodzą przez liczne jamki w ścianie komórkowej (**ryc. III.9.6.**).



Ryc. III.9.6. Schemat plazmodesmy. Desmotubule wyściełające jamki w ścianie komórkowej są zmodyfikowanymi fragmentami gładkiej siateczki śródplazmatycznej.

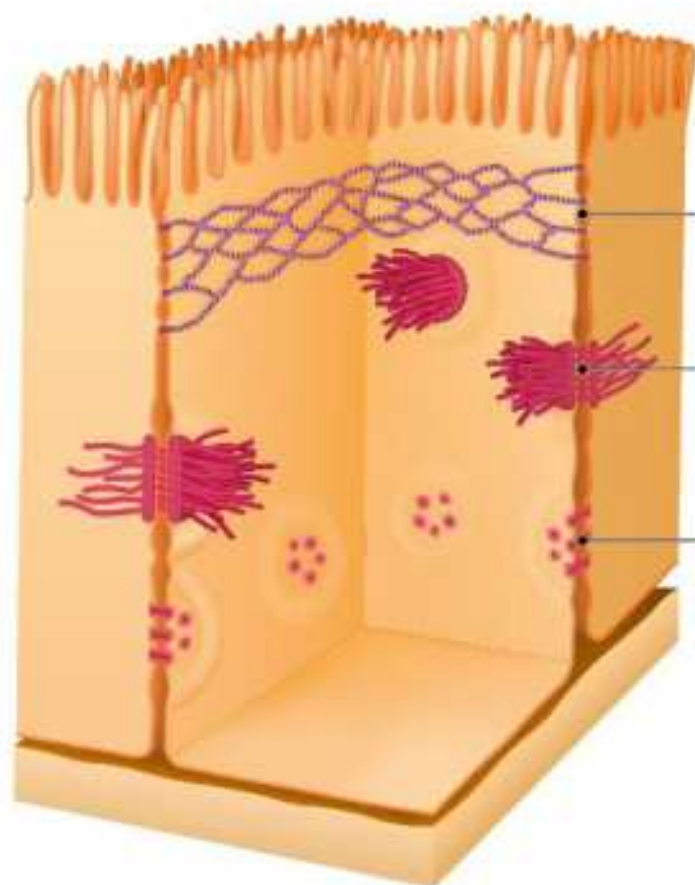
Ze względu na stały kontakt cytozolu sąsiadujących komórek, na obszarze **jamki** nie odkłada się wtórna ściana komórkowa. Jamki dzielimy na proste i lejkowate (**ryc. III.9.7.**).



Ryc. III.9.7. Przekrój przez jamkę prostą i lejkowatą. W obu jamkach tworzy się kanalik, przedzielony cienką przegrodą zbudowaną z blaszki środkowej i dwu ścian pierwotnych sąsiadujących komórek. Kształt ściany wtórnej decyduje o podziale na jamkę prostą i lejkowatą.

Przez plazmodesmy zachodzi transport wielu substancji, np. wody, aminokwasów, fosfolipidów czy nawet kwasów nukleinowych. Mogą też przez nie przenikać między komórkami wirusy roślinne, co znacznie przyspiesza ich rozprzestrzenianie się po całej roślinie.

U zwierząt występują trzy rodzaje połączeń międzykomórkowych: **zamykające**, **desmosomy** i **połączenia szczelinowe** (ryc. III.9.8.). Występują głównie w tkance nabłonkowej pokrywającej zewnętrzne i wyściełającej wewnętrzne powierzchnie ciała.



Połączenia zamykające

- uszczelniają komórki, tworzą selektywne bariery – zapobiegają przepływowi niektórych substancji przez warstwę komórek, np. nie pozwalają na wnikanie substancji z jelita do wnętrza ciała;
- występują w szczytowych częściach komórek nabłonka.

Desmosomy

- drobne białkowe wypustki na powierzchni błony sąsiadujących komórek;
- są połączeniami o charakterze zakotwiczającym – łączą filamenty pośrednie sąsiadujących ze sobą komórek;
- zapewniają wytrzymałość mechaniczną.

Połączenia szczelinowe (komunikacyjne)

- zbudowane są z kompleksów białkowych, tzw. koneksonów, tworzących kanał łączący cytoplazmy sąsiednich komórek;
- dzięki nim zachodzi przekazywanie jonów i związków drobnocząsteczkowych (np. cukrów i aminokwasów) między komórkami;
- zapewniają szybkie przekazywanie informacji między komórkami na drodze elektrycznej (np. w komórkach mięśnia sercowego).

Ryc. III.9.8. Schemat połączeń międzykomórkowych u zwierząt.

Połączenia zamykające (połączenia barierowe) występują w szczytowych częściach komórek nabłonka. Ich główną funkcją jest uszczelnienie komórek przez stworzenie selektywnej bariery do dyfuzji różnych substancji. Połączenia zamykające chronią komórki m.in. przed wnikaniem do nich różnych drobnoustrojów i wydostaniem się z nich płynu tkankowego do światła narządu. Ten typ transportu zabezpiecza organizm np. przed wnikaniem toksyn z komórek nabłonka jelit i uczestniczy w powstaniu bariery krew-mózg (ochrona mózgu przed toksynami z krwi). Połączenia zamykające są także odpowiedzialne za utrzymanie polaryzacji błony komórkowej (przez barierę dla białek i lipidów wnikających do przestrzeni międzykomórkowej).

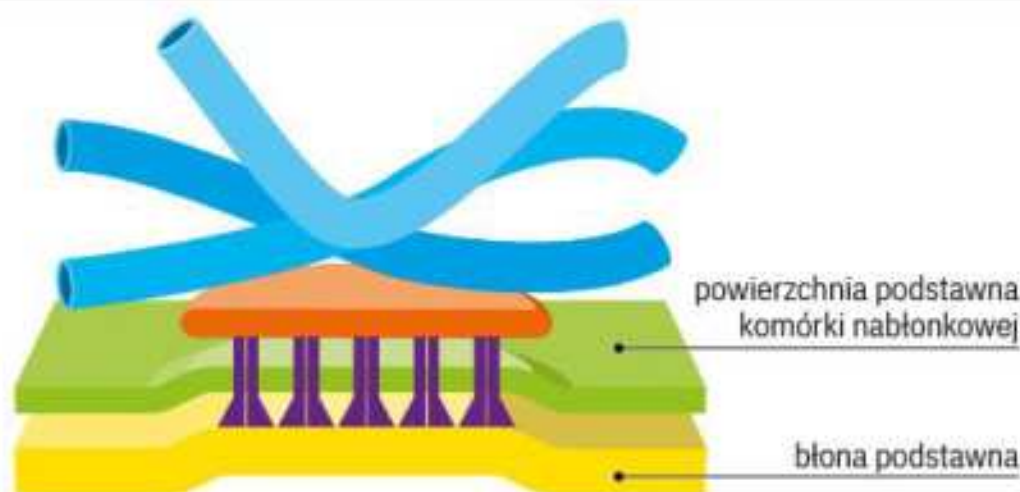
◀ połączenia zamykające

Desmosomy (połączenia mechaniczne) są utworzone przez białkowe wypustki znajdujące się na powierzchni sąsiadujących komórek. Wyrastają one z płytek rozmieszczonych pod błoną komórkową. Za pomocą wewnątrzkomórkowych filamentów pośrednich desmosomy są zakotwiczone w cytoplazmie sąsiadujących komó-

◀ desmosomy

rek. Ich działanie opiera się na mechanizmie zatrząsków, co zapewnia komórkom wytrzymałość mechaniczną. Licznie występują w komórkach narażonych na stres mechaniczny – komórkach mięśnia serca i komórkach tkanki nabłonkowej.

Półdesmosomy łączą komórki nabłonka z błoną podstawną (ryc. III.9.9.).



Ryc. III.9.9. Schemat połączenia typu półdesmosom.

połączenia
szczelinowe

► **Połączenia szczelinowe** (komunikacyjne, neksus) występują w postaci kanałów cytoplazmatycznych utworzonych z kompleksów białkowych zwanych koneksomami. Przez kanały kontaktują się cytoplazmy sąsiadujących komórek i w związku z tym funkcje połączeń szczelinowych są porównywane do plazmodesmów u roślin. Połączenia szczelinowe stanowią najbardziej uniwersalny typ połączeń między komórkami zwierząt. Zachodzi przez nie transport jonów, przez co uczestniczą w przepływie impulsów elektrycznych, a także umożliwiają przekazywanie cukrów, aminokwasów, nukleotydów. Do połączeń szczelinowych zaliczamy również połączenia między komórkami nerwowymi – synapsy nerwowe.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij funkcję wakuoli w mechanizmie ochrony roślin przed działaniem roślinożerców.
2. Porównaj funkcje wakuoli w komórkach roślinnych z wodniczkami protistów i zwierząt.
3. Porównaj budowę ściany komórkowej w komórkach prokariotycznych i eukariotycznych.
4. Przedstaw proces korkowacenia ściany komórkowej.
5. Ściana komórkowa to struktura charakterystyczna dla komórek roślinnych. Zbudowana jest głównie z celulozy – substancji o dużej wytrzymałości na rozciąganie i stanowiącej włóknisty szkielet ściany. Szkielet ten zawiera także pektyny i hemicelulozy.
 - 5.1. Wyjaśnij związek między budową ściany komórkowej a funkcją tej struktury w komórce.
 - 5.2. Wytlumacz, na czym polega inkrustacja i adkrustacja ściany komórkowej.
 - 5.3. Spośród wymienionych organizmów wybierz te, które mają ścianę komórkową. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

moczarka kanadyjska pantofelek pieczarka rak bakterie Gram-ujemne

6. Omów różnice w komunikacji międzykomórkowej komórek roślin i zwierząt.
7. Wakuola komórek roślinnych to struktura otoczona błoną cytoplazmatyczną – tonoplastem. Wnętrze wakuoli jest wypełnione sokiem komórkowym. W skład soku komórkowego wchodzi: woda, jony oraz rozpuszczalne i nierozpuszczalne związki mineralne i organiczne. Występują również w soku komórkowym różne enzymy hydrolityczne, np. peptydazy, glikozydazy.

7.1. Wymień trzy funkcje wakuoli.

7.2. Wyjaśnij, jaką funkcję spełniają zawarte w soku komórkowym metabolity wtórne.

7.3. Podaj trzy drogi powstawania wakuoli.

8. Komórki roślin i zwierząt łączą się ze sobą i tworzą większe jednostki funkcjonalne – tkanki. W tkankach komórki sąsiadują ze sobą i utrzymują między sobą stałe połączenia, co ułatwia wymianę substancji i informacji między komórkami.

Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń dotyczących połączeń międzykomórkowych. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Komórki roślinne kontaktują się między sobą za pomocą plazmodesmów.	...
2. Plazmodesmy to grube pasma cytozolu łączące siateczki śródplazmatyczne sąsiadujących komórek.	...
3. U zwierząt występują trzy rodzaje połączeń międzykomórkowych: zamykające, desmosomy i połączenia szczelinowe.	...
4. Połączenia zamykające występują w górnych częściach komórek mięśniowych.	...

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Składniki komórki dzielimy na **plazmatyczne** (żywe – jądro komórkowe i cytozol ze wszystkimi organellami) oraz **nieplazmatyczne** (martwe – wakuola i ściana komórkowa). ◀ s. 152
- **Wakuola** zawiera sok komórkowy, którego składnikami są woda i związki organiczne, a także uboczne produkty procesów przemiany materii: glikozydy, alkaloidy, garbniki. ◀ s. 152
- Zawarte w soku komórkowym **glikozydy** nadają barwę kwiatom i owocom, a alkaloidy i garbniki chronią rośliny przed działaniem roślinożerców. ◀ s. 153
- **Ściana komórkowa** komórek roślinnych jest zbudowana głównie z celulozy, grzybów – z chityny, a bakterii – z mureiny. ◀ s. 154
- Ściana komórkowa może być rozbudowywana przez odkładanie różnych substancji między włókna celulozy (**inkrustacja**) lub na jej powierzchni (**adkrustacja**). ◀ s. 155
- Sąsiadujące komórki kontaktują się między sobą za pomocą **połączeń międzykomórkowych**. ◀ s. 156
- Komórki roślinne łączą się za pomocą **plazmodesmów**, a komórki zwierzęce kontaktują się przez **połączenia zamykające, desmosomy i połączenia szczelinowe**. ◀ s. 156

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

s. 103 ► Porównanie komórki prokariotycznej z eukariotyczną

Struktura komórkowa	Komórka prokariotyczna	Komórka eukariotyczna		
		zwierzęta	rośliny	grzyby
Jądro komórkowe	brak, funkcję pełni nukleoid	obecne		
Błona komórkowa	obecna			
Cytozol	obecny			
Cytoszkielecik	brak	obecny		
Siateczka śródplazmatyczna	brak	obecna		
Rybosomy	obecne			
Aparat Golgiego	brak	obecny		
Lizosomy	brak	obecne, trawienie wewnątrzkomórkowe	obecne, wakuole lityczne, trawienie wewnątrzkomórkowe	obecne, wakuole lityczne, trawienie pozakomórkowe
Mitochondria	brak	obecne		
Peroxisomy	brak	obecne		
Chloroplasty	brak występują tylko w komórkach sinic (tylakoidy)	brak	obecne	brak
Ściana komórkowa	obecna, zbudowana z mureiny	brak	obecna, zbudowana z celulozy	obecna, zbudowana z chityny
Wakuola (wodniczka)	brak	tylko w niektórych komórkach	obecna	

s. 104 ► Składniki komórki eukariotycznej

Plazmatyczne (żywe)	Nieplazmatyczne (martwe)
błona komórkowa cytozol jądro komórkowe siateczka śródplazmatyczna rybosomy aparat Golgiego lizosomy peroxisomy mitochondrium plastydy	ściana komórkowa wakuola

Struktury komórki eukariotycznej

Struktura komórkowa	Budowa	Funkcje	
Błona komórkowa	• dwuwarstwa (podwójna warstwa lipidowo-białkowa) • białka integralne i peryferyczne (powierzchniowe) • lipidy-fosfolipidy, glikolipidy, cholesterol	• oddziela komórkę od środowiska pozakomórkowego • dzieli wnętrze komórki na przedziały, w których mogą zachodzić odrębne procesy metaboliczne • nadaje kształt komórce • chroni komórkę przed czynnikami zewnętrznymi i odbiera sygnały z zewnątrz • reguluje transport substancji do i z komórki	◀ s. 108
Jądro komórkowe	• kariolimfa z chromatyną (DNA i białka) otoczona podwójną błoną jądrową z porami • w kariolimfie znajduje się jedno lub kilka jąder	• gromadzenie i przekazywanie informacji genetycznej innym komórkom • kontrola większości czynności życiowych komórki	◀ s. 124
Jąderko	• gęsta, zbita, nieobłoniąca struktura na terenie jądra	• synteza rRNA i podjednostek rybosomów	✱ s. 126
Cytosol	• płynny składnik cytoplazmy (koloid) • składa się z wody i składników odżywczych, jonów i białek budujących cytoszkielet	• tworzy środowisko wewnętrzne komórki • jest miejscem zachodzenia szeregu procesów biochemicznych • uczestniczy w transporcie substancji między organellami	◀ s. 130
Cytoszkielet	• układ włókien białkowych: mikrotubul, filamentów aktynowych (mikrofilamentów) i filamentów pośrednich	• tworzy system szlaków metabolicznych komórki • odpowiada za zmianę kształtu komórki • uczestniczy w ruchu organelli komórkowych • buduje wici i rzęski • buduje wrzeciono podziałowe komórki • chroni komórkę przed urazami mechanicznymi	◀ s. 130
Siateczka śródplazmatyczna	• układ błonowych cystern i kanalików otoczonych pojedynczą błoną	• dzieli komórkę na wewnętrzne przedziały, w których zachodzą odrębne procesy metaboliczne	◀ s. 136
szorstka	• system cystern połączonych z rybosomami	• synteza białek, ich modyfikacja i transport	
gładka	• system kanalików bez rybosomów	• synteza lipidów • detoksykacja trucizn	
Rybosomy	• ziarnistości zbudowane z rRNA i białka związane z siateczką śródplazmatyczną lub wolne w cytoplazmie	• synteza białek	◀ s. 140

	Struktura komórkowa	Budowa	Funkcje
s. 137 ➤	Aparat Golgiego	• system otoczonych pojedynczą błoną spłaszczonych woreczków zakończonych pęcherzykami	• modyfikowanie, pakowanie i kierowanie białek i lipidów do wydzielenia poza komórkę (na drodze egzocytozy) • kierowanie białek do właściwych przedziałów komórkowych • synteza polisacharydów do budowy ściany komórkowej
s. 138 ➤	Lizosomy	• pęcherzyki otoczone pojedynczą błoną zawierające enzymy trawienne	• trawienie wewnątrzkomórkowe zużytych organelli pokarmowych (autofagia) • trawienie cząsteczek pokarmowych i substancji wchłanianych podczas endocytozy • degradacja toksyn, mikroorganizmów patogennych
s. 139 ➤	Peroksysomy	• pęcherzyki otoczone pojedynczą błoną • zawierają enzymy hydrolytyczne	• uczestniczą w procesach utleniania związków organicznych • biorą udział w detoksykacji szkodliwych substancji • u roślin wyższych specyficzny rodzaj peroksysomów – glioksysomy biorą udział w syntezie cukrów z kwasów tłuszczowych
s. 144 ➤	Mitochondria	• otoczone podwójną błoną, wewnętrzna tworzy grzebień mitochondrialne • wewnątrz macierz (matriks) z mtDNA, rybosomami i enzymami	• wytwarzanie podczas procesu utleniania komórkowego energii zgromadzonej w ATP
s. 146 ➤	Chloroplasty	• otoczone podwójną błoną, wewnętrzna tworzy tylakoidy • wewnątrz stroma z chDNA, rybosomami i enzymami	• wiązanie energii świetlnej w proste związki organiczne w procesie fotosyntezy
s. 152 ➤	Wakuole	duże, otoczone pojedynczą błoną pęcherzyki	• utrzymanie jędrności komórki (turgoru) • miejsce gromadzenia substancji zapasowych, toksycznych produktów metabolizmu (alkaloidów), barwników (wakuole owoców i płatków kwiatów) • udział w trawieniu wewnątrzkomórkowym (niektóre wakuole roślinne) • udział w trawieniu pozakomórkowym wakuoli grzybów z enzymami hydrolitycznymi • w komórkach niektórych protistów i komórkach zwierzęcych wodniczki pokarmowe odpowiadające za trawienie pokarmu i wodniczki tętniące odpowiedzialne za osmoregulację

Struktura komórkowa	Budowa	Funkcje
Ściana komórkowa zbudowana z celulozy – komórki roślinne i niektórych protistów i z chityny – komórki grzybów	• u roślin składa się z wody, włókien celulozowych wypełnionych pektynami i hemicelulozą • ściana pierwotna w młodych komórkach • ściana wtórna w komórkach po zakończeniu wzrostu • ściana wtórna może ulegać modyfikacjom – adkrustacji lub inkrustacji	• odpowiada za kształt komórki • chroni komórkę przed uszkodzeniami mechanicznymi i chemicznymi • zapobiega wnikaniu do komórki organizmów chorobotwórczych

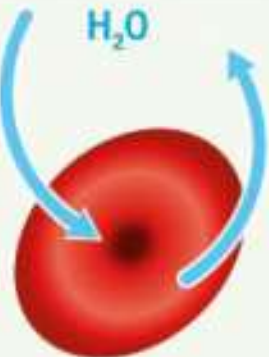
◀ s. 154

Transport przez błonę komórkową

◀ s. 113

Rodzaj transportu		charakterystyka	substancje transportowane
Bierny (bez nakładu energii)	dyfuzja prosta	• zachodzi zgodnie z różnicą stężeń • nie wymaga białek transportujących Szczególnym przykładem jest osmoza.	• małe cząsteczki niepolarne, np. O_2, CO_2, i polarne, np. H_2O, NH_3
	dyfuzja ułatwiona (wspomagana)	• zachodzi zgodnie z różnicą stężeń • wymaga udziału białek transportujących: przenośnikowych i kanałowych	• większe cząsteczki polarne, np. glukoza, aminokwasy, jony sodu i potasu
Aktywny (z nakładem energii)		• zachodzi wbrew różnicy stężeń • wymaga nośników białkowych	• jony sodu i potasu, tzw. pompa sodowo-potasowa
Transport makrocząsteczek lub cząsteczek pokarmowych			
Endocytoza (transport do wnętrza komórki)	• wpuklenie fragmentu błony komórkowej, wytworzenie pęcherzyka endocytarnego i transport pobranej cząsteczki w głąb cytoplazmy • ma postać fagocytozy lub pinocytozy		• fagocytoza – duże cząsteczki, np. mikroorganizmy czy szczątki pokarmowe, kończy się egzocytozą • pinocytoza – cząsteczki rozpuszczone w płynach, nie kończy się egzocytozą
Egzocytoza (transport na zewnątrz komórki)	• uwolnienie substancji poprzez połączenie pęcherzyka transportującego z błoną komórkową		• niestrawione resztki pokarmowe • białka i lipidy przeznaczone na eksport do innych komórek • hormony, enzymy trawienne, śluz

s. 115 ► Różnice w przebiegu osmozy w komórkach roślinnych i zwierzęcych

Rodzaj roztworu	Charakterystyka	Kierunek przepływu wody	Zmiany w komórce	
			zwierzęcej	roślinnej
izotoniczny	stężenie substancji rozpuszczonej na zewnątrz jest takie, jak we wnętrzu komórki		komórki nie zmieniają swojego kształtu	komórki nie tracą jędrności (turgoru)
hipertoniczny	stężenie substancji rozpuszczonej na zewnątrz jest większe niż we wnętrzu komórki		komórki zmieniają kształt na skutek utraty wody i rozpadają się	komórki tracą bardzo szybko turgor na skutek utraty wody, cytoplazma i błona komórkowa zaczyna odstawać od ściany komórkowej (zjawisko plazmolizy)
hipotoniczny	stężenie substancji rozpuszczonej na zewnątrz jest mniejsze niż we wnętrzu komórki		komórki pobierają wodę, pęcznieją i pękają	komórki pobierają wodę i zwiększają turgor, ale ściana komórkowa chroni je przed pękaniem

s. 145 ► Charakterystyka plastydów

Rodzaje plastydów	Charakterystyka	Funkcje	Występowanie
Proplastydy	bezbarwne, ze słabo rozwiniętym systemem błon wewnętrznych	młodociana, niezróżnicowana forma plastydów, z nich powstają inne rodzaje plastydów	komórki tkanek twórczych (embryonalnych), komórki zarodka i gamet
Leukoplasty	bezbarwne, powstają przy braku światła, pod wpływem światła mogą przechodzić w chloroplasty	zdolność do syntezy i magazynowania substancji zapasowych, głównie skrobi (proteinoplasty gromadzą białka zapasowe, amyloplasty gromadzą węglowodany w postaci ziaren skrobi, elajoplasty gromadzą tłuszcze zapasowe)	komórki organów spichrzowych roślin (np. bulwy, kłącza, korzenie, liścienie, bielmo nasion)

Rodzaje plastydów	Charakterystyka	Funkcje	Występowanie
Etioplasty	mają protochlorofilid i ciała prolamellarne, struktury te pod wpływem światła przechodzą w chlorofil i tylakoidy, na świetle przekształcają się w chloroplasty	po przekształceniu w chloroplasty mają zdolność do fotosyntezy	rośliny hodowane w ciemności (tzw. etiolowane)
Chromoplasty	barwne, zawierające barwniki karotenoidowe: czerwono-pomarańczowy karoten i żółty kasnatofil, powstają z proplastydów, leukoplastów i najczęściej z przekształcenia chloroplastów (starzenie się uprzednio zielonych liści jesienią, dojrzewanie owoców)	odpowiedzialne za zabarwienie owoców, płatków korony kwiatów (związek z zapylaniem kwiatów i rozsiewaniem owoców), niektórych organów spichrzowych roślin, karoten bierze udział w budowie witaminy A	na przykład korzeń marchwi, owoc papryki czy pomidora, płatki korony jaskra
Chloroplasty	barwne, mają zielony barwnik chlorofil, u roślin otoczone przez dwie, a u protistów roślinopodobnych przez trzy lub cztery błony, w starzejących się komórkach przekształcają się w chromoplasty	zachodzi w nich proces fotosyntezy, czyli przemiana dwutlenku węgla i wody z wykorzystaniem energii świetlnej w glukozę oraz tlen, nadają zielone zabarwienie nadziemnym częściom rośliny	zielone części roślin

Porównanie ściany komórkowej pierwotnej i wtórnej

◀ s. 155

Cechy	Ściana komórkowa	
	pierwotna	wtórna
wiek komórek	młode, rosnące	dojrzałe, o dużym stopniu specjalizacji
zawartość celulozy (% suchej masy)	20–30	60–90
układ włókien celulozowych	nieregularny, zapewniający zdolność do rozciągania błony	regularny, zapewniający dużą odporność mechaniczną
rodzaj wzrostu	wzrost powierzchniowy	wzrost na grubość od strony wewnętrznej
modyfikacje	brak	inkrustacja – drzewnik, krzemionka, węglan wapnia adkrustacja – kutyna, suberyna, sporopolenina, kaloza, gumy i śluzy

Różnice	Inkrustacja	Adkrustacja
Opis modyfikacji	substancje wnikają między włókna celulozowe	substancje odkładają się na powierzchni ściany
Rodzaj substancji odkładanych i ich funkcja	Lignina (drzewnik) – zwiększa wytrzymałość mechaniczną ściany, nadając jej sztywność i twardość. Substancje nieorganiczne: krzemionka (SiO_2) i węglan wapnia (CaCO_3) wzmacniają i budują ściany komórek traw, turzyc, skrzypów oraz niektórych protistów roślinopodobnych, np. pancerzyki okrzemek.	Związki o charakterze lipidowym: Kutyna wraz z woskiem tworzy kutykulę ograniczającą nadmierne parowanie wody i wnikanie drobnoustrojów chorobotwórczych. Suberyna (składnik korka) pełni funkcję termoizolacyjną (nie przepuszcza wody i powietrza, chroni przed przegrzaniem) i wzmacniającą. Sporopolenina (składnik zewnętrznej warstwy – egzyny ścian ziaren pyłku roślin nasiennych, zarodników mszaków i paprotników) wzmacnia odporność chemiczną i mechaniczną egzyny, (wykorzystywana w palinologii zajmującej się badaniem pyłku roślin i zarodników grzybów). Polisacharydy, np.: Kaloza (wyściela wewnętrzną ścianę porów rurek sitowych łyka) częściowo lub całkowicie zamyka przepływ asymilatów przez łyko. Śluzy (występują na powierzchni ściany nasion, korzeni, liści, np. lnu, malwy, sagowca) chłoną wodę i stanowią rezerwę wodną niektórych roślin, pełnią także funkcję ochronną i zapasową. Gumy są wydzielane przez rośliny wyższe w miejscach zranienia, np. guma arabska wydzielana przez zranioną akację senegalską.

BLOK ĆWICZENIOWY

1. (0–2 pkt)

Wszystkie organizmy żywe dzielimy na dwie grupy: prokariotyczne i eukariotyczne.

Wyjaśnij kryterium takiej klasyfikacji, uwzględniając dwa argumenty.

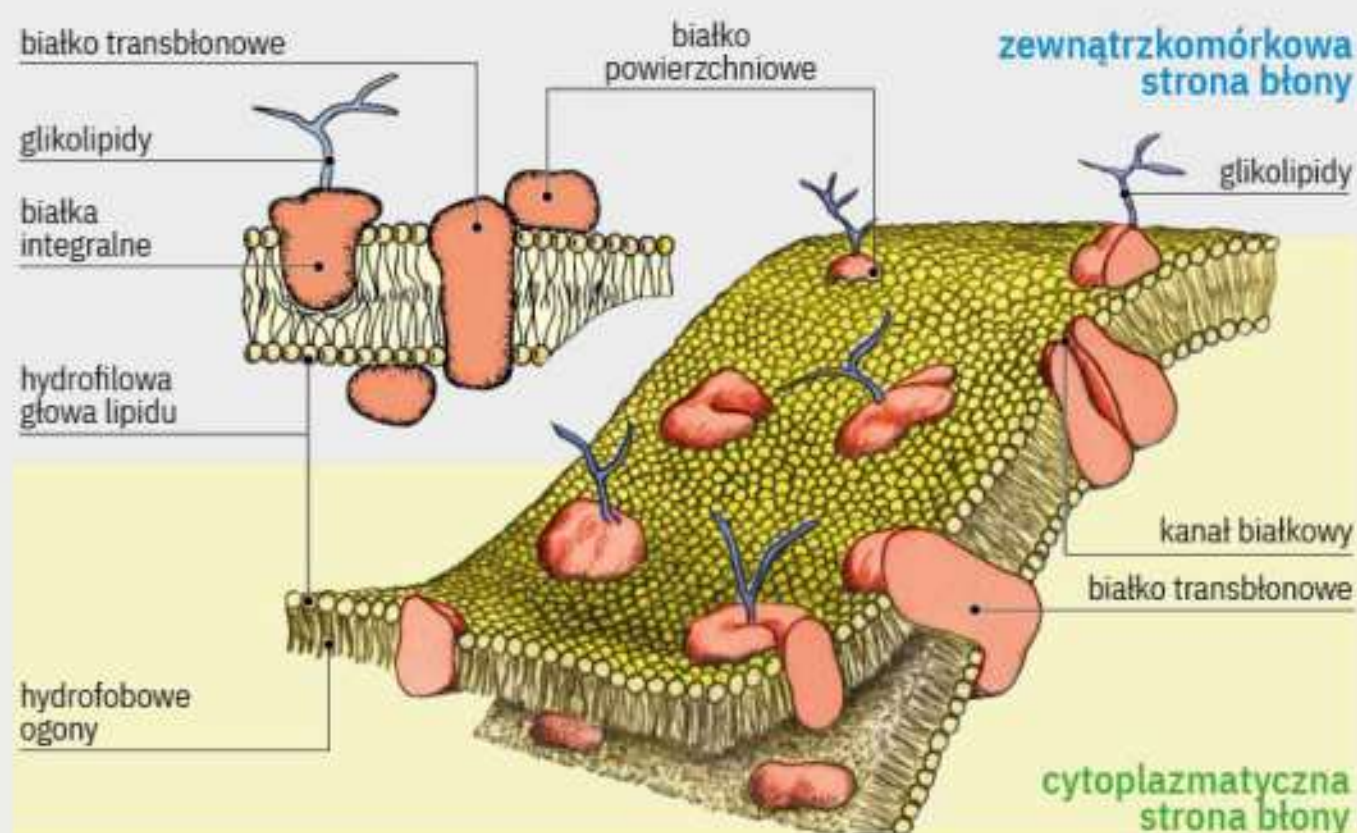
2. (0–3 pkt)

Do organizmów prokariotycznych zaliczamy bakterie, a do eukariotycznych – rośliny, protisty, zwierzęta i grzyby.

Zaprojektuj tabelę przedstawiającą różnice między bakteriami, roślinami i zwierzętami, uwzględniając następujące struktury komórkowe: jądro komórkowe, błonę komórkową, cytoszkielet, siateczkę śródplazmatyczną, rybosomy, ścianę komórkową.

3. (0–2 pkt)

Błona komórkowa przedstawiona na rysunku stanowi podstawową strukturę otaczającą każdą komórkę. Jest zbudowana z dwuwarstwy lipidowej i rozmieszczonych w niej białek. Jej budowa decyduje o funkcjach pełnionych w komórce.

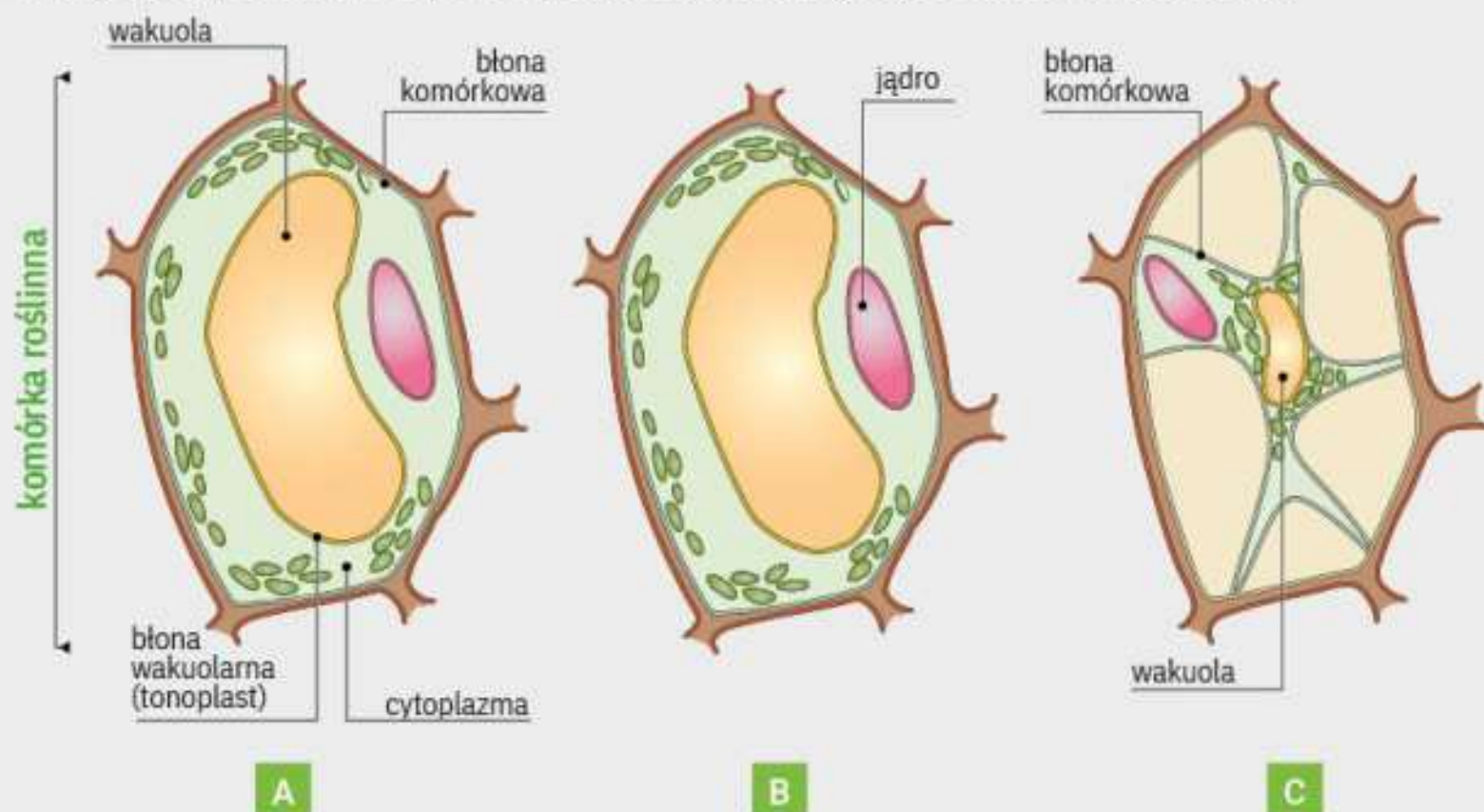


3.1. Na podstawie rysunku wymień cechę, która decyduje o asymetrii błony.

3.2. Wyjaśnij, jaką funkcję spełnia glikokaliks.

4. (0–2 pkt)

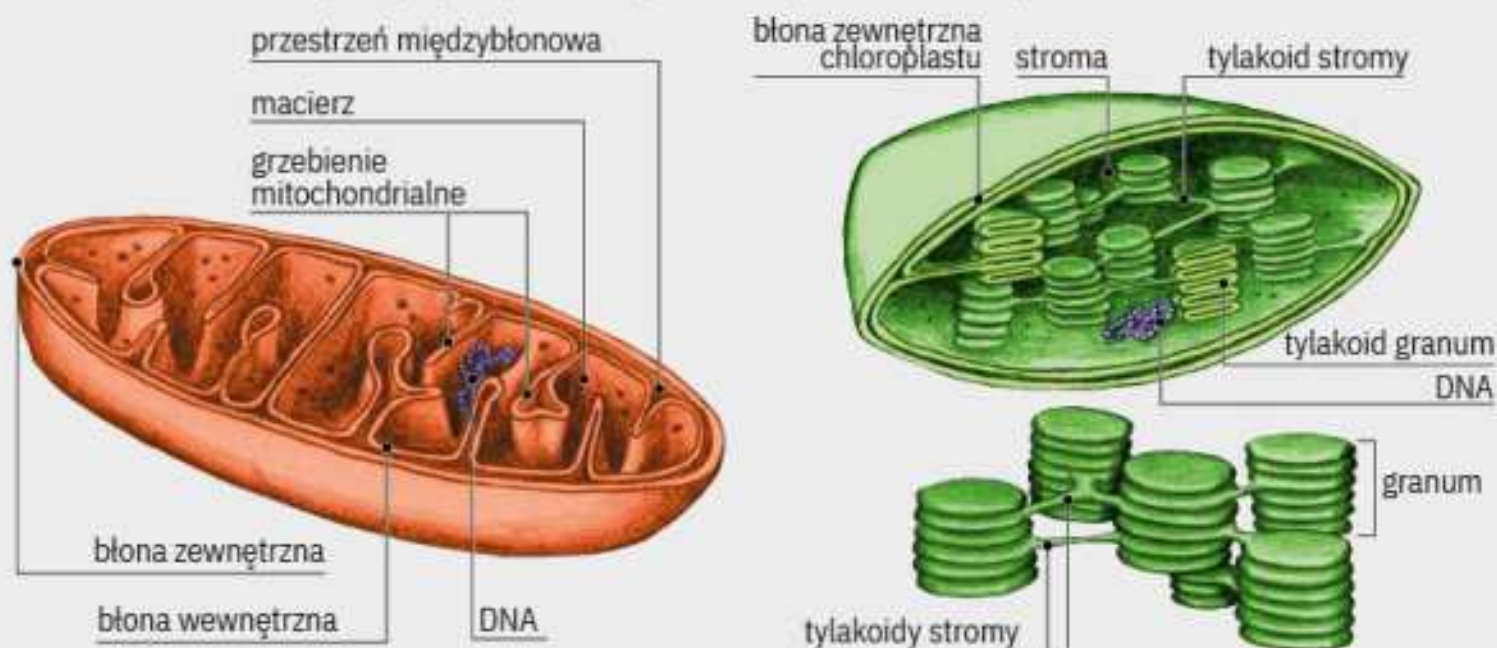
Różnica stężeń związków chemicznych po obu stronach błony jest przyczyną powstania ciśnienia osmotycznego, czyli siły cząsteczek wody przepływających przez błonę. W komórkach roślin sposób reakcji na zmiany stężenia substancji rozpuszczonych w środowisku reguluje obecna ściana komórkowa.



Wybierz rysunek, który przedstawia komórkę w roztworze hipotonicznym. Uzasadnij swój wybór. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

5. (0–1 pkt)

Mitochondria i chloroplasty są nazywane organelami półautonomicznymi.



Na podstawie przedstawionej budowy tych organeli wyjaśnij, co oznacza określenie *półautonomiczne*. Zapisz wyjaśnienie w zeszycie.

6. (0–3 pkt)

Cytosol komórek eukariotycznych nie stanowi jednolitego roztworu związków chemicznych. Występują w nim przechodzące w różnych kierunkach długie i cienkie włókna białkowe tworzące tzw. cytoszkielet komórki.

Oceń prawdziwość poniższych zdań dotyczących poszczególnych elementów cytoszkieletu. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

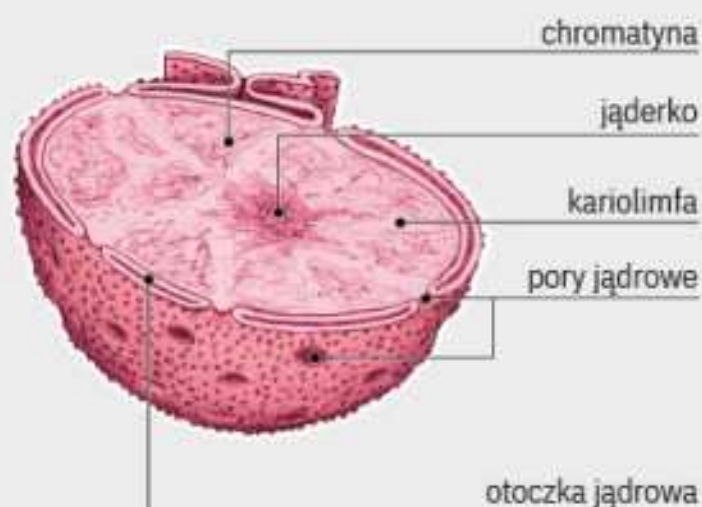
Stwierdzenie	P/F
1. Mikrotubule nadają kształt komórkom, szczególnie zwierzęcym, które są pozbawione sztywnej ściany komórkowej.	...
2. Centriole składają się z pięciu zestawów mikrotubul, z których każdy składa się z trzech mikrotubul.	...
3. Największe zagęszczenie mikrofilamentów obserwujemy pod błoną komórkową.	...
4. Filamenty pośrednie stanowią najmniej stabilne elementy cytoszkieletu.	...

7. (0–2 pkt)

Otoczka jądrowa składa się z dwóch błon – zewnętrznej i wewnętrznej – oddzielających wnętrze jądra od otaczającej go cytoplazmy. Wewnętrzna błona jest gładka, a zewnętrzna – połączona z rybosomami i przechodzi w siateczkę (retikulum) śródplazmatyczną szorstką.

7.1. Wyjaśnij, dlaczego z otoczką jądrową jest połączona siateczka śródplazmatyczna szorstka.

7.2. Określ, jaką funkcję pełnią pory jądrowe.



8. (0–3 pkt)

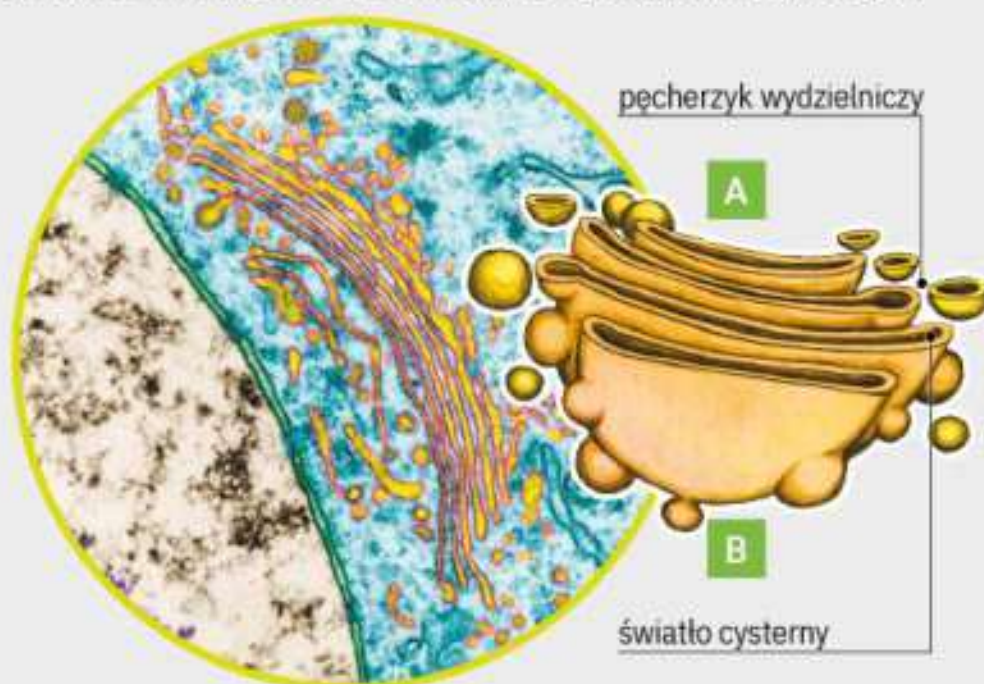
U niektórych roślin w ścianę dojrzałych komórek są wbudowywane różne substancje. Jeśli wnikają między włókna celulozy, to modyfikację taką nazywamy inkrustacją (wysyceniem). Natomiast odkładanie się substancji na powierzchni ściany nazywamy adkrustacją (powlekaniem).

Oceń prawdziwość poniższych zdań dotyczących modyfikacji ściany komórkowej. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Lignina (drzewnik) zwiększa wytrzymałość mechaniczną ściany, nadając jej sztywność i twardość.	...
2. Kutyna wraz z woskiem tworzy kutykulę zwiększającą parowanie wody i ułatwiającą wnikanie drobnoustrojów chorobotwórczych.	...
3. Krzemionka (SiO_2) i węglan wapnia (CaCO_3) wzmacniają i budują ściany komórek traw, turzyc, skrzypów oraz niektórych protistów grzybopodobnych, np. pancerzyki okrzemek.	...
4. Suberyna (składnik korka) pełni funkcję termoizolacyjną (nie przepuszcza wody i powietrza, chroni przed przegrzaniem).	...

9. (0–2 pkt)

Aparat Golgiego składa się ze stosu łukowato wygiętych, nakładających się na siebie spłaszczonych woreczków – cystern (diktiosomu) zbudowanych z błon siateczki gładkiej. Wokół spłaszczonych cystern aparatu rozmieszczone są oddzielające się niewielkie pęcherzyki.

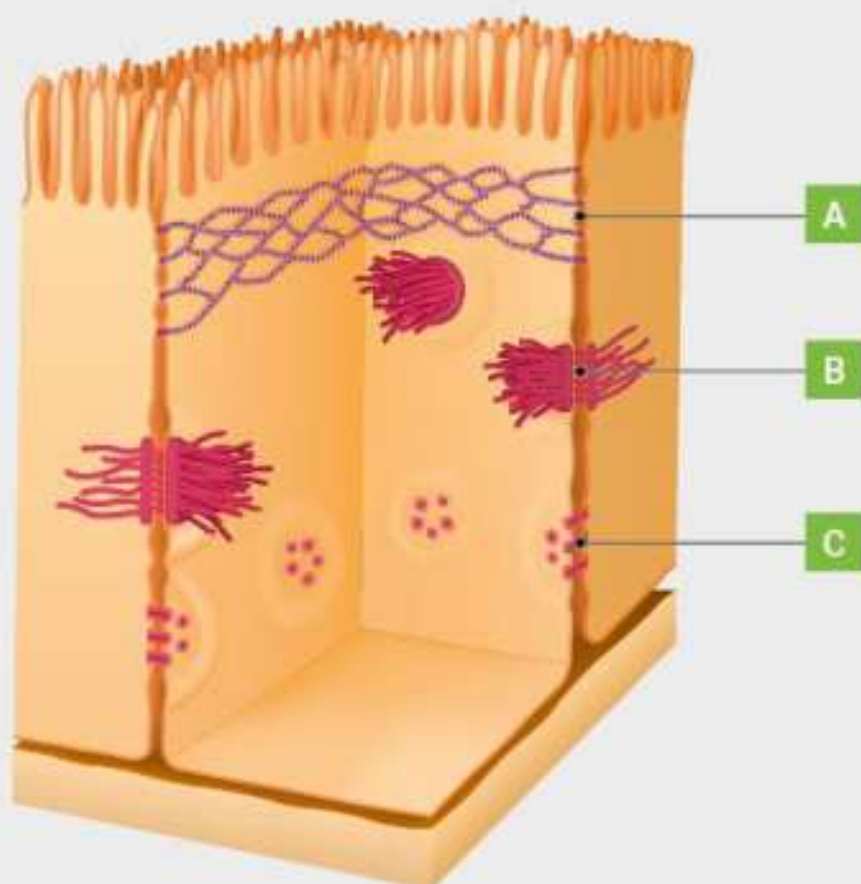


W stosie cystern wyróżnia się dwie strefy (powierzchnie): *cis* oraz *trans*.

Przyporządkuj je do struktur oznaczonych na rysunku A i B oraz wyjaśnij funkcję powierzchni *trans*. Zapisz rozwiązanie w zeszycie.

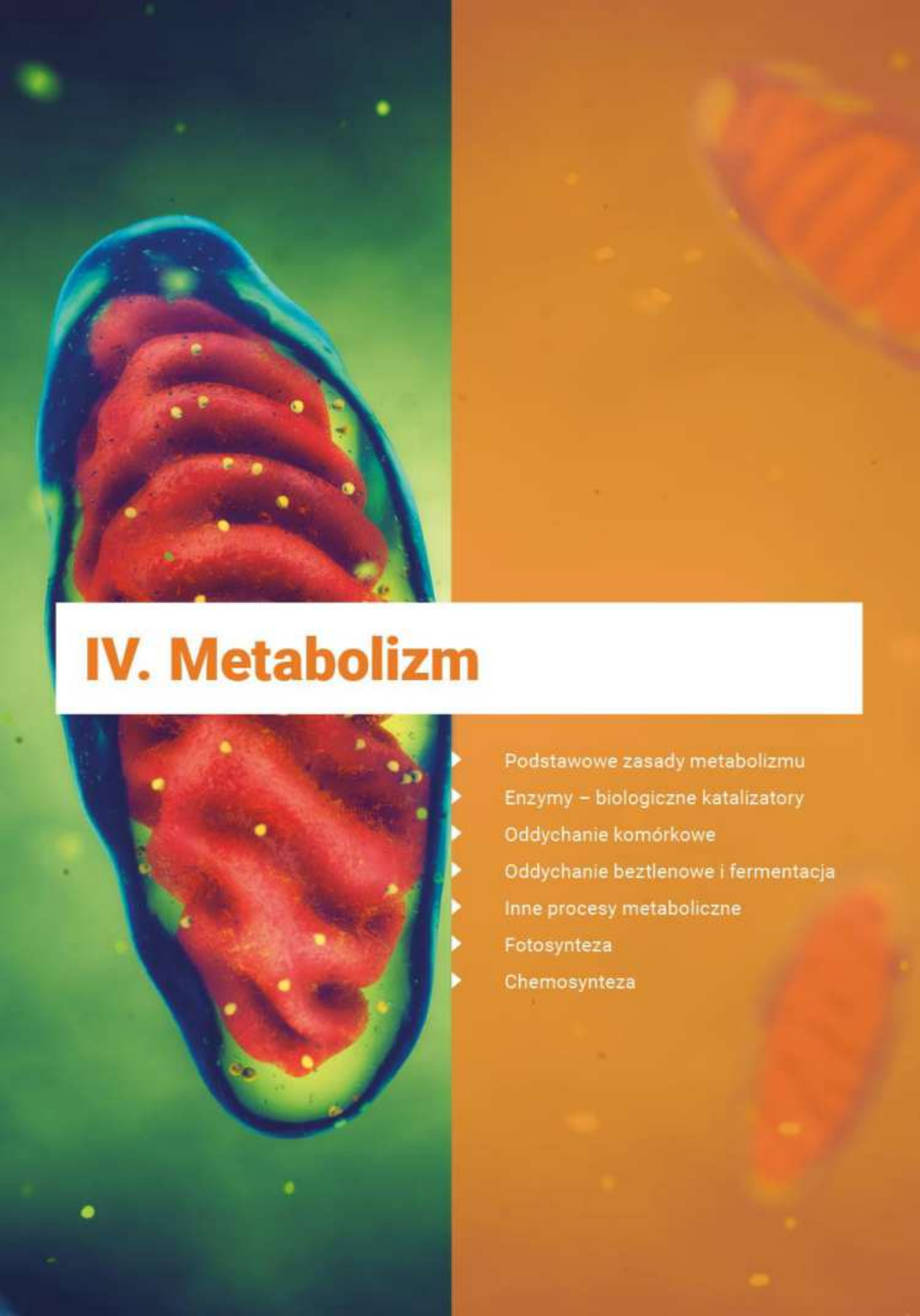
10. (0–2 pkt)

U zwierząt występują trzy rodzaje połączeń międzykomórkowych: połączenie zamykające, desmosomy i połączenia szczelinowe. Na rysunku przedstawiono trzy różne rodzaje połączeń międzykomórkowych.



10.1. Wskaż rysunek przedstawiający połączenia szczelinowe. Uzasadnij swój wybór za pomocą jednego argumentu. Zapisz odpowiedź w zeszycie.

10.2. Podaj jedno podobieństwo i jedną różnicę między połączeniami oznaczonymi na rysunku A i B. Zapisz odpowiedź w zeszycie.



IV. Metabolizm

- ▶ Podstawowe zasady metabolizmu
- ▶ Enzymy – biologiczne katalizatory
- ▶ Oddychanie komórkowe
- ▶ Oddychanie beztlenowe i fermentacja
- ▶ Inne procesy metaboliczne
- ▶ Fotosynteza
- ▶ Chemosynteza

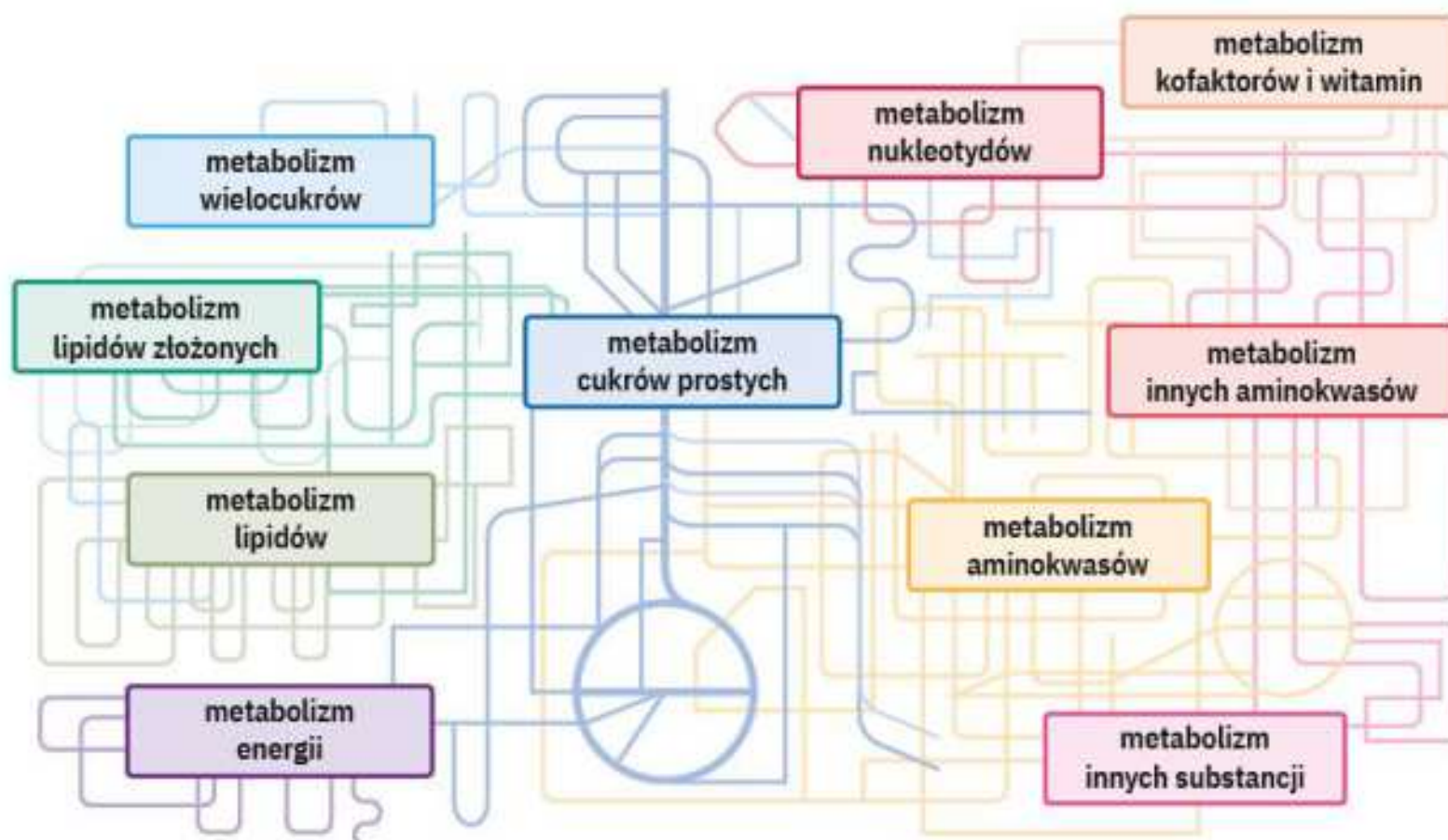
1. Podstawowe zasady metabolizmu

NA TEJ LEKCJI:

- zrozumiesz, czym jest metabolizm;
- poznasz rodzaje metabolizmu;
- dowiesz się, jak są zbudowane przenośniki energii w komórce i jakie funkcje pełnią.

metabolizm ▶

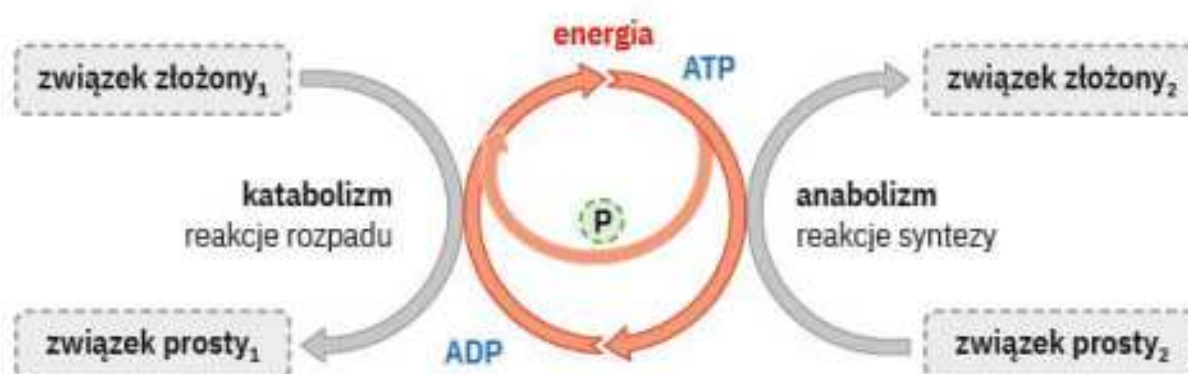
Aktywność organizmu jest uwarunkowana przebiegającymi w jego komórkach reakcjami chemicznymi. Reakcje te umożliwiają wzrost, ruch, reakcje na bodźce czy rozmnażanie się. Leżący u podstaw tych procesów zbiór wzajemnie powiązanych i sprzężonych reakcji nazywamy **metabolizmem** (gr. *metabole* – ‘przemiana’). Gdybyśmy chcieli przedstawić schematycznie aktywność metaboliczną pojedynczej komórki, wyglądałaby ona tak, jak na **rycinie IV.1.1**. Choć wydaje się, że jest to beztłada pętla reakcji chemicznych, w rzeczywistości stanowi ona precyzyjnie rozrysowaną i zaprogramowaną „mapę” aktywności komórki. Co więcej, te reakcje chemiczne przebiegają bez strat – brak produktów ubocznych. Wszystkie naturalnie występujące w cząsteczce związki (m.in. aminokwasy, nukleotydy, hormony) biorące udział w podstawowych reakcjach metabolicznych komórki nazywamy metabolomem. Tego pojęcia możemy używać w stosunku do gatunku (np. metabolom człowieka) albo do konkretnej tkanki czy komórki.



Ryc. IV.1.1. Aktywność metaboliczna pojedynczej komórki.

Reakcje wchodzące w skład metabolizmu dzielą się na:

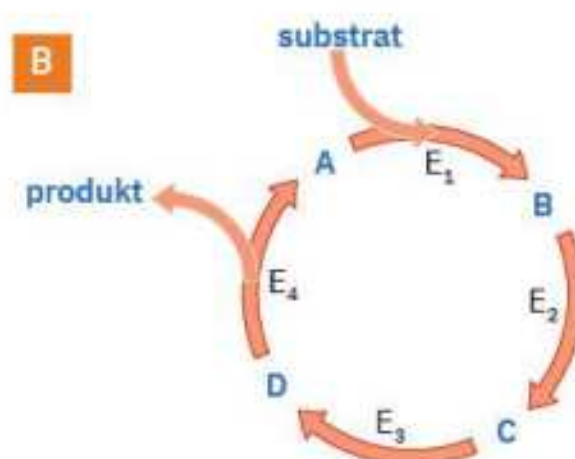
- **anabolizm**, na który składają się reakcje syntezy złożonych produktów z prostych substratów (np. synteza polisacharydów z cukrów prostych czy synteza białek z aminokwasów). Reakcje anaboliczne do swojego przebiegu wymagają zwykle dostarczenia energii, dlatego nazywamy je **endoergicznymi** (zużywają energię) (ryc. IV.1.2.); ♦ anabolizm
- **katabolizm**, który obejmuje reakcje rozkładu złożonych cząsteczek na proste związki chemiczne (np. rozkład skrobi na cukry proste czy białek na aminokwasy). Reakcje kataboliczne przebiegają z wydzieleniem energii, dlatego mówimy, że są **egzoergiczne** (ryc. IV.1.2.). ♦ katabolizm



Ryc. IV.1.2. Metabolizm dzielimy na anabolizm i katabolizm.

Reakcje anaboliczne i kataboliczne wzajemnie się uzupełniają, ale nie są odwracalne. Należy mieć na uwadze, że charakter anaboliczny lub kataboliczny danego procesu określa sumaryczny kierunek zachodzących w nim reakcji. Natomiast pojedyncze reakcje składające się na dany proces mogą być zarówno reakcjami syntezy, jak i rozpadu (np. w cyklu Krebsa czy cyklu Calvina-Bensona; patrz rozdziały 3 i 7). Znaczna część energii uwalnianej w procesach katabolicznych jest zużywana w procesach syntezy (anabolizm). Reakcje metaboliczne są zwykle wieloetapowe i mogą mieć postać:

- **szlaków metabolicznych** – czyli ciągu liniowych, następujących po sobie reakcji chemicznych, w których substrat ulega przekształceniu w produkt (np. glikoliza) (ryc. IV.1.3.A);
- **cykli metabolicznych** – czyli kołowych przemian chemicznych, w których po serii reakcji chemicznych dochodzi do odtworzenia substratu (np. cykl Krebsa, cykl mocznikowy) (ryc. IV.1.3.B).



Ryc. IV.1.3. Typowe przemiany metaboliczne: szlak metaboliczny (A) i cykl metaboliczny (B).

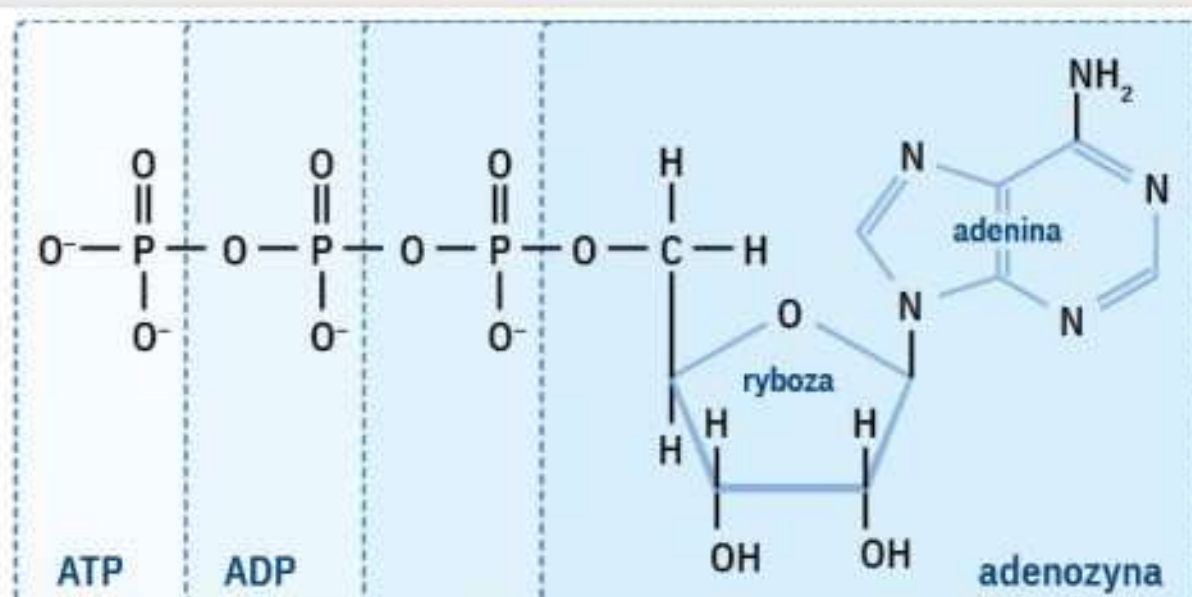
Znajomość przebiegu reakcji metabolicznych pozwala na zrozumienie wielu aspektów funkcjonowania komórki i organizmu w ogóle. Jest to podstawa diagnostyki oraz terapii. Wiedzę na temat przebiegu szlaków/cykli metabolicznych oraz reakcji pośrednich wykorzystuje się także do biologicznych procesów przemysłowych. W tym celu można zastosować tzw. **pułapkę metaboliczną**, czyli wychwycić określony produkt powstający na którymś z etapów szlaku metabolicznego. Na przykład dodatek wodorosiarczynu(IV) sodu (NaHSO_3) do fermentujących drożdży wiąże powstający w czasie tego procesu aldehyd octowy. To powoduje, że nie powstaje etanol, a gromadzi się glicerol. Taką pułapkę metaboliczną wykorzystali już Niemcy w czasie pierwszej wojny światowej do produkcji nitrogliceryny.

Przenośniki energii w komórce

Reakcje składające się na metabolizm przebiegają albo z wydzieleniem energii (egzoergiczne), albo z jej zużyciem (endoergiczne). Wymiana energii wymaga istnienia uniwersalnego jej nośnika, który w reakcjach syntezy będzie służył jako donor, a w reakcjach rozkładu – jako akceptor energii. Podobnie jest w handlu, w którym uniwersalnym nośnikiem wartości danego produktu są pieniądze. Kiedy coś kupujemy, pula pieniędzy ulega zmniejszeniu, a kiedy coś sprzedajemy – ilość pieniędzy się zwiększa. W komórce uniwersalnym środkiem wymiany energii jest

ATP ▶ **adenozynotrifosforan**, czyli **ATP**. Możemy go zatem traktować jako obiegową walutę komórki. ATP gromadzi energię, która powstaje z utleniania zawartych w pokarmach węglowodanów, tłuszczów czy białek. W reakcjach wymagających energii (np. reakcje warunkujące ruch, aktywny transport, biosyntezy) ATP jest jej natychmiastowym donorem.

Z chemicznego punktu widzenia ATP jest nukleotydem składającym się z adeniny (zasada azotowa), rybozy (cukier) oraz trzech reszt fosforanowych (**ryc. IV.1.4.**). Połączenie ze sobą reszt fosforanowych przypomina złączone ze sobą wagony pociągu, które można przyłączać lub odłączać w zależności od potrzeby.

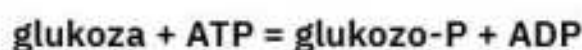


Ryc. IV.1.4. ATP to przenośnik energii zbudowany z adeniny, rybozy i trzech reszt fosforanowych. Hydroliza ATP prowadzi do powstania ADP i nieorganicznego fosforanu.

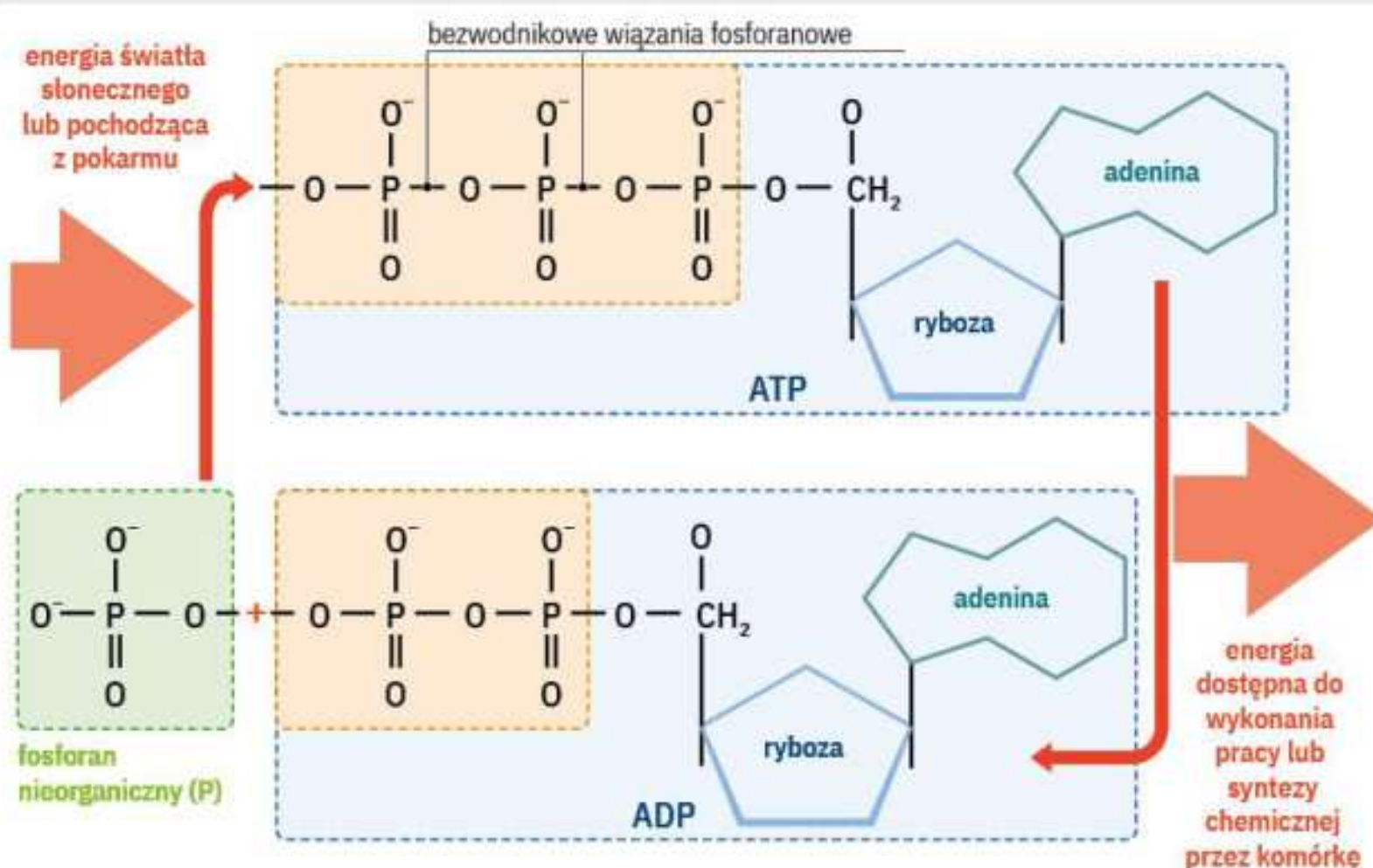
Odlączenie reszty fosforanowej od ATP w wyniku hydrolizy wiązania fosforanowego prowadzi do powstania adenyndifosforanu (ADP) i uwolnienia reszty fosforanowej w postaci nieorganicznego fosforanu (P_i) (**ryc. IV.1.5.**). ADP może być z kolei hydrolizowane do adenyndomonofosforanu (AMP). Reakcje te są egzoergiczne i przebiegają z wyzwoleniem dużych ilości energii (**ryc. IV.1.5.**). Zatem energia w ATP zawarta jest w dwóch wysokoenergetycznych wiązaniach między resztami fosforanowymi. ♦ energia ATP



W komórce reakcja hydrolizy ATP (do ADP i P_i) jest sprzężona z reakcjami endoergicznymi (czyli wymagającymi dostarczenia energii). Przykład tego typu reakcji stanowi synteza sacharozy z cząsteczek glukozy i fruktozy. Uproszczony schemat tej reakcji możemy zapisać następująco:



Zatem można powiedzieć, że ATP pośredniczy w reakcjach metabolicznych komórki i łączy reakcje egzoergiczne z endoergicznymi. Cykl ATP-ADP jest podstawowym sposobem wymiany energii w układach biologicznych (**ryc. IV.1.5.**).



Ryc. IV.1.5. Cykl ATP-ADP łączy reakcje endoergiczne z egzoergicznymi.

fosforylacja ▶ Syntezę ATP z ADP i nieorganicznego fosforanu (P) nazywamy **fosforylacją**. Fosforylacja jest sprzężona z reakcjami, w których dochodzi do wydzielenia się energii. Wyróżniamy trzy podstawowe typy fosforylacji, które zostaną omówione w dalszej części podręcznika:

- **fosforylacja substratowa**
- **fosforylacja oksydacyjna**
- **fosforylacja fotosyntetyczna.**

W komórkach zwierzęcych ATP powstaje w **mitochondriach**, a w komórkach roślinnych oprócz mitochondriów głównym miejscem ich produkcji są **chloropla-**



Ryc. IV.1.6. Aktywność fizyczna wzmacnia zużycie ATP.

sty. ATP nie może być transportowany pomiędzy komórkami ani też w obrębie komórki. Należy zaznaczyć, że ATP jest bezpośrednim donorem energii, a nie jej formą długotrwałego magazynowania. W typowej komórce cząsteczka ATP jest zużywana w przeciągu 1 minuty. W ciągu doby, w czasie odpoczynku człowiek wykorzystuje około 40 kg ATP. Wyśiłek fizyczny powoduje znaczny wzrost zużycia ATP (nawet do 0,5 kg na minutę). Na przykład na dwugodzinny bieg potrzeba aż 60 kg ATP (**ryc. IV.1.6.**). Zatem kluczowe w tym przypadku są reakcje kataboliczne, podczas których jest syntetyzowane ATP.

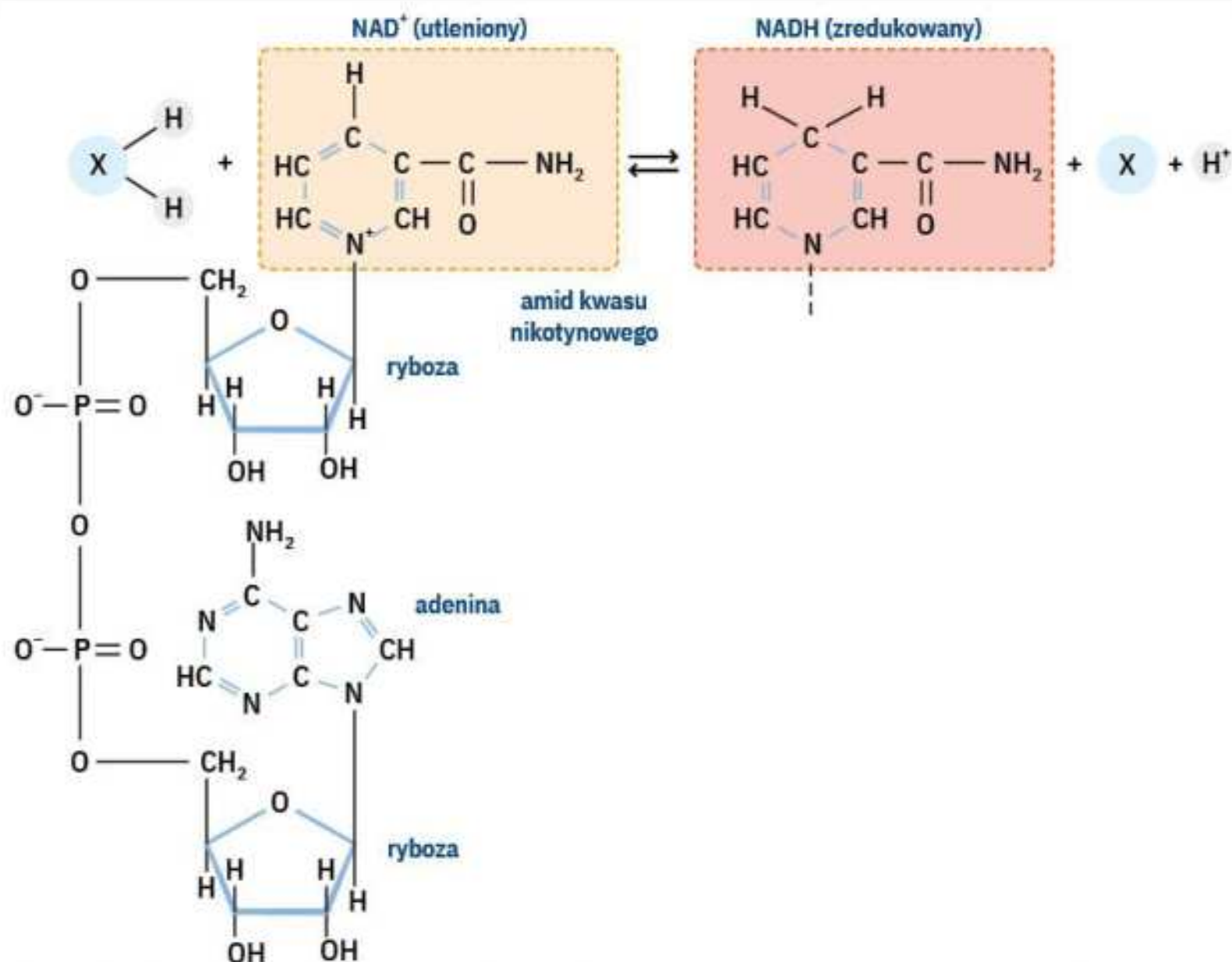
przenośniki energii

▶ **Przenoszenie energii w reakcjach redoks**

Obrót energii w komórce bazuje głównie na przenoszeniu reszt fosforanowych z ATP. Część energii jest przenoszona także z elektronami. W czasie reakcji **utleniania** uwalniają się elektrony, a w czasie reakcji **redukcji** elektrony są przyłączane. Reakcje utleniania i redukcji nazywa się reakcjami **redoks** dla podkreślenia, że zachodzą jednocześnie. Uwolniony w czasie utleniania elektron nie występuje bowiem w stanie wolnym w komórce, tylko zostaje przyjęty przez inną cząsteczkę, która w tym czasie ulega redukcji. Substancja utleniana, która traci elektrony, traci też wraz z nimi energię zgromadzoną w wiązaniu, które tworzyły. Energię tę zyskuje związek będący akceptorem elektronu, który tym samym ulega redukcji. Ważne procesy metaboliczne, takie jak oddychanie komórkowe czy fotosynteza, stanowią ciąg sprzężonych ze sobą reakcji redoks, który jest związany z transportem elektronów (i energii) z jednej cząsteczki na inną.

Ponieważ trudno jest odłączyć sam elektron od cząsteczki, w rzeczywistości jest odłączany cały atom wodoru (zbudowany z elektronu i protonu). W związku z tym wiele reakcji redoks bazuje na transporcie całego atomu wodoru, a nie samego elektronu.

Najbardziej rozpowszechnionym przenośnikiem elektronów (i protonów) jest **dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy** (NAD^+) (ryc. IV.1.7.). Przyjmując dwa elektrony i proton, NAD^+ ulega redukcji do NADH . Razem z elektronem NADH przyjmuje energię, więc możemy powiedzieć, że jest formą „naładowaną” energią. NADH z kolei może przekazać elektrony, a wraz z nimi energię na cząsteczkę innego związku – tzn. przejść z formy zredukowanej na utlenioną NAD^+ . Energia ta przechodzi zwykle przez szereg przenośników i ostatecznie jest wykorzystana do produkcji ATP.



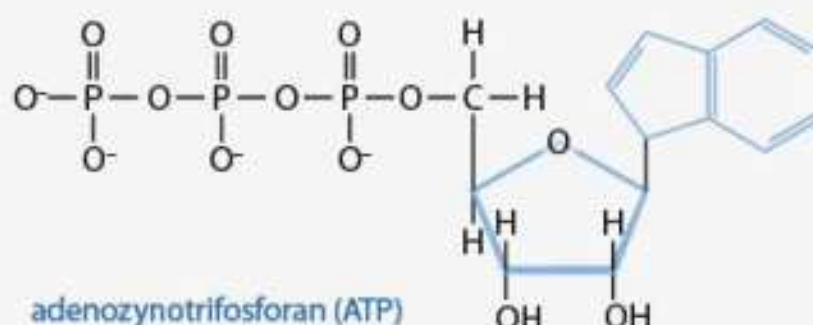
Ryc. IV.1.7. Struktura chemiczna NAD^+ i NADH . NAD^+ jest zbudowany z dwóch nukleotydów połączonych resztami fosforanowymi. NAD^+ (forma utleniona) przechodzi w NADH (formę zredukowaną) w wyniku przyłączenia dwóch elektronów i protonu z innego związku organicznego.

Innym przenośnikiem elektronów jest **fosforan dinukleotydu nikotynoamidoadeninowego** (NADP^+). Od NAD^+ różni się obecnością reszty fosforanowej. W przeciwieństwie do NADH , zredukowana forma NADPH nie bierze udziału w syntezie ATP, ale dostarcza energii do określonych reakcji (np. związanych z fotosyntezą czy syntezą kwasów tłuszczowych).

Inny przenośnik elektronów i protonów to **dinukleotyd flawinowy** (FAD). Jego zredukowaną formą jest FADH_2 . FADH_2 bierze udział w tlenowym oddychaniu komórkowym (patrz niżej).

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wytłumacz, co oznacza pojęcie „metabolizm”. Wyjaśnij, na czym polega różnica pomiędzy anabolizmem i katabolizmem.
2. Przerysuj do zeszytu schemat przedstawiający budowę ATP i podpisz jego elementy budowy.

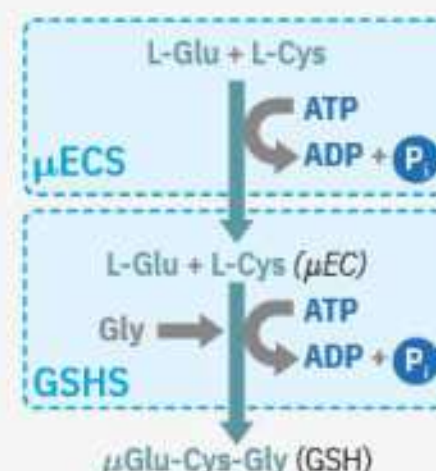


3. Uzasadnij rolę ATP jako uniwersalnego nośnika energii. Podaj przykłady innych nośników energii biorących udział w reakcjach metabolicznych komórki.
4. Poniższy schemat przedstawia dwuetapową reakcję, której ostatecznym produktem jest glutation – silny komórkowy antyutleniacz.

4.1. Przepisz do zeszytu poniższe zdania, wybierając jedną z zaproponowanych odpowiedzi.

Pierwszy etap syntezy glutationu jest reakcją endoergiczną/egzoergiczną, ponieważ energia jest zużywana/wydzielana. Drugi etap procesu jest związany z fosforylacją/defosforylacją ATP/ADP, zatem to reakcja endoergiczna.

4.2. Uzasadnij, czy przedstawiony proces jest szlakiem, czy cyklem metabolicznym.



PODSUMOWANIE LEKCJI

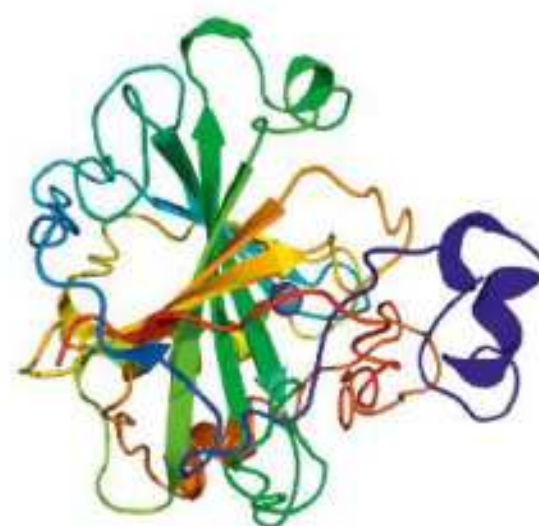
- s. 172 ▶ • **Metabolizm** to zbiór wszystkich reakcji chemicznych i przemian energii zachodzących w komórkach.
- s. 173 ▶ • **Anabolizm** to endoergiczne reakcje syntezy, a **katabolizm** to egzoergiczne reakcje rozkładu.
- s. 173 ▶ • Reakcje składające się na metabolizm mogą mieć formę wieloetapowych **szlaków** lub **cykli metabolicznych**.
- s. 174 ▶ • **ATP** jest uniwersalnym środkiem wymiany energii w komórce.
- s. 175 ▶ • **Energia w ATP** jest zawarta w dwóch wysokoenergetycznych wiązaniach między resztami fosforanowymi.
- s. 176 ▶ • Reakcje syntezy ATP z ADP i P_i nazywamy **fosforylacją**.
- s. 176 ▶ • $NADH$, $NADPH$ oraz $FADH_2$ są **przenośnikami elektronów i protonów**.

2. Enzymy – biologiczne katalizatory

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak są zbudowane enzymy i jakie funkcje pełnią;
- przeanalizujesz przebieg reakcji enzymatycznej;
- poznasz parametry charakteryzujące szybkość reakcji enzymatycznej;
- prześledzisz, jakie czynniki wpływają na aktywność enzymów;
- poznasz metody badania enzymów;
- dowiesz się, do czego wykorzystuje się enzymy.

Na metabolizm komórkowy składają się tysiące pojedynczych reakcji chemicznych. Reakcje te muszą przebiegać z pewną określoną szybkością, aby dostarczać właściwych produktów w odpowiednim czasie i miejscu. W komórce szybkość reakcji chemicznych regulują **enzymy**. Enzymy są biologicznymi katalizatorami, czyli czę- enzymy
steczkami, które przyspieszają reakcję chemiczną, ale nie ulegają zużyciu. Gdybyśmy te same reakcje, które zachodzą w komórce, przeprowadzili bez użycia enzymów, mogłyby one trwać latami (**tab. IV.2.1.**). Enzymy przyspieszają reakcję chemiczną nawet około milion-krotnie. Dlatego mówimy, że kataliza enzymatyczna jest podstawą zachodzenia procesów życiowych na Ziemi. Na przykład prosta reakcja uwodnienia (dołączenia cząsteczki H_2O) dwutlenku węgla pozwalająca na transport CO_2 z tkanek do płuc jest katalizowana enzymatycznie przez anhidrazę węglanową (**ryc. IV.2.1.**). Reakcja w obecności tego enzymu zachodzi 10^7 razy szybciej niż bez niego. W ciągu 1 sekundy anhidraza węglanowa może uwodnić milion cząsteczek CO_2 . Czy bez enzymu proces transportu CO_2 z tkanek do krwi, a potem do pęcherzyków płucnych, byłby równie wydajny?



Ryc. IV.2.1. Anhidraza węglanowa jest jednym z najszybszych enzymów i katalizuje reakcję uwodnienia dwutlenku węgla.

Tab. IV.2.1. Stopień przyspieszenia reakcji przez niektóre enzymy

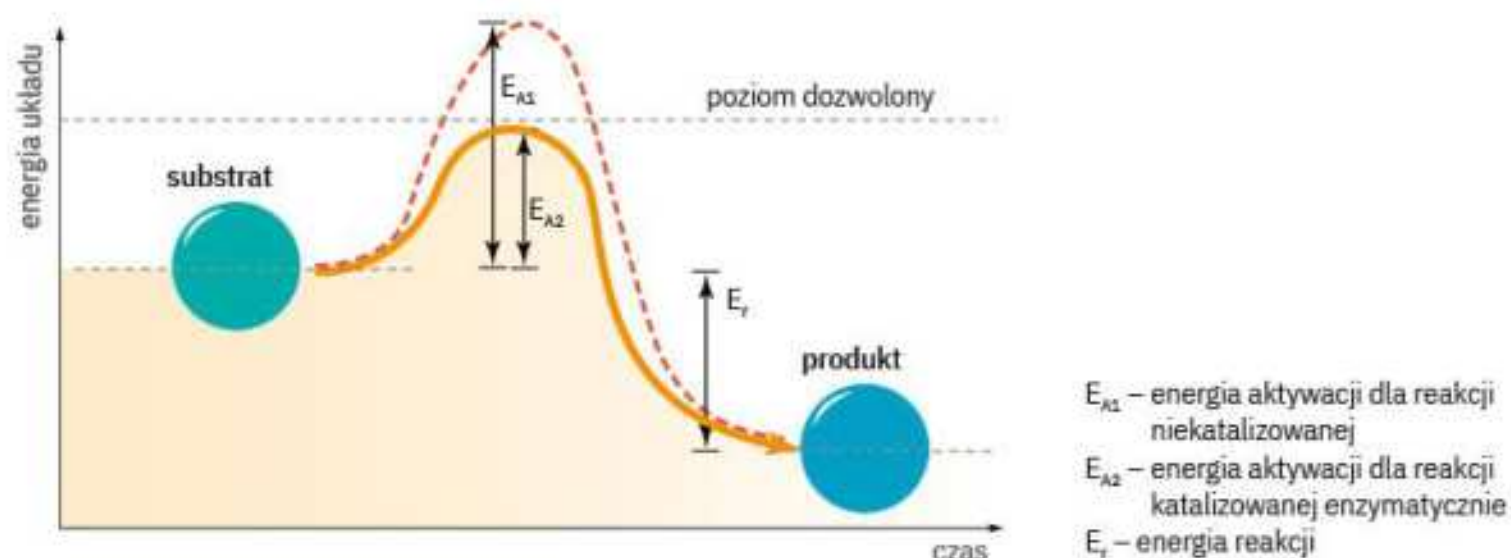
Enzym	Okres półtrwania* reakcji bez enzymu	Szybkość reakcji bez enzymu	Szybkość reakcji z enzymem	Stopień wzmocnienia
dekarboksylaza OMP	78 000 000 lat	$2,8 \times 10^{-16}$	39	$1,4 \times 10^{17}$
nukleaza <i>Staphylococcus</i> (czytaj: stafylokokus)	130 000 lat	$1,7 \times 10^{-13}$	95	$5,6 \times 10^{14}$
karboksypeptydaza A	7,3 roku	$3,0 \times 10^{-9}$	578	$1,9 \times 10^{11}$
izomeraza triozofosfora- nowa	1,9 dnia	$4,3 \times 10^{-6}$	4300	$1,0 \times 10^9$
mutaza choryzmianowa	7,4 godziny	$2,6 \times 10^{-5}$	50	$1,9 \times 10^6$
anhidraza węglanowa	5 sekund	$1,3 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^6$	$7,7 \times 10^6$

*Okres półtrwania reakcji chemicznej to czas, w którym stężenie substratu reakcji chemicznej maleje do połowy wartości początkowej.

Enzymy obniżają energię aktywacji

energia
aktywacji

Do zajścia reakcji chemicznych konieczna jest energia, która pozwala na zerwanie wiązań chemicznych i zapoczątkowanie przemian. Energię tę nazywamy **energiją aktywacji** (E_A) (ryc. IV.2.2.). Enzymy przyspieszają reakcję chemiczną poprzez obniżenie energii aktywacji koniecznej do jej zapoczątkowania. Oznacza to, że w danej jednostce czasu mniejsza ilość energii jest w stanie pobudzić większą liczbę cząsteczek. Reakcja zatem będzie przebiegała szybciej.

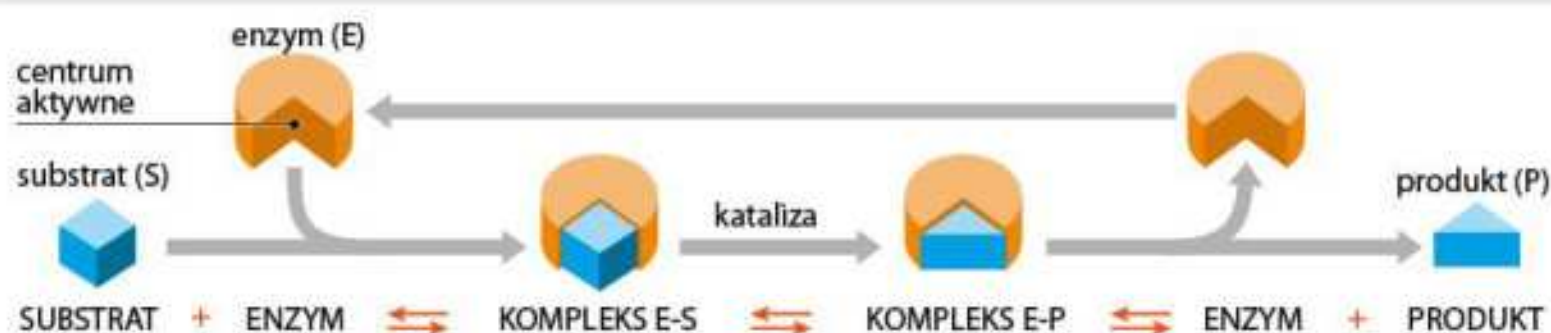


Ryc. IV.2.2. Enzymy obniżają energię aktywacji, dzięki czemu reakcja przebiega szybciej.

Budowa i działanie enzymów

centrum aktywne
enzymu

Wszystkie znane enzymy są białkami, których wielkość (masa cząsteczkowa) mieści się w zakresie 10–500 kDa (kilodaltonów). Cząsteczka enzymu może być zbudowana z jednego lub kilku łańcuchów polipeptydowych. Miejsce na enzymie odgrywające zasadniczą rolę w jego działaniu nazywa się **centrum aktywnym enzymu** (ryc. IV.2.3.). Centrum aktywne stanowi trójwymiarową szczelinę lub zagłębienie, gdzie są rozmieszczone określone reszty aminokwasowe łańcucha polipeptydowego nawiązujące bezpośredni kontakt z substratem. Ciekawe jest, że centrum aktywne stanowi tylko niewielką część całego enzymu. Reszta aminokwasów budująca enzym stanowi „rusztowanie” dla centrum aktywnego.



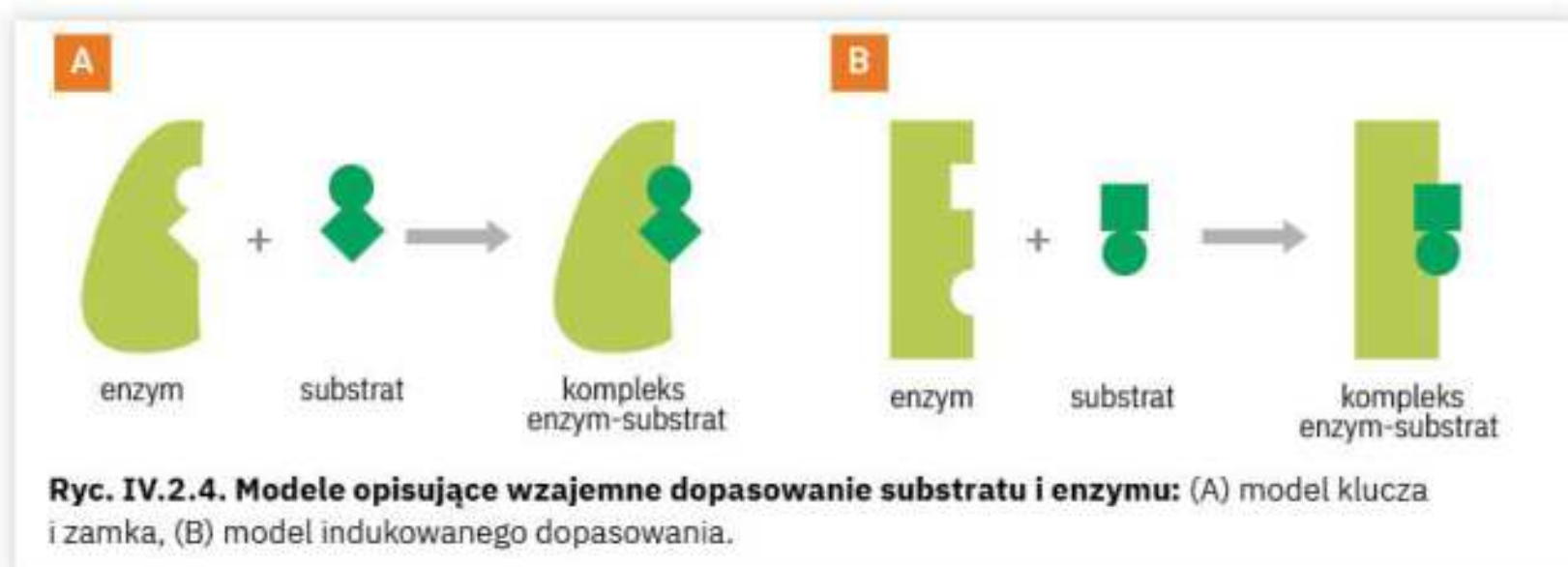
Ryc. IV.2.3. Centrum aktywne enzymu stanowi niewielką jego część. Przyłącza się do niego substrat, tworząc przejściowy kompleks enzym-substrat (kompleks E-S).

W reakcji katalizowanej przez enzym dochodzi do wytworzenia przejściowego **kompleksu enzym-substrat** (kompleks E-S) (**ryc. IV.2.3.**). Do centrum aktywnego enzymu przyłącza się określony substrat, czyli substancja, na którą enzym działa. Następnie w wyniku rozpadu kompleksu E-S uwalnia się produkt i cząsteczka enzymu, która może ponownie związać się z substratem w nowy kompleks E-S (**ryc. IV.2.3.**). Tworzenie kompleksu E-S nie jest tylko przypuszczeniem, jego istnienie zostało potwierdzone eksperymentalnie (z użyciem mikroskopii elektronowej czy krystalografii rentgenowskiej).

W wiązaniu substratu z enzymem w centrum aktywnym biorą udział słabe wiązania: wodorowe, siły van der Waalsa oraz oddziaływania hydrofobowe. Są to siły o niewielkim zasięgu, dlatego też substrat musi być dopasowany swoim kształtem do centrum aktywnego enzymu. Istnieją dwa modele opisujące wzajemne dopasowanie enzymu i substratu:

- **model klucza i zamka**, który zakłada, że substrat swoim kształtem idealnie pasuje do centrum aktywnego enzymu (jak zamek do klucza; **ryc. IV.2.4.**);
- **model indukowanego (wymuszonego) dopasowania**, który zakłada, że centrum aktywne wykazuje pewną elastyczność, co oznacza, że po związaniu substratu dopasowuje się do niego swoim kształtem (**ryc. IV.2.4.**).

model klucza i zamka
model indukowanego dopasowania



Po utworzeniu kompleksu E-S, bliski kontakt i odpowiednie ułożenie reagentów ułatwiają rozrywanie wiązań chemicznych i tworzenie nowych. Substrat ulega przemianie w produkt, który jest uwalniany z enzymu. Enzym nie zużywa się – ta sama cząsteczka enzymu wiąże kolejną cząsteczkę substratu.

Okolo 30% znanych enzymów potrzebuje do swojej aktywności dodatkowych, niebiałkowych składników, które nazywamy **kofaktorami**. Kofaktorami mogą być jony metali (np. magnezu czy wapnia) czy mikroelementy (żelazo, selen, cynk), a także cząsteczki, które łatwo odłączają się od części białkowej enzymu (tzw. **apoenzymu**) i mogą funkcjonować samodzielnie. Nazywamy je **koenzymami**. Do koenzymów zaliczamy: NADH, NADPH, FADH₂, pochodne witamin oraz koenzym A (o którym mowa w dalszej części rozdziału).

kofaktor

Tab. IV.2.2. Przykłady kofaktorów enzymatycznych

Kofaktor	Przykład enzymu
Zn ²⁺	anhydraza węglanowa
Mg ²⁺	heksokinaza
Cu ²⁺	oksydaza cytochromowa
selen	peroksydaza glutationowa
pirofosforan tiaminy (wit. B ₁)	dehydrogenaza pirogronianowa
NAD ⁺	dehydrogenaza mleczanowa
NADP ⁺	dehydrogenaza glukozy-6-fosforanowa
FAD	dehydrogenaza bursztynianowa
fosforan pirydoksalu (wit. B ₆)	aminotransferazy
biotyna (wit. B ₇)	karboksylaza pirogronianowa

Specyficzność enzymów

specyficzność
enzymów

Enzymy biorą udział w niemal każdej reakcji chemicznej organizmu. Ponieważ kształt centrum aktywnego enzymu jest dopasowany do substratu, większość enzymów katalizuje tylko jedną reakcję (lub kilka pokrewnych). Mówimy, że enzym cechuje **specyficzność**, z której wynika ogromna liczba enzymów w komórce. Wyodróżniamy trzy typy specyficzności. Są to:

- **specyficzność substratowa**, która oznacza, że enzym działa tylko na jeden substrat. Ten rodzaj specyficzności wynika ze ścisłego dopasowania miejsca aktywnego enzymu i substratu;
- **specyficzność katalizowanej reakcji** enzymów, która jest warunkowana typem reakcji chemicznej. Enzymy tego rodzaju katalizują określony typ reakcji, a czasami jedną określoną reakcję chemiczną;
- **stereospecyficzność** – powszechna wśród enzymów. Enzym rozpoznaje lub tworzy tylko jeden stereoizomer z danej pary (D lub L).

Nazewnictwo i klasyfikacja enzymów

klasyfikacja
enzymów

Nauka zajmująca się badaniem enzymów to **enzymologia**. Dotychczas zidentyfikowano ponad 4000 enzymów. Każdy z nich ma swoją nazwę. W dawnych czasach odkrywca enzymu nazywał go sam wedle swojego uznania, np. dehydrogenaza NADH ze względu na swoją barwę zyskała nazwę „stary, żółty ferment Warburga”. Wiele potocznych nazw enzymów funkcjonuje do dziś, np. katalaza czy pepsyna. Ponieważ liczba nowo odkrywanych enzymów stale wzrastała, a nadawane im nazwy nic nie mówiły o rodzaju katalizowanej reakcji, w 1961 roku Międzynarodowa Unia Biochemiczna wprowadziła **jednolitą klasyfikację i nomenklaturę** enzymów (tab. IV.2.3.).

Tab. IV.2.3. Główne klasy enzymów

Klasa enzymów	Funkcja	Przykład
1. Oksydoreduktazy	Katalizują reakcje utlenienia-redukcji.	dehydrogenaza mleczanowa
2. Transferazy	Przenoszą grupy funkcyjne pomiędzy cząsteczkami.	aminotransferazy
3. Hydrolazy	Katalizują reakcje hydrolizy – rozszczepianie wiązań poprzez dodanie wody.	trypsyna, pepsyna
4. Liazy	Katalizują powstawanie lub rozpad wiązań podwójnych.	aldolaza, fumaraza
5. Izomerazy	Zmieniają położenie grup funkcyjnych wewnątrz cząsteczki.	epimeraza
6. Ligazy	Łączą dwie cząsteczki kosztem ATP.	ligaza ATP

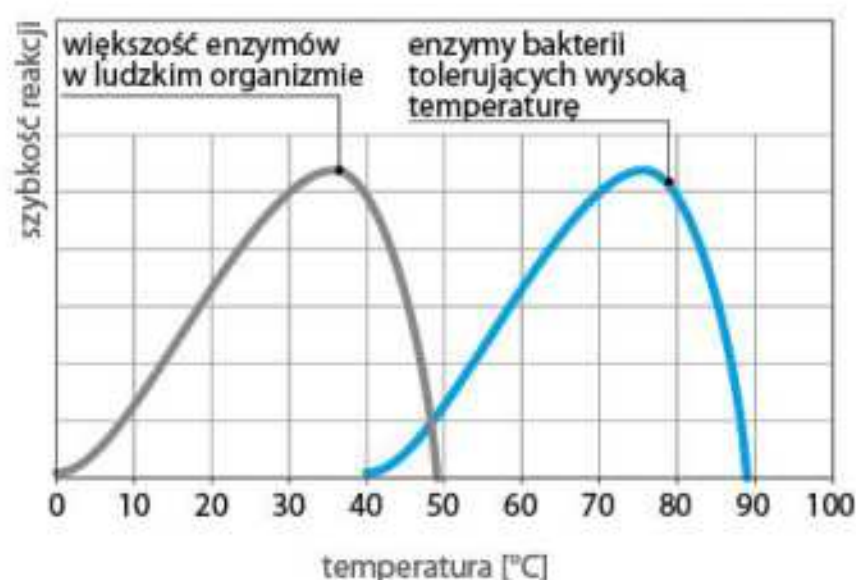
Czynniki wpływające na aktywność enzymów

aktywność enzymów

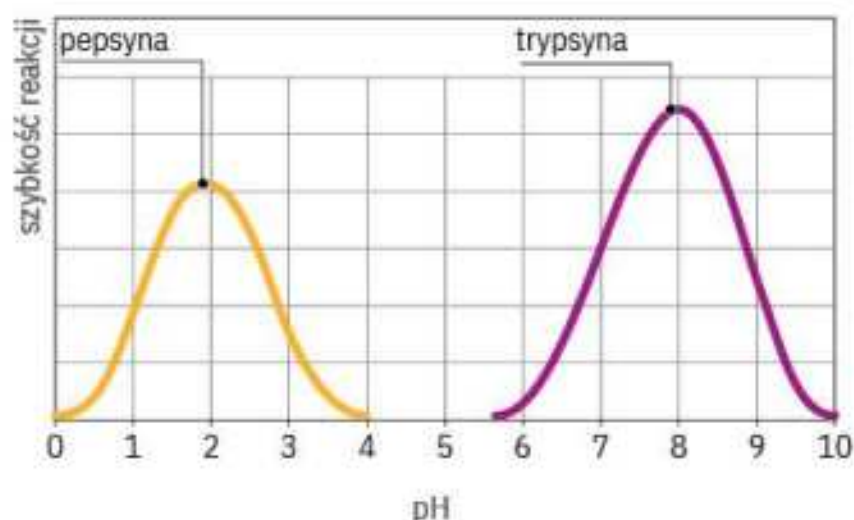
Ponieważ enzymy są białkami, na ich aktywność wpływa wiele czynników. Każdy enzym działa najwydajniej w ściśle dopasowanych dla siebie warunkach, które nazywamy **warunkami optymalnymi**. Na aktywność enzymów w największym stopniu wpływają: **temperatura**, **pH**, związki o charakterze **inhibitorów** i **aktywatorów** oraz **stężenie substratu** (od którego zależy głównie szybkość reakcji enzymatycznej).

■ Temperatura i pH

Wraz ze wzrostem **temperatury** do pewnego stopnia wzrasta też szybkość reakcji enzymatycznej (**ryc. IV.2.5.**). Dalszy wzrost temperatury powoduje gwałtowny spadek szybkości reakcji związany z utratą właściwej konformacji enzymu, czyli denaturacją białka. Każdy enzym ma swoje optimum temperaturowe, przy którym szybkość reakcji jest największa. Dla większości enzymów ludzkich ten zakres mieści się w granicach 35–40°C (temperatura ciała ludzkiego). Są organizmy, np. termofilne bakterie żyjące w gorących źródłach czy gejzerach, których enzymy mają optimum temperaturowe w granicach 70°C lub więcej (**ryc. IV.2.5.**). Te enzymy są szeroko wykorzystywane w przemyśle (np. do produkcji proszków do prania) czy w ochronie środowiska (w oczyszczalniach ścieków).



Ryc. IV.2.5. Wpływ temperatury na aktywność enzymów. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta aktywność enzymu: największa jest w tzw. temperaturze optymalnej, po której następuje spadek aktywności enzymu będący skutkiem jego denaturacji. Optimum temperaturowe dla enzymów komórek człowieka wynosi około 37°C, a dla enzymów bakterii termofilnych – ponad 70°C.



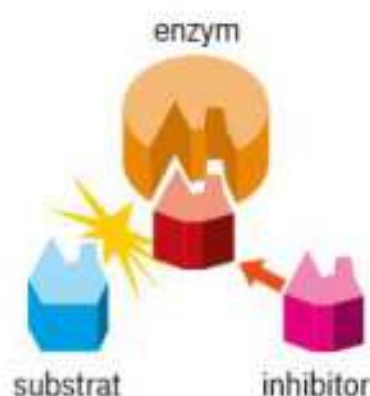
Ryc. IV.2.6. Wpływ pH na aktywność enzymów. Dla pepsyny, enzymu trawiącego białko, optymalne pH wynosi 2. Dla trypsyny, enzymu wydzielanego przez trzustkę, optymalne jest pH o wartości 8.

Do osiągnięcia maksymalnej wydajności enzym musi mieć także **optymalne pH**, które dla większości biokatalizatorów mieści się w przedziale 6–8 (ryc. IV.2.6.). Od tych wartości jest jednak wiele odstępstw. Na przykład pepsyna – enzym trawienny działający w żołądku człowieka – działa najskuteczniej w $\text{pH} = 2$. Pepsyna zachowuje swoją właściwą konformację w kwasowym środowisku żołądka, podczas gdy inne enzymy są w nim denaturowane, np. chymotrypsyna (enzym trzustkowy), którego optymalne pH wynosi 8. Wyjątek stanowi papaina – enzym bez optymalnego pH, który działa efektywnie w zakresie pH od 3 do 10.

inhibitory ▶ **Inhibitory i aktywatory**

Aktywność enzymów może być hamowana przez niektóre związki, które nazywamy **inhibitorami**. Inhibitory dzielimy na **nieodwracalne** i **odwracalne** (ryc. IV.2.7.). Jeśli inhibitor wiąże się kowalencyjnie z cząsteczką enzymu, to takie hamowanie jest nieodwracalne. Na zasadzie inhibicji nieodwracalnej działają liczne trucizny (np. sarin), toksyny (np. DDT) czy antybiotyki (np. penicylina).

INHIBICJA NIEODWRACALNA

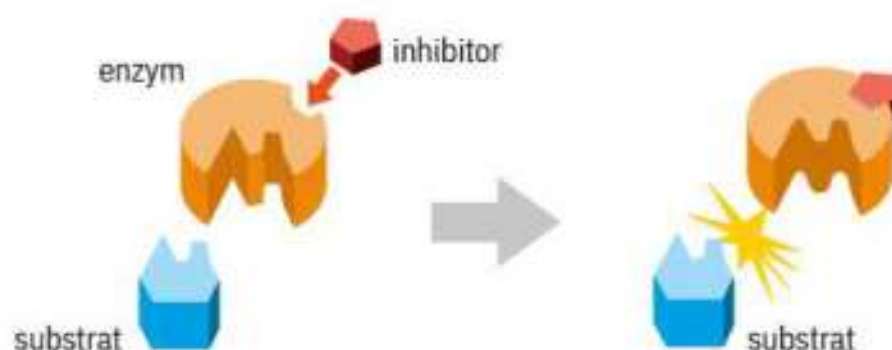


INHIBICJA ODWRACALNA

Inhibicja kompetycyjna



Inhibicja niekompetycyjna



Ryc. IV.2.7. Rodzaje inhibicji enzymatycznej.

Inhibitory odwracalne wiążą się z enzymem za pomocą słabych wiązań i taką inhibicję można zwykle cofnąć. Do inhibitorów odwracalnych zaliczamy inhibitory **kompetycyjne** i **niekompetycyjne** (ryc. IV.2.7.). **Inhibitor kompetycyjny** swoim kształtem przypomina cząsteczkę substratu, która pasuje do danego enzymu, i konkuruje (od ang. *compete*) z tym substratem o centrum aktywne enzymu. Przyłączając się do enzymu, hamuje powstawanie produktu. Ten rodzaj inhibicji można odwrócić poprzez wzrost stężenia substratu, tak aby przy centrach aktywnych gromadziło się ich więcej i aby „wygrywały” konkurencję o przyłączenie się do tego miejsca. **Inhibitory niekompetycyjne** nie współzawodniczą z substratem o centrum aktywne enzymu, przyłączają się one bowiem do innej części enzymu (ryc. IV.2.7.). Enzym może wiązać substrat, ale obecność inhibitora niekompetycyjnego modyfikuje strukturę przestrzenną enzymu, przez co centrum aktywne staje się mniej wydajne w przekształcaniu substratu w produkt lub w ogóle tej reakcji nie przeprowadza.

inhibitor kompetycyjny

inhibitor niekompetycyjny

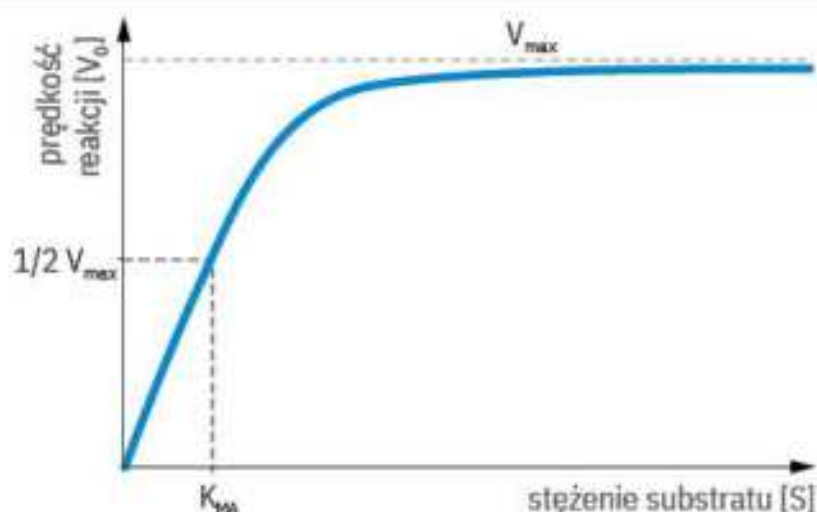
Należy zdawać sobie sprawę, że inhibicja to nie tylko niepożądane zjawisko prowadzące do zahamowania aktywności enzymów. Stanowi także ważny mechanizm regulujący i kontrolujący metabolizm komórkowy.

W przeciwieństwie do inhibitorów **aktywatory** to substancje, które zwiększają szybkość katalizowanej przez enzymy reakcji. W większości przypadków działają one poprzez zmianę konformacji enzymów. Aktywatorami enzymów mogą być jony metali czy nukleotydy. Aktywatory mogą łączyć się z enzymem kowalencyjnie (np. przyłączanie grup fosforanowych do reszt aminokwasowych enzymu) lub niekowalencyjnie (w taki sposób przyłączają się do enzymu jony metali lub nukleotydy).

■ Stężenie substratu i badanie szybkości reakcji enzymatycznych

Wpływ stężenia substratu na szybkość reakcji enzymatycznych nazywamy **kinetyką**. Kinetyka enzymatyczna służy zrozumieniu działania enzymów, tzn. tego, jak szybko mogą one działać przy stężeniach substratów dostępnych w komórce. Właściwości kinetyczne enzymów charakteryzujemy za pomocą następujących parametrów: **szybkość początkowa** (V_0), **szybkość maksymalna** (V_{max}) oraz **stała Michaelisa-Menten** (K_M) (ryc. IV.2.8.).

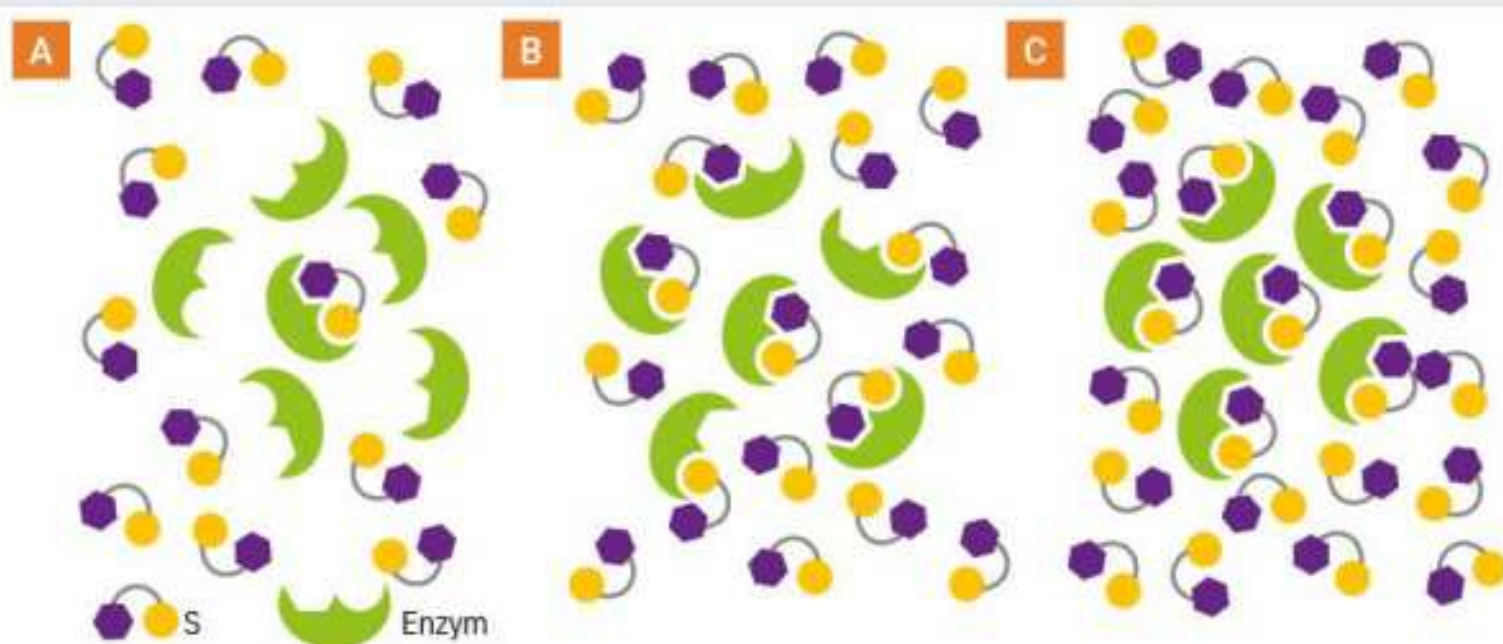
szybkość reakcji enzymatycznej



Ryc. IV.2.8. Kinetyka enzymów Michaelisa-Menten, czyli wykres zależności szybkości początkowej reakcji od stężenia substratu S .

Szybkość początkowa V_0 to ilość produktu (wyrażana w stężeniu molowym) tworzonego na sekundę przy stałym stężeniu enzymu. Jak pokazano na **rycinie IV.2.8.**, szybkość reakcji enzymatycznej rośnie wraz ze wzrostem stężenia substratu, a następnie zwalnia, osiągając maksymalną, stałą wartość przy wyższych stężeniach. Tę sytuację możemy przedstawić za pomocą uproszczonego schematu (**ryc. IV.2.9.**), pamiętając, że:

- reakcja enzymatyczna przebiega z tworzeniem się kompleksu enzym–substrat;
- stężenie enzymu nie zmienia się;
- zwiększeniu ulega stężenie substratu.



Ryc. IV.2.9. Zależność szybkości reakcji enzymatycznej od stężenia substratu. Wraz ze wzrostem stężenia substratu rośnie szybkość reakcji, gdyż dostępna ilość enzymów wiąże cząsteczki substratu w kompleks E-S (A i B); dalsze zwiększanie stężenia substratu (C) nie wpływa na zwiększenie szybkości, gdyż dostępna pula enzymów jest zajęta (niedostępna).

Przy małym stężeniu substratu dostępna ilość enzymu jest w stanie związać go w kompleks E-S (**ryc. IV.2.9.A**). Zwiększenie stężenia substratu (**ryc. IV.2.9.B**) prowadzi do powstania kolejnych kompleksów E-S w miarę dostępności enzymu. Przy dużym stężeniu substratu (**ryc. IV.2.9.C**) wszystkie dostępne cząsteczki enzymu zostają „obsadzone” substratami, tworząc kompleksy E-S. Ta sytuacja odpowiada wypłaszczonej części na wykresie (**ryc. IV.2.8.**). Mówimy, że reakcja enzymatyczna osiągnęła **szybkość maksymalną V_{max}** , to znaczy, że wszystkie enzymy są zajęte i reakcja biegnie, ale ze stałą szybkością (maksymalną, jaką dany enzym może osiągnąć). Kolejne cząsteczki substratu będą mogły być związane przez enzym dopiero po wytworzeniu produktu i uwolnieniu enzymu. Dogodnym parametrem określającym wydajność działania enzymu jest **stała Michaelisa**, czyli K_M . Jest to takie stężenie substratu, przy którym szybkość reakcji osiąga połowę szybkości maksymalnej. K_M wyrażamy w jednostkach stężenia molowego. Stała Michaelisa odzwierciedla aktywność enzymu i jego powinowactwo z substratem. Im mniejsze K_M , tym większe powinowactwo enzymu z substratem. Wartości K_M dla wybranych enzymów przedstawiono w **tabeli IV.2.4**.

stała Michaelisa ►

Tab. IV.2.4. Wartości stałej Michaelisa dla wybranych enzymów

Enzym	K_M [μM]
chymotrypsyna	5000
lizozym	6
galaktozydaza	4000
anhydraza węglanowa	8000
penicylinaza	50
syntetaza arginylo-tRNA	3

Regulacja aktywności enzymów w komórce

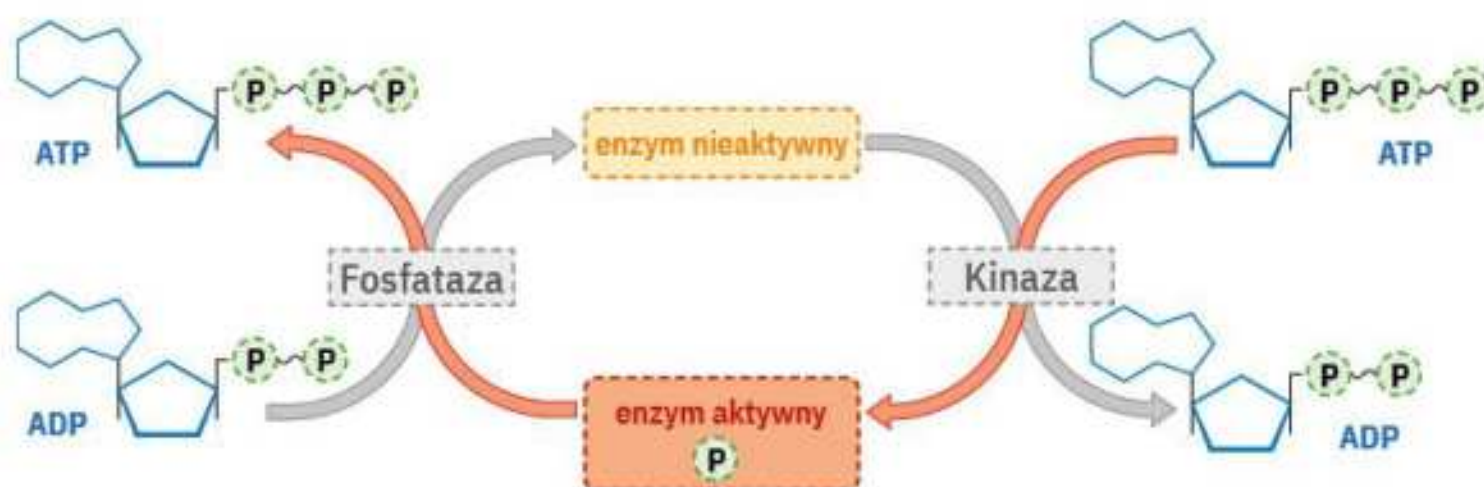
regulacja
aktywności
enzymów

Gdyby reakcje metaboliczne zachodziły w komórce równocześnie bez kontroli, panowałby ogromny chaos. Kontrola aktywności enzymów odbywa się zarówno na poziomie genetycznym (włączanie i wyłączanie genów), jak i molekularnym.

W komórce istnieje wiele sposobów regulacji aktywności enzymów, np:

- **Przyłączanie określonych grup do cząsteczki enzymu** (np. fosforanowych lub cukrowych).

Przyłączanie i odłączanie reszt fosforanowych do enzymu nazywa się **fosforylacją/defosforylacją enzymu**. Proces ten zachodzi często i może zwiększać lub zmniejszać aktywność enzymów w zależności od zapotrzebowania komórki. Fosforylację enzymu katalizuje enzym zwany kinazą, a defosforylację – fosfataza. Źródłem grup fosforanowych jest ATP, a ich akceptorem – ADP (**ryc. IV.2.10.**).



Ryc. IV.2.10. Regulacja aktywności enzymów poprzez dołączanie i odłączanie reszt fosforanowych.

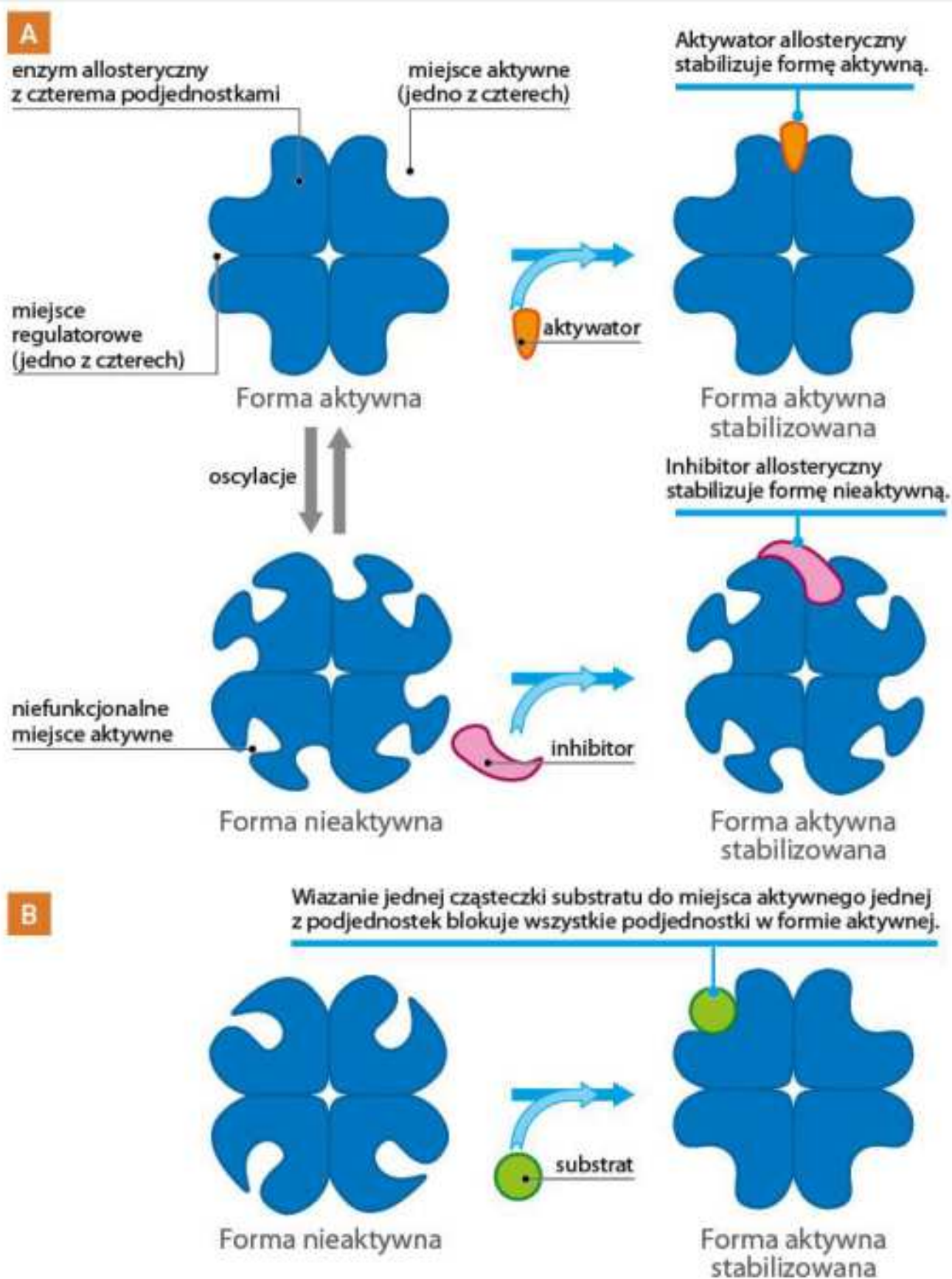
- **Wydzielanie enzymów w postaci ich prekursorów, tzw. proenzymów**

Te nieaktywne formy ulegają aktywacji dopiero po wydzieleniu do miejsca działania danego enzymu. Przykładem tego typu regulacji są enzymy proteolityczne, np. **pepsynogen** jest proenzymem pepsyny z soku żołądkowego, a **trypsynogen**

– trypsyny z soku trzustkowego. Ten mechanizm zapobiega ewentualnym uszkodzeniom narządów, w których komórkach są one wytwarzane.

■ Regulacja allosteryczna

Polega ona na kontroli aktywności enzymu (hamowaniu lub aktywowaniu) poprzez związanie się cząsteczki regulatorowej w innym niż centrum aktywne miejscu. Regulacja allosteryczna dotyczy przede wszystkim enzymów zbudowanych z podjednostek, z których każda ma swoje centrum aktywne (**ryc. IV.2.11.**).



Ryc. IV.2.11. Regulacja allosteryczna aktywności enzymów. (A) oscylacje pomiędzy formą aktywną i nieaktywną enzymu, (B) kooperatywność.

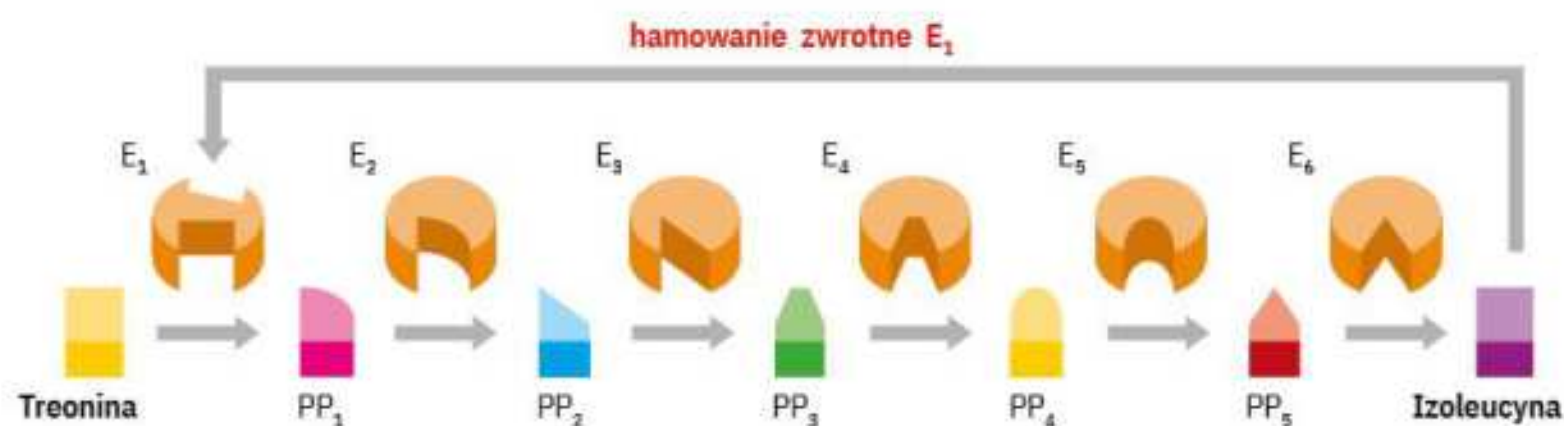
Taki kompleks enzymatyczny ma dwie formy różniące się strukturą przestrzenną – jedna jest formą aktywną, a druga jest nieaktywna (**ryc. IV.2.11.A**). Regulacja allosteryczna polega na przyłączeniu się aktywatora lub inhibitora do tzw. miejsc regulatorowych (znajdujących się zwykle na granicy podjednostek enzymu). Przyłączenie aktywatora stabilizuje formę aktywną enzymu, a związanie inhibitora stabilizuje formę nieaktywną. Dodatkowo informacja o związaniu się konkretnej cząsteczki regulatorowej „przepływa” kolejno przez wszystkie podjednostki enzymu, zmieniając strukturę całego kompleksu enzymatycznego. Regulatorowymi cząsteczkami allosterycznymi dla kilkunastu enzymów są ATP i ADP. ATP działa jak inhibitor, a ADP jak aktywator, w licznych szlakach anaboliczno-katabolicznych.

Odmianą regulacji allosterycznej jest także **kooperatywność** (**ryc. IV.2.11.B**). W tym przypadku rolę regulatora przejmuje **substrat**, który po związaniu się z centrum aktywnym jednej podjednostki enzymu oddziałuje na centra aktywne pozostałych podjednostek. Przyłączenie substratu wywołuje zmianę konformacji nie tylko tam, gdzie się przyłączy, lecz także w pozostałych podjednostkach, ułatwiając im przyjęcie kolejnych cząsteczek substratu. Przykładem kooperatywności jest działanie **hemoglobiny**. Hemoglobina nie jest enzymem, ale w dużym uproszczeniu możemy powiedzieć, że jest białkiem o właściwościach enzymatycznych. Składa się z czterech podjednostek, z których każda ma miejsce wiążące tlen. Związanie tlenu do jednej z tych podjednostek umożliwia jego przyłączenie do pozostałych podjednostek.

■ **Sprzężenie zwrotne ujemne**

◀ sprzężenie zwrotne ujemne

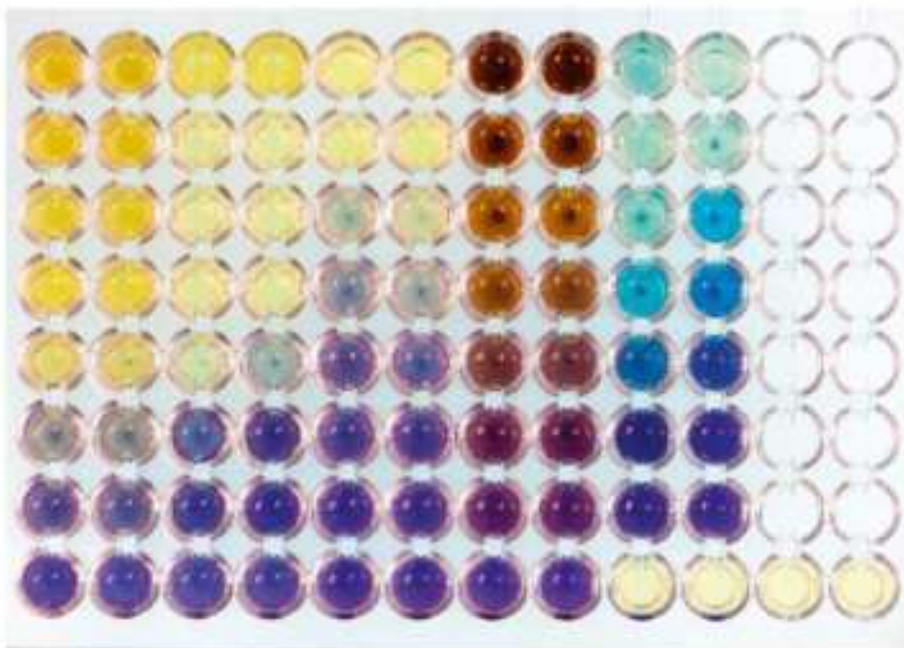
Ten rodzaj kontroli metabolicznej polega na wyłączaniu określonego szlaku metabolicznego w wyniku związania się końcowego produktu z enzymem działającym na którymś z początkowych etapów (**ryc. IV.2.12.**). Hamowanie przez sprzężenie zwrotne ujemne chroni komórkę przed nadmierną ilością danego związku chemicznego, który stanowiłby zbędny dla niej balast.



Ryc. IV.2.12. Regulacja aktywności enzymu przez sprzężenie zwrotne ujemne na przykładzie metabolizmu aminokwasów. Końcowy produkt – izoleucyna – jest inhibitorem enzymu katalizującego pierwszą reakcję szlaku metabolicznego (powstawanie produktu PP₁ z treoniny). Następuje zahamowanie tej reakcji, a w efekcie brak syntezy produktu, czyli izoleucyny.

Jak bada się enzymy?

Zasadniczo, te same techniki, których używa się przy badaniu białek, są wykorzystywane w analizie enzymów. W przypadku enzymologii, oprócz oznaczania stężenia enzymu, kluczowe jest określanie jego aktywności. Obecność enzymu wykrywa się w specyficznej dla niego reakcji, którą katalizuje. Do oznaczania aktywności enzymatycznej stosuje się wiele metod, m.in. metody spektrofotometryczne, elektroforezę, chromatografię, metody elektrochemiczne. Wybór metody zależy od rodzaju



Ryc. IV.2.13. Wynik testu ELISA wykrywający enzymy w badanym materiale.

substratów, produktów, środowiska reakcji, kosztów oraz innych czynników. Oznaczanie stężenia enzymu możemy przeprowadzić półilościowo lub ilościowo. Półilościowe oznaczenie służy do szacowania stężenia enzymu, a otrzymane wartości nie są dokładne. Do metod półilościowego oznaczania zawartości enzymu należy metoda **Western Blot**. Pozwala ona wykrywać określone białka w próbkach i umożliwia ich rozdział na podstawie ich mas lub struktury 3D. Opiera się na elektroforezie. Metody ilościowe służą do precyzyjnego określenia stężenia badanego enzymu w danym materiale. Do tych metod zaliczamy: me-

test ELISA ▶ metody izotopowe, nefelometrię oraz szeroko stosowany w diagnostyce **test ELISA** (ryc. IV.2.13.). W teście tym enzymy są wykrywane za pomocą przeciwciał monoklonalnych i związanych z nimi związków chemicznych. Enzym po związaniu do takiego kompleksu i w obecności substratu przeprowadza reakcję, której produkty (najczęściej mające barwę) oznaczane są np. spektrofotometrycznie.

biokatalizatory ▶ **Inne biokatalizatory**

Nie tylko białka mogą pełnić funkcje katalityczne. Związkiem o aktywności enzymatycznej jest także RNA. Katalityczne RNA nazywamy **rybozymami**. Zostały one odkryte przez Thomasa Cecha na początku lat 80. XX wieku. Modelem do badań Cecha był jednokomórkowy pierwotniak. Naukowiec wykazał, że u tego organizmu rybozomy biorą udział w powstawaniu mRNA. Za swoje odkrycia Thomas Cech w 1989 roku otrzymał Nagrodę Nobla. Rybozomy biorą także udział w tworzeniu końcowej formy tRNA. Rybozomy wchodzi w skład licznych wirusów. Jednak najważniejszą rolą katalitycznego RNA jest ich udział w syntezie białek, czyli translacji.

Odkrycie rybozymów zrewolucjonizowało naukę światową i koncepcje dotyczące pochodzenia życia na Ziemi. Potwierdzono, że RNA może istnieć samodzielnie bez udziału białek. Dzięki temu teoria, według której pierwsze organizmy zbudowane były wyłącznie z RNA (tzw. świat RNA), wydaje się bardziej prawdopodobna.

Do związków o właściwościach katalitycznych zaliczamy także **sztuczne enzymy** zwane **synzymami**. Synzymami mogą być peptydy, oligonukleotydy, różnego rodzaju biopolimery, a nawet zeolity (minerały glinokrzemianowe).

Znaczenie i wykorzystanie enzymów

wykorzystanie enzymów

O istotnym znaczeniu enzymów możemy się przekonać, rozpatrując schorzenia, których przyczyną jest brak któregoś z nich. Przykładem takich zaburzeń metabolicznych są fenyloketonuria czy galaktozemia. **Fenyloketonuria** to choroba warunkowana mutacją w genie kodującym enzym katalizujący przekształcenie amino-kwasu fenyloalaniny w inny amino-kwas – tyrozynę. Brak wspomnianego enzymu powoduje nagromadzenie się fenyloalaniny i jej produktów oraz niedobór tyrozyny. Brak leczenia grozi uszkodzeniem mózgu. W Polsce wszystkie noworodki są poddawane badaniu przesiewowemu w celu wykrycia fenyloketonurii (oznaczenia polegają na określeniu stężenia fenyloalaniny we krwi dziecka) (**ryc. IV.2.14.**). W przypadku wystąpienia tej choroby stosuje się dietę eliminującą fenyloalaninę z pokarmów.

Galaktozemia to także choroba warunkowana genetycznie, w której brak jednego enzymu uniemożliwia przekształcenie galaktozy w glukozę, skutkiem czego dochodzi do znacznego nagromadzenia się galaktozy. Dzieci dotknięte galaktozemią są niedorozwinięte fizycznie i umysłowo, często występują u nich choroby towarzyszące, takie jak zaćma czy żółtaczka.

Znajomość budowy enzymów, a także reakcji, które katalizują, oraz specyficznych dla nich substratów jest od dawna szeroko wykorzystywana w **medycynie**. Ilościowe oznaczenia enzymów jako tzw. **markery molekularne chorób** są szeroko stosowane w diagnostyce oraz w terapii (**tab. IV.2.5.**). Zmiany stężenia tych związków dają istotną informację o wystąpieniu, postępie lub zahamowaniu choroby.



|||||

Tu nakleić kod paskowy

Nie dotykać powierzchni krążków!

Nie używać bibuły uszkodzonych!

Pesel: _____

Nazwisko: _____

Płeć: _____

Imię matki: _____

Data urodz.: _____ Godz.: _____

Data pobr.: _____ Godz.: _____

Cieżyżar: _____ Hbd: _____

Apgar: _____ Transfuzja? data: _____

Antybiotyki? _____

Karmienie: Piers ☐ Butelka ☐ Pozaustrojowo ☐

Adres do kontaktu: _____

Telefon: _____

Pobrał: _____

MM/YYYY

Ryc. IV.2.14. Test przesiewowy na fenyloketonurię wykonuje się u wszystkich noworodków. Kilka kropli krwi pobiera się na specjalną bibułę i wysyła do jednego z ośrodków prowadzących oznaczenia.

Tab. IV.2.5. Przykłady markerów enzymatycznych oraz odpowiadających im chorób stosowanych w diagnostyce medycznej

Enzym – marker molekularny	Skrót	Choroba
dehydrogenaza mleczanowa	LDH	choroby nowotworowe (nowotwory mózgu, żołądka)
kinaza fosfokreatynowa	CPK	zawał mięśnia sercowego, uszkodzenie mięśni
amylaza	AMY	świnka, kamica przewodów żółciowych, zapalenie trzustki
fosfataza zasadowa	AP	nadczynność przytarczyc, krzywica, nowotwory kości, uszkodzenie nerek, żółtaczka zaporowa, marskość wątroby, nowotwór płuc, jajników, rak ogona trzustki
fosfataza kwaśna prostatowa	PSA	nowotwór prostaty

Enzymy znalazły także zastosowanie w leczeniu. Na ich bazie powstają tzw. **leki enzymatyczne**. Ich przykłady przedstawiono w **tabeli IV.2.6**.

Tab. IV.2.6. Przykłady leków enzymatycznych

Enzymy jako leki	Choroby, w których są stosowane
tkankowy aktywator plazminogenu i urokinaza	choroba zakrzepowa
asparaginaza	białaczki
lipaza	zaburzenia wydzielnicze trzustki
pankreatyna (wyciąg z trzustek wieprzowych zawierający lipazę, amylazę oraz proteazy)	przewlekłe zapalenie trzustki, mukowiscydoza, niedrożność przewodu trzustkowego lub żółciowego
laktaza	nietolerancja laktozy i zaburzenia żołądkowo-jelitowe

Być może nie zawsze zdajemy sobie z tego sprawę, ale enzymy towarzyszą nam w życiu codziennym. Są szeroko wykorzystywane w:

- przemyśle spożywczym: do produkcji serów (podpuszczka) czy w procesach klarowania soków (pektynaza)
- chemii leków
- ochronie środowiska (np. w procesie oczyszczania biologicznego)
- gospodarstwach domowych (enzymatyczne proszki do prania i wywabiacze plam).

Eksperyment



Wpływ temperatury na aktywność katalazy

Wprowadzenie: Katalaza to enzym należący do klasy 1 oksydoreduktaz i przeprowadzający reakcję rozkładu nadtlenku wodoru do wody i tlenu. Występuje zarówno w tkankach zwierzęcych (np. we krwi), jak i roślinnych (np. w bulwach ziemniaka).

Problem badawczy: Czy wysoka temperatura prowadzi do utraty aktywności katalazy?

Hipoteza badawcza: Pod wpływem wysokiej temperatury katalaza traci aktywność.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: Bulwę ziemniaka zhomogenizować i przesiąknąć przez gazę w celu uzyskania przesączu. W dwóch zlewkach o pojemności 50 ml umieścić po 25 ml przesączu. Do jednej ze zlewek dodać około 2 ml 3-procentowego roztworu nadtlenku wodoru (woda utleniona) (próba kontrolna). Przesącz w drugiej zlewce doprowadzić do wrzenia i gotować około 5 min. Po tym czasie dodać 2 ml nadtlenku wodoru (próba badawcza). W obu zlewkach obserwować wydzielanie się bąbelków tlenu.

Opracowanie wyników: Po przeprowadzaniu doświadczenia opisz w zeszycie jego przebieg, a następnie uzupełnij poniższą tabelę.

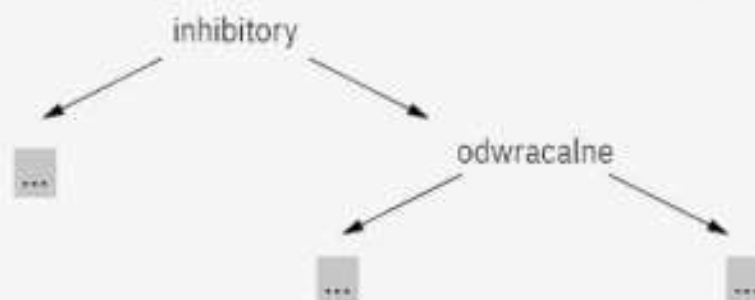
	Próba kontrolna	Próba badawcza
Pienienie się roztworu	...	...
Zmiana barwy roztworu	...	...

Wnioski: Sformułuj wniosek.

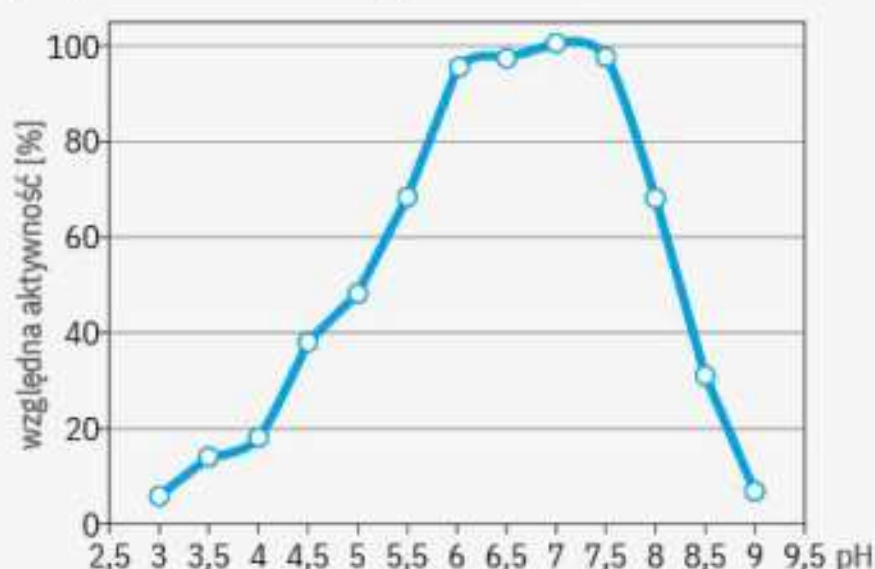
Wykorzystując różnorodne źródła informacji, udziel odpowiedzi na następującą kwestię: Kiedy polejemy zranioną skórę wodą utlenioną, obserwujemy intensywne pienienie się. Dlaczego tak się dzieje? W jakim celu w takiej sytuacji jest stosowana woda utleniona?

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, na czym polega mechanizm działania enzymów w odniesieniu do ich budowy.
2. Podaj trzy przykłady kofaktorów enzymatycznych i wyjaśnij, jaka jest ich rola.
3. Oceń, z czego wynika tak duża liczba enzymów w komórce.
4. Wymień czynniki wpływające na aktywność enzymatyczną.
5. Przerysuj do zeszytu poniższy schemat dotyczący podziału inhibitorów i go uzupełnij.



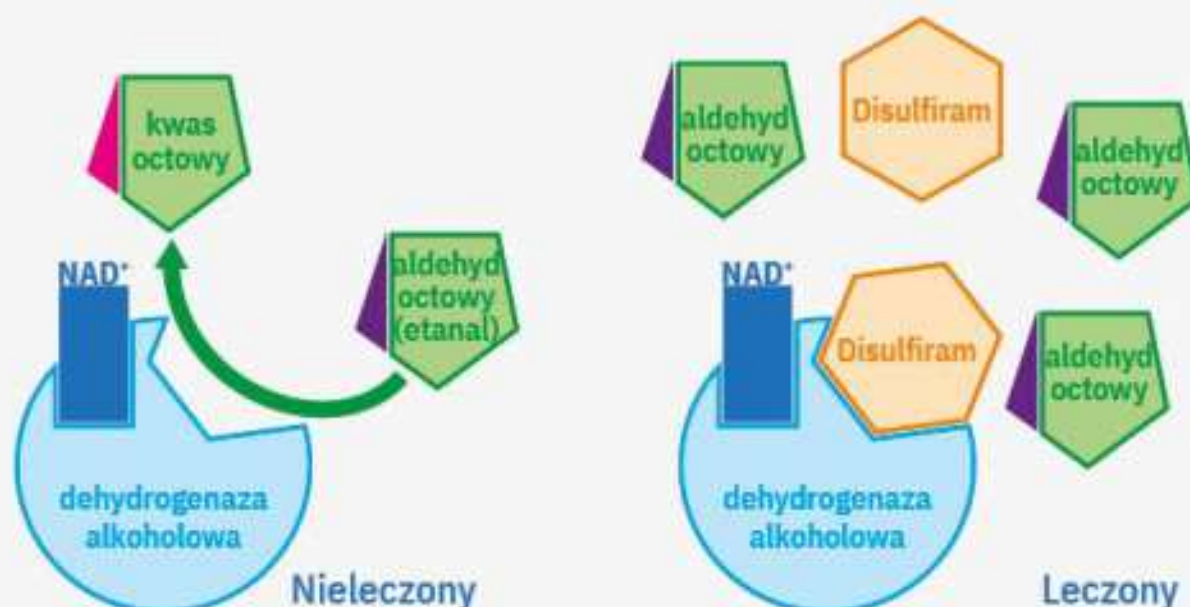
6. Wymień trzy mechanizmy regulacji aktywności enzymów w komórce. Jeden z wybranych mechanizmów przedstaw w postaci graficznej. Zapisz odpowiedź w zeszycie.
7. Wyjaśnij pojęcia: *szybkość maksymalna*, *stała Michealisa*, *kinetyka*.
8. Zingipaina to enzym, którego używa się w przemyśle spożywczym (m.in. do produkcji sera) oraz do zmiękczenia mięsa. Wykorzystuje się go także w kuchni kantońskiej do przygotowywania dań na bazie mleka imbirowego. Na poniższym wykresie przedstawiono zależność aktywności zingipainy w szerokim zakresie pH.



8.1. Odczytaj z wykresu, w jakim pH zingipaina wykazuje największą aktywność.

8.2. Omów możliwości zastosowania zingipainy w reakcjach przebiegających w środowisku kwaśnym (<5).

9. Disulfiram to związek organiczny, lek stosowany w leczeniu alkoholizmu. Jego działanie polega na hamowaniu działania dehydrogenazy aldehydowej – enzymu, który przekształca aldehyd octowy w kwas octowy. W efekcie tej reakcji w organizmie kumuluje się aldehyd octowy, który daje objawy zatrucia. Sposób działania disulfiramu przedstawia poniższy rysunek.



9.1 Powiedz, czy disulfiram działa na zasadzie inhibicji kompetycyjnej czy niekompetycyjnej. Uzasadnij odpowiedź.

9.2. Wyjaśnij, na czym polega lecznicze działanie disulfiramu.

10. Przeczytaj poniższy tekst.

W zanieczyszczonej rzece w Niemczech znaleziono pewne szczepy bakterii beztlenowych, które rozkładają benzynę i zamieszkują złoża ropy naftowej. Bakterie te zawierają nietypowe enzymy. Enzymy przeprowadzają reakcję hydroksylacji (wprowadzają grupę $-OH$ z wody) do węglowodorów. Wykorzystując taki enzym z bakterii, można przeprowadzać syntezę związków, które są w cenie dla przemysłu farmaceutycznego (np. hydroksylacji witaminy D). Enzymy pozyskane z odżywiających się benzyną bakterii mogą (wraz z innymi) być wykorzystane w ciągu reakcji prowadzących do oczyszczania terenu po wycieku ropy naftowej.

Tekst skrócony i zmodyfikowany na podstawie: <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C27651%2Cbakterie-smakoszki-benzyny-i-ich-enzymy-na-uslugach-przemyslu.html>

Na podstawie powyższego tekstu uzupełnij przerysowaną do zeszytu tabelę.

Cechy enzymu	
wymagania tlenowe	...
klasa enzymu	...
zastosowania	...

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Enzymy** są biokatalizatorami i przyspieszają reakcję chemiczną, lecz nie ulegają zużyciu. ◀ s. 179
- Enzymy przyspieszają reakcję chemiczną poprzez **obniżenie energii aktywacji**. ◀ s. 180
- Substrat przyłącza się do enzymu w **centrum aktywnym**, tworząc kompleks enzym-substrat (kompleks E-S). ◀ s. 180
- Oddziaływanie enzymu z centrum aktywnym opisuje **model klucza i zamka** oraz **model indukowanego dopasowania**. ◀ s. 181
- Niektóre enzymy wymagają **kofaktorów** (jonów metali, koenzymów) do swojej aktywności. ◀ s. 181
- Enzymy wykazują **wysoką specyficzność** względem katalizowanej reakcji oraz przyłączanego substratu. ◀ s. 182
- Enzymy podzielono na **sześć klas** (oksydoreduktazy, transferazy, hydrolazy, liazy, izomerazy, ligazy) na podstawie reakcji, którą katalizują. ◀ s. 182
- Na **aktywność enzymów** wpływają temperatura, pH, związki będące ich inhibitorami lub aktywatorami oraz stężenie substratu. ◀ s. 183
- **Inhibitory** dzielimy na odwracalne (kompetycyjne i niekompetycyjne) oraz nieodwracalne. ◀ s. 184
- **Inhibitor kompetycyjny** kształtem przypomina substrat i przyłącza się zamiast niego do centrum aktywnego enzymu. ◀ s. 185
- **Inhibitor niekompetycyjny** ma inny kształt niż substrat i przyłącza się w innym miejscu na enzymie niż centrum aktywne. ◀ s. 185
- **Szybkość reakcji enzymatycznej** opisują takie parametry, jak szybkość początkowa (V_0), szybkość maksymalna (V_{max}) oraz stała Michealisa (K_M). ◀ s. 185
- Aktywność enzymów może być **regulowana** allosterycznie, kooperatywnie lub przez sprzężenie zwrotne. ◀ s. 187
- Do badania enzymów wykorzystuje się techniki elektroforetyczne oraz **test ELISA**. ◀ s. 190
- Oprócz białek **biokatalizatorami** są rybozomy oraz sztuczne enzymy. ◀ s. 190
- Enzymy **wykorzystuje się** w diagnostyce lekarskiej, w farmacji oraz w wielu gałęziach przemysłu. ◀ s. 191

3. Oddychanie komórkowe

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz pojęcie i rodzaje oddychania komórkowego;
- prześledzisz przebieg poszczególnych etapów oddychania tlenowego;
- przeanalizujesz zysk energetyczny oddychania komórkowego;
- dowiesz się, jakie czynniki wpływają na proces oddychania komórkowego;
- poznasz istotę paradoksu tlenowego.

oddychanie
komórkowe
warunki
oddychania
komórkowego

W jaki sposób energia zgromadzona w pokarmach jest wykorzystywana przez organizm? Makrocząsteczki, z których jest zbudowane nasze pożywienie, są najpierw rozkładane do prostych związków i wraz z krwią transportowane do wszystkich komórek organizmu. W komórkach energia wiązań chemicznych tych związków jest przekształcana w energię chemiczną zgromadzoną w ATP. Podstawowy proces kataboliczny, w którym zachodzą te reakcje, to **oddychanie komórkowe**. Może ono przebiegać w obecności tlenu lub bez jego dostępu. To pierwsze nazywamy **oddychaniem tlenowym** (aerobowym), a to drugie – **oddychaniem beztlenowym** (anaerobowym). Bez udziału tlenu przebiega także **fermentacja**. Wszystkie te szlaki są egzoergiczne, gdyż uwalniają energię, która jest zużywana przez komórkę.

Oddychanie tlenowe

Podstawowymi substratami oddychania tlenowego są drobnocząsteczkowe związki powstające w czasie trawienia pokarmów, m.in. glukoza, kwasy tłuszczowe, glicerol czy aminokwasy. Związki te są przekształcane w aktywną, dwuwęglową cząsteczkę – **acetylo-CoA** (czytaj: acetylokoenzym A), który jest substratem dla kolejnych etapów oddychania tlenowego (**ryc. IV.3.1.**). Ponieważ w komórkach organizmów glukoza jest głównym węglowodanem i ważnym paliwem energetycznym (przede wszystkim dla mózgu i erytrocytów), w omawianiu oddychania komórkowego uwzględniono glikolizę – szlak kataboliczny glukozy.

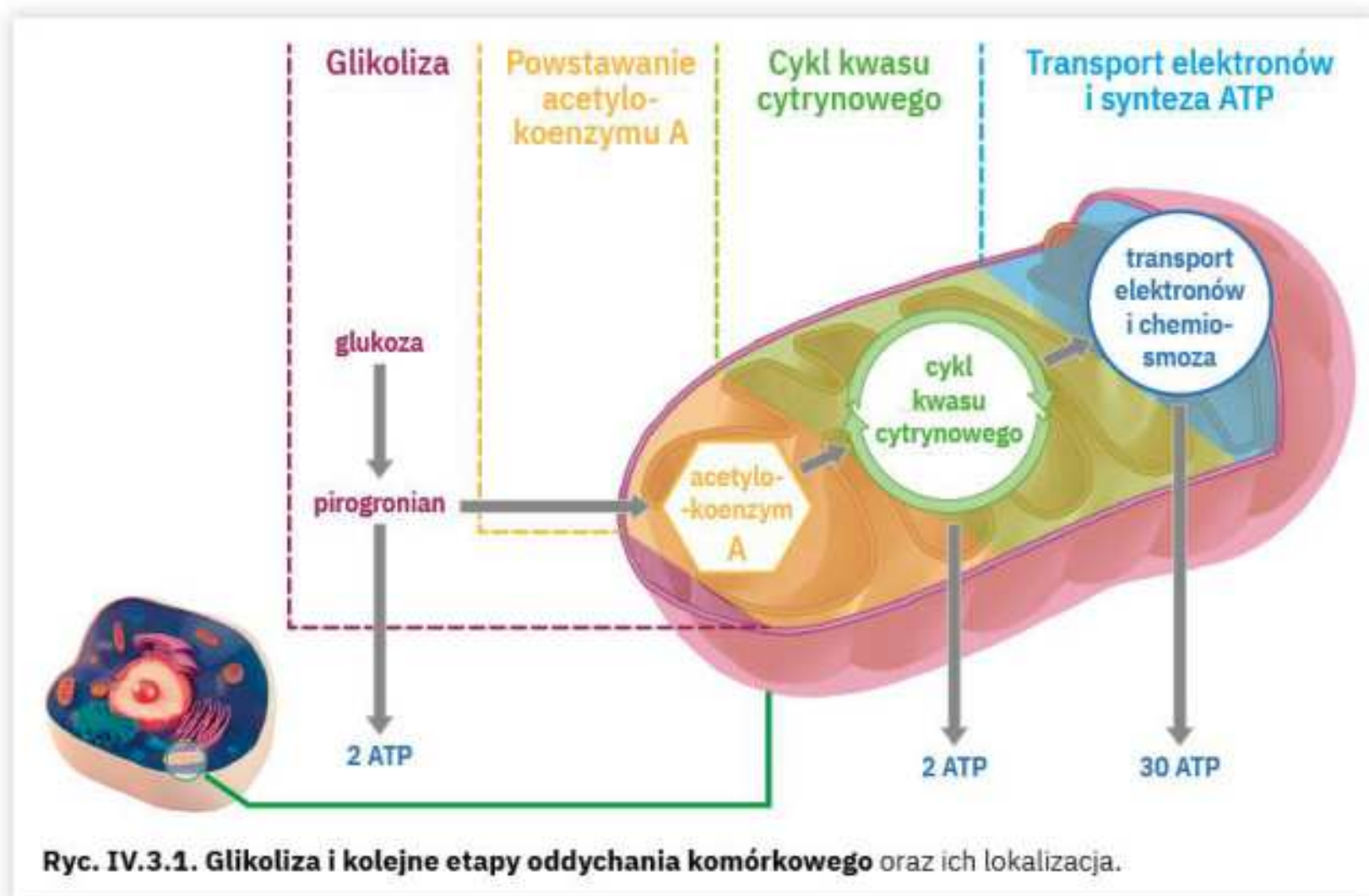
Etapy oddychania komórkowego i ogólny zarys procesu

etapy oddychania
komórkowego

➤ Oddychanie komórkowe składa się z czterech etapów, z których każdy zlokalizowany jest w innych kompartamentach komórkowych (**ryc. IV.3.1.**):

1. **glikoliza**, która zachodzi w cytozolu,
2. **reakcja pomostowa** – zachodzi w macierzy mitochondrialnej,
3. **cykl Krebsa**, zwany także cyklem kwasu cytrynowego – zachodzi w macierzy mitochondrialnej.

4. łańcuch transportu elektronów i fosforylacja oksydacyjna przebiegające w grzebieniach mitochondrialnych.



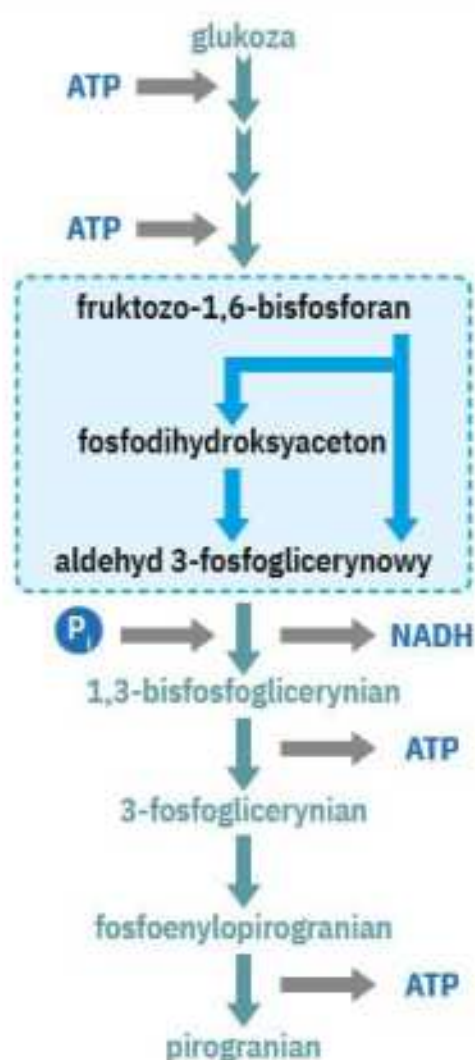
W trakcie glikolizy glukoza jest degradowana do dwóch cząsteczek trójwęglowego związku o nazwie **pirogrońian**. Cykl Krebsa stanowi dalszy ciąg reakcji katabolicznych, w których pochodne pirogrogonianu są dalej utleniane do **dwutlenku węgla**. W trakcie tych etapów elektrony z organicznych substratów są przenoszone na NAD^+ , w wyniku czego powstaje NADH . W czasie glikolizy oraz cyklu Krebsa powstaje niewiele ATP. W ostatnim etapie oddychania komórkowego elektrony (głównie w postaci NADH) trafiają do łańcucha transportu elektronów i są przenoszone z jednej cząsteczki na drugą. Na końcu tej drogi elektrony łączą się z **cząsteczką tlenu** i jonami wodorowymi (H^+) – tak powstaje **woda**. Przepływ elektronów przez łańcuch oddechowy generuje energię, która umożliwia syntezę **ATP**. Ten trzyetapowy proces pozwala na „zamienienie” jednej cząsteczki glukozy na wodę i dwutlenek węgla. Dodatkowym, użytecznym biologicznie zyskiem netto tych przemian jest energia w postaci 30 cząsteczek ATP.

■ **Glikoliza**

◀ glikoliza

Glikoliza to główny szlak rozkładu glukozy przebiegający we wszystkich komórkach, zarówno prokariotycznych, jak i eukariotycznych, w warunkach tlenowych i beztlenowych. Ciąg reakcji glikolitycznych zachodzi w cytoplazmie i prowadzi do przekształcenia jednej cząsteczki glukozy w **dwie cząsteczki pirogrogonianu** (ryc. IV.3.2.). Zyskiem glikolizy są dwie cząsteczki **ATP**.

Glikoliza obejmuje następujące etapy:



Ryc. IV.3.2. Przebieg glikolizy.

Glukoza w szeregu reakcji jest rozkładana do 2 cząsteczek pirogronianu. Zyskiem glikolizy są 2 cząsteczki ATP oraz NADH.

- stabilizacja glukozy – w ciągu czterech reakcji glukoza ulega fosforylacji oraz izomeryzacji; powstały po tym etapie sześciowęglowy związek – fruktozo-1,6-bisfosforan – ma przyłączone dwie grupy fosforanowe pochodzące z dwóch cząsteczek ATP;
- powstanie związków trójwęglowych – sześciowęglowy fruktozo-1,6-bisfosforan jest rozszczepiany do dwóch izomerów trójwęglowych – **aldehydu-3-fosfoglicerynowego** oraz **fosfodihydroksyacetonu**; aldehyd 3-fosfoglicerynowy od razu ulega dalszym przemianom, a fosfodihydroksyaceton dopiero po izomeryzacji do aldehydu 3-fosfoglicerynowego;
- przemiany związków trójwęglowych – aldehyd 3-fosfoglicerynowy jest jednocześnie fosforylowany oraz odwodowany – powstaje 1,3-bisfosfoglicerynian oraz NADH;
- fosforylacja substratowa i powstawanie pirogronianu – grupa fosforanowa z 1,3-bisfosfoglicerynianu jest przenoszona na ADP – powstaje ATP i 3-fosfoglicerynian; ten sposób syntezy ATP nazywamy **fosforylacją substratową**, ponieważ donorem grupy fosforanowej jest substrat, który te reszty przenosi; taksze przemiany glikolizy obejmują przekształcenie 3-fosfoglicerynianu w pirogronian i utworzenie kolejnej cząsteczki ATP.

W czasie glikolizy, podczas przekształcania jednej cząsteczki glukozy w dwie cząsteczki pirogronianu, wytwarzane są **dwie cząsteczki ATP**.

reakcja pomostowa ▶ ■ **Reakcja pomostowa**

Ponieważ glikoliza przebiega w cytoplazmie, a tlenowe oddychanie komórkowe w mitochondriach, pirogronian jest tam przenoszony przez specyficzny białkowy przekaźnik. W mitochondriach ma miejsce **reakcja pomostowa**, w czasie której dwie cząsteczki pirogronianu są przekształcane w dwie cząsteczki acetylokoenzymu-A (acetylo-CoA), włączane następnie do cyklu Krebsa. Warto zaznaczyć, że większość substratów energetycznych (np. kwasy tłuszczowe), także są przekształcane do acetylo-CoA i w tej postaci włączane do cyklu Krebsa. Reakcja ta zatem stanowi pomost pomiędzy reakcjami katabolicznymi węglowodanów, tłuszczów i białek a cyklem Krebsa. Reakcja pomostowa obejmuje następujące etapy:

- dekarboksylacja pirogronianu – po usunięciu grupy karboksylowej z trójwęglowego pirogronianu powstaje dwuwęglowy fragment – **grupa acetylowa** – oraz uwalnia się **dwutlenek węgla**, który opuszcza komórkę;
- utlenienie grupy acetylowej – odłączony wodór przyłącza się do NAD^+ i powstaje NADH;

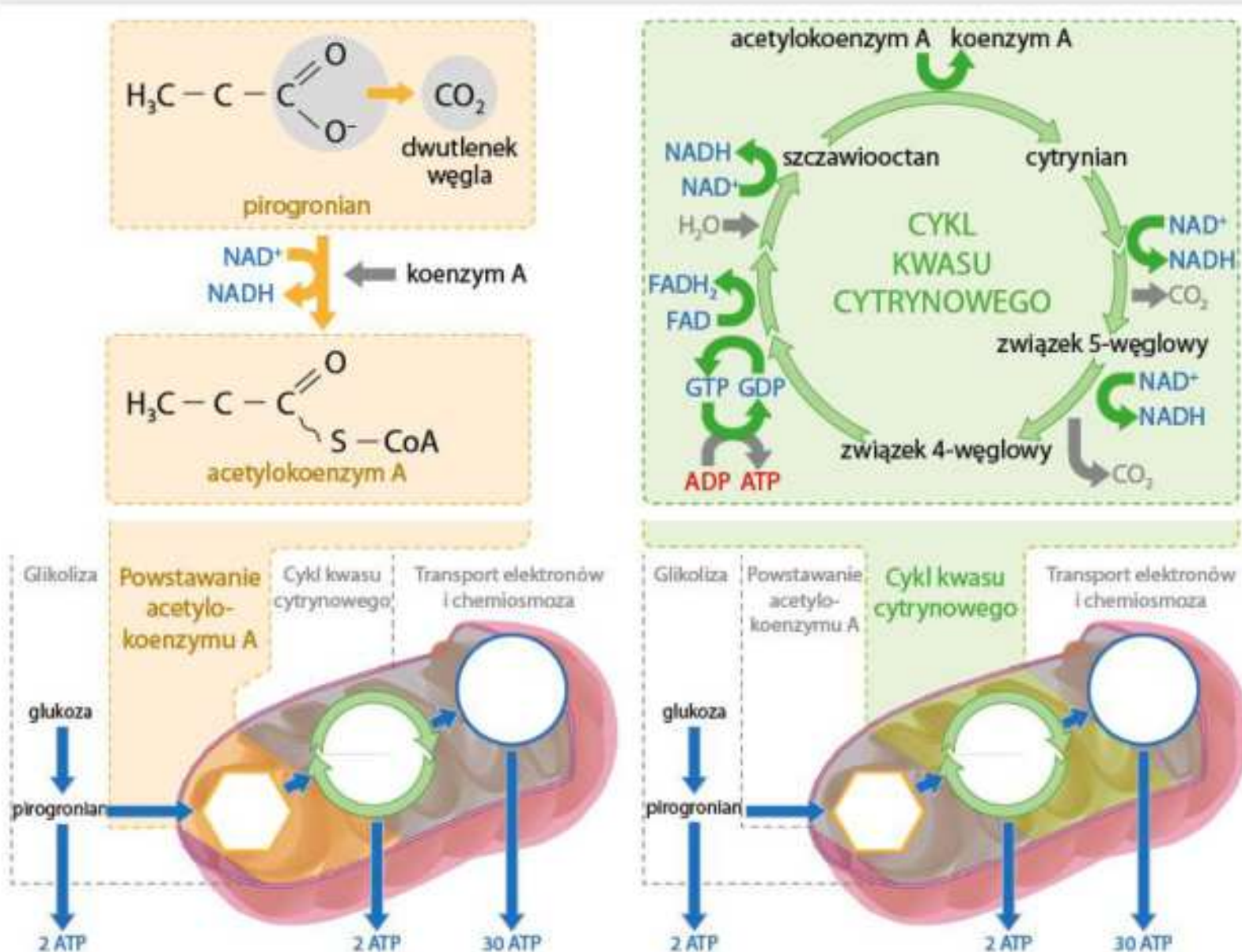
- tworzenie acetylo-CoA – grupa acetylowa przyłącza się do koenzymu A i powstaje acetylo-CoA będący substratem dla cyklu Krebsa.

■ Cykl Krebsa

◀ cykl Krebsa

Zasadniczą funkcją cyklu Krebsa jest łączenie końcowych etapów utleniania węglowodanów, lipidów i białek. Ogólny schemat cyklu przedstawiono na **rycinie IV.3.3**. Składa się z ośmiu reakcji. Na początku grupa acetylowa odłączona od koenzymu A łączy się z czterowęglową cząsteczką szczawiooctanu. Powstaje sześciowęglowy kwas cytrynowy. Kwas ten w ciągu kolejnych reakcji ulega dalszym przekształceniom (m.in. dekarboksylacji, izomeryzacji, utlenieniu), w efekcie których zostaje odtworzony szczawiooctan. Jeden obrót cyklu wytwarza **dwie cząsteczki CO₂, trzy cząsteczki NADH oraz jedną cząsteczkę FADH₂**. Na jednym z etapów cyklu ma miejsce także fosforylacja substratowa, podczas której powstaje jedna cząsteczka ATP, cykl Krebsa musi zajść dwukrotnie, ponieważ glukoza w wyniku glikolizy utlenia się do dwóch cząsteczek pirogronianu. Reasumując, w cyklu Krebsa powstają 4 CO₂, 6 NADH, 2 FADH₂ oraz 2 ATP.

Cykl Krebsa dostarcza głównie wysokoenergetycznych elektronów w postaci NADH oraz FADH₂. Te przenośniki są utleniane w ostatnim etapie oddychania komórkowego – łańcuchu oddechowym.



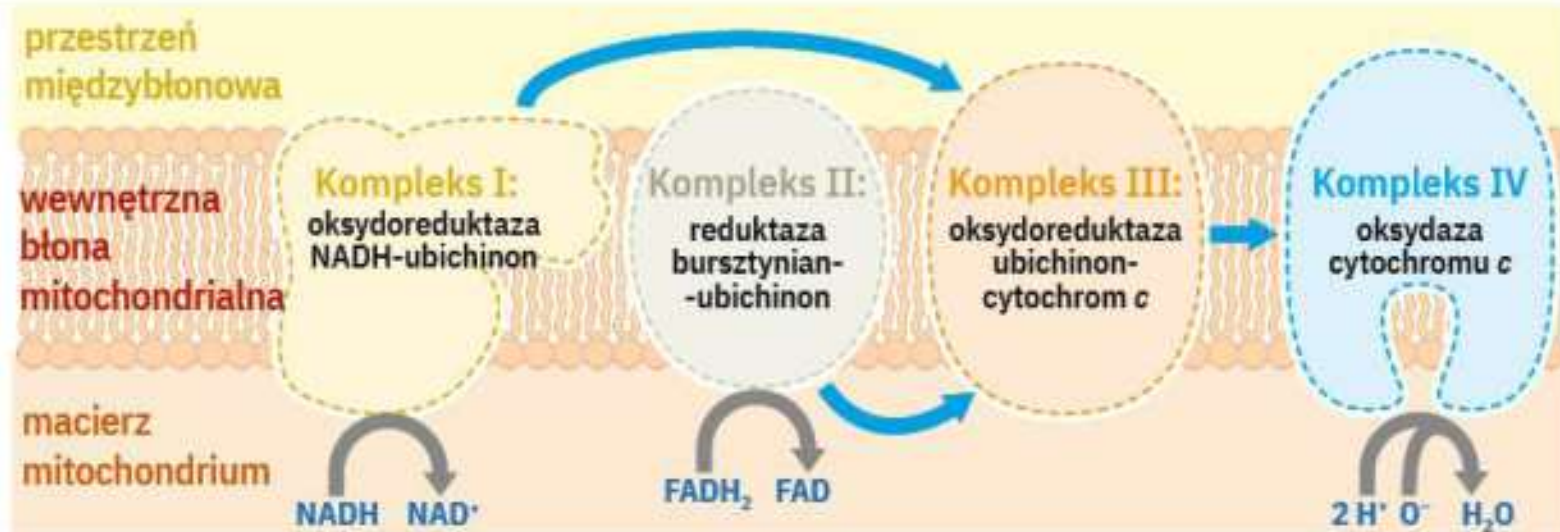
Ryc. IV.3.3. Ogólny schemat reakcji pomostowej i cyklu Krebsa.

Łańcuch oddechowy i fosforylacja oksydacyjna

■ Łańcuch oddechowy i synteza ATP

kompleksy białkowe

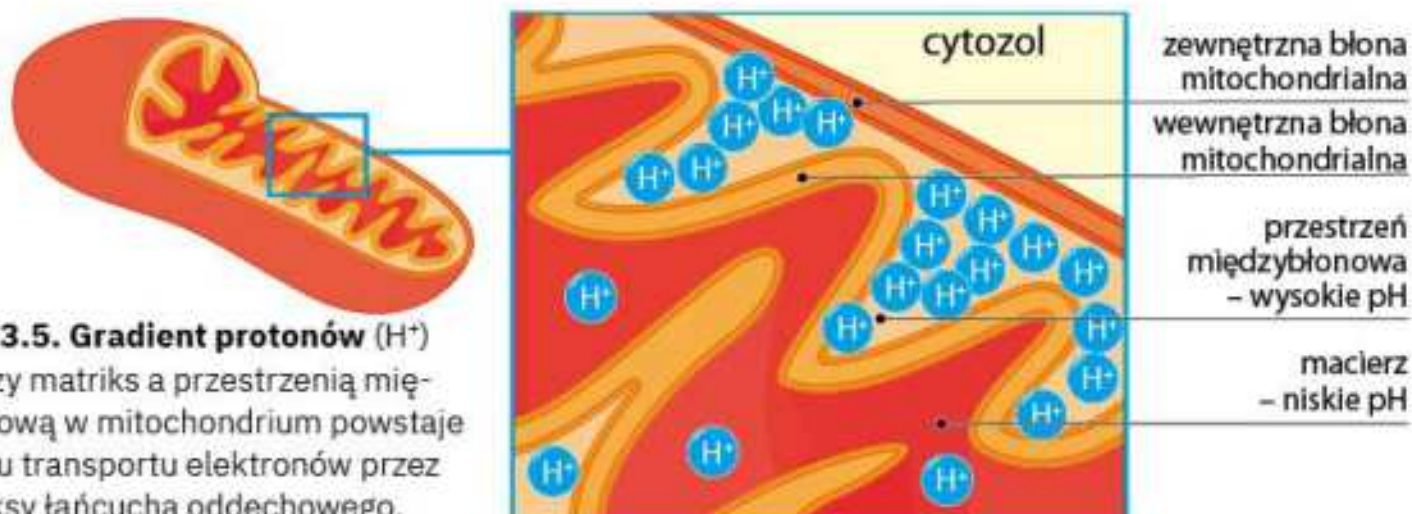
Łańcuch oddechowy to ciąg reakcji przenoszenia elektronów i wodorów z udziałem czterech **kompleksów białkowych** wbudowanych w wewnętrzną błonę mitochondrium. Kompleksy te mają zdolność pobierania wodorów lub samych elektronów od swojego poprzednika (metodą „podaj dalej”). Są one uszeregowane według wzrastającego **potencjału redoks**, który jest miarą powinowactwa z elektronami (**ryc. IV.3.4.**). Im wyższa wartość potencjału redoks, tym łatwiej związek przyjmuje elektrony. Elektrony z NADH oraz FADH₂ pochodzących z cyklu Krebsa przepływają przez kolejne kompleksy łańcucha oddechowego na tlen (O₂). Tlen po przyłączeniu protonów redukuje się do **wody**, która obok CO₂ jest końcowym produktem oddychania komórkowego.



Ryc. IV.3.4. Łańcuch oddechowy polega na transporcie elektronów przez kolejne przenośniki białkowe różniące się potencjałem redoks. Ostatecznie elektrony trafiają na tlen, w wyniku czego powstaje woda.

gradient protonowy

Przepływ elektronów przez kompleksy łańcucha transportu elektronów powoduje równoczesny transport protonów w poprzek błony wewnętrznej mitochondrium. To oznacza, że w przestrzeni międzybłonowej dochodzi do znacznego nagromadzenia się protonów w porównaniu z matriks, gdzie ich stężenie maleje (**ryc. IV.3.5.**). Tworzy się **gradient protonowy** po obu stronach błony. Sytuację tę można porównać do spiętrzenia wody na zaporze rzecznej.

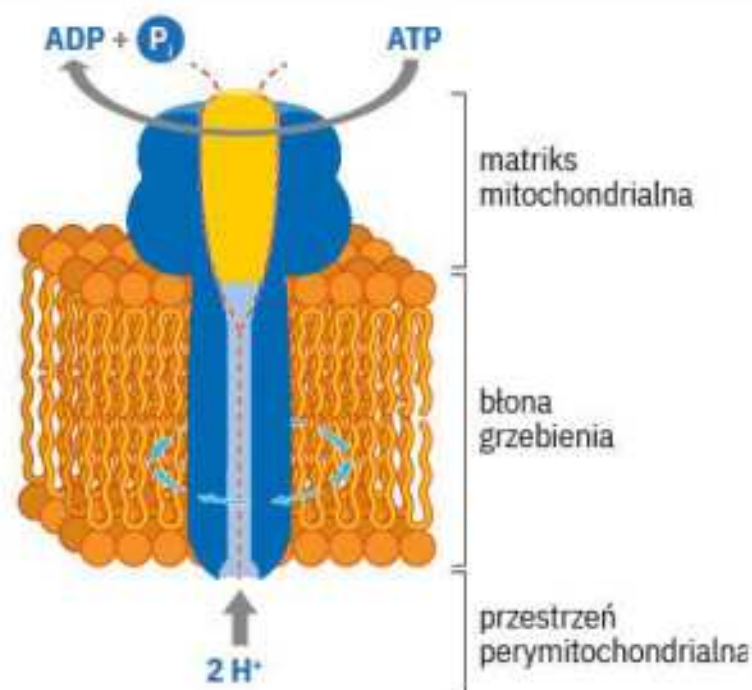


Ryc. IV.3.5. Gradient protonów (H⁺) pomiędzy matriks a przestrzenią międzybłonową w mitochondrium powstaje w wyniku transportu elektronów przez kompleksy łańcucha oddechowego.

Dążąc do wyrównania stężenia, protony przepływają z powrotem do matriks przez kanał w kompleksie enzymatycznym **syntazy ATP** (ryc. IV.3.6.). Przepływ ten napędza tworzenie ATP z ADP i P_i . Zatem powstawanie ATP jest efektem nierównomiernego rozłożenia protonów (i ładunków) po obu stronach błony, który nazywamy **siłą protonomotoryczną**. Omawiane procesy leżące u podstaw syntezy ATP są podstawą **teorii chemiosmotycznej**, którą już w 1961 roku zaproponował Peter Mitchell (czytaj: peter mit-szel). Za swoje badania otrzymał Nagrodę Nobla w 1978 roku.

Synteze ATP związaną z łańcuchem oddechowym nazywamy **fosforylacją oksydacyjną**, ponieważ energii do jej produkcji dostarczają elektrony redukujące tlen. Mechanizm chemiosmozy jest uniwersalny w świecie żywym. Gradient protonów napędza syntezę ATP nie tylko w mitochondriach, lecz także w komórkach bakteryjnych i w chloroplastach roślin. W **tabeli IV.3.1.** przedstawiono podsumowanie oddychania tlenowego z podziałem na etapy, uwzględniając glikolizę.

fosforylacja oksydacyjna



Ryc. IV.3.6. Syntza ATP. Siłą napędową enzymu jest przepływ protonów z przestrzeni międzybłonowej do matriks mitochondrium. W efekcie następuje synteza ATP z ADP i P_i .

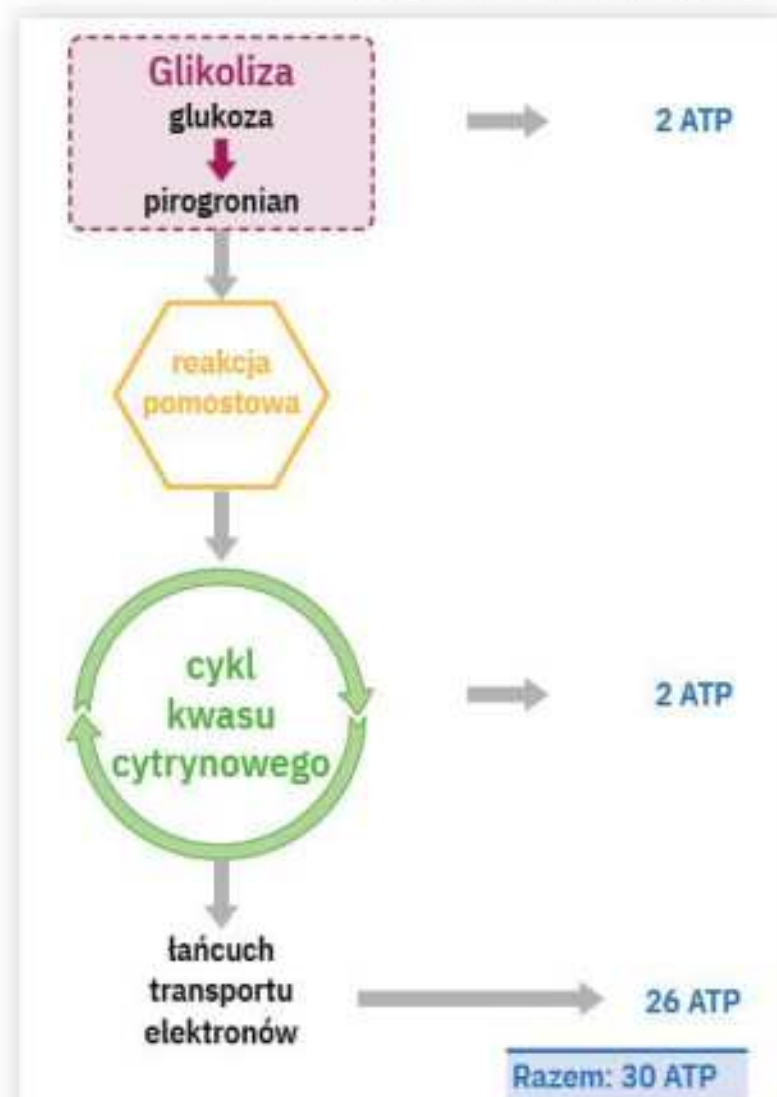
Tab. IV.3.1. Podsumowanie etapów oddychania tlenowego z uwzględnieniem glikolizy

Etap oddychania komórkowego	Opis	Niektóre substraty	Produkty końcowe
Glikoliza (cytoplazma)	Glukoza ulega utlenieniu do pirogronianu; zachodzi w warunkach tlenowych i beztlenowych.	glukoza, ATP, NAD^+ , ADP, P_i	pirogronian, ATP, NADH
Reakcja pomostowa (matriks mitochondrialna)	Pirogronian ulega dekarboksylacji, odłącza się CO_2 , dwuwęglowy fragment łączy się z koenzymem A i powstaje acetylo-CoA.	pirogronian, koenzym A, NAD^+	acetylo-CoA, CO_2 , NADH
Cykl Krebsa	Reszta acetylowa jest rozkładana do CO_2 , atomy wodoru przenoszone są na NAD^+ i FAD, powstaje ATP.	acetylo-CoA, H_2O , NAD^+ , FAD, ADP, P_i	CO_2 , NADH, $FADH_2$, ATP
Łańcuch oddechowy i synteza ATP	Łańcuch szeregowego przenoszenia elektronów na tlen z wytworzeniem wody; energia uwolniona podczas transportu elektronów wytwarza gradient protonowy po obu stronach błony; przepływ protonów w kierunku niższego ich stężenia siłą napędzającą syntezę ATP.	NADH, $FADH_2$, O_2 , ADP, P_i	ATP, H_2O , NAD^+ , FAD

Bilans energetyczny oddychania komórkowego

zysk netto
oddychania
komórkowego

► **Zyskiem całkowitego utleniania glukozy** do CO_2 w czasie oddychania tlenowego jest około 30 cząsteczek ATP. Wyliczanie zysku energetycznego oddychania komórkowego musi uwzględniać wszystkie etapy tego procesu, przy założeniu, że glikoliza, reakcja pomostowa oraz cykl Krebsa zachodzą dwukrotnie. W bilansie oddychania komórkowego, którego substratem jest glukoza, uwzględniamy:



Ryc. IV.3.7. Wydajność ATP całkowitego utlenienia glukozy w oddychaniu tlenowym.

1. glikolizę, w czasie której powstają 4 cząsteczki ATP, z czego 2 są zużywane na stabilizację glukozy,
2. cykl Krebsa, gdzie tworzą się 2 cząsteczki ATP,
3. łańcuch oddechowy, dla którego zysk w postaci ATP wylicza się, bazując na ilości przenośników elektronów – NADH oraz FADH_2 (**ryc. IV.3.7.**) Energia tych przenośników zostaje stopniowo uwalniana podczas transportu elektronów na tlen. Do łańcucha oddechowego trafia 10 cząsteczek NADH z trzech poprzedzających etapów (2 z glikolizy, 2 z reakcji pomostowej i 6 z cyklu Krebsa) i 2 cząsteczki FADH_2 (z cyklu Krebsa). Z najnowszych obliczeń wynika, że 1 cząsteczka NADH daje 2,5 cząsteczki ATP, a 1 cząsteczka FADH_2 – 1,5 cząsteczki ATP. Opierając się na tych wyliczeniach, stwierdzamy, że zysk łańcucha oddechowego to 28 cząsteczek ATP.

Sumując liczbę cząsteczek ATP wytworzonych na wszystkich etapach oddychania komórkowego, otrzymujemy 34. Musimy pamiętać, że 2 cząsteczki ATP są zużywane w czasie glikolizy. Ponadto transport NADH wytworzonego w czasie glikolizy z cytozolu do mitochondrium zużywa także 2 cząsteczki ATP. Zatem zysk energetyczny netto oddychania komórkowego wynosi 30 cząsteczek ATP (**tab. IV.3.2., ryc. IV.3.7.**)

Tab. IV.3.2. Wydajność ATP z całkowitego utleniania glukozy

Etap oddychania komórkowego	Ilość wytworzonego ATP	Ilość zużytego ATP	Zysk energetyczny netto
glikoliza	2	2	2
reakcja pomostowa	0	0	0
cykl Krebsa	2	0	2
łańcuch oddechowy	26	0	26
razem	30	2	30

Czynniki wpływające na oddychanie komórkowe

Na intensywność procesu oddychania komórkowego wpływa szereg czynników, do których należą: gatunek i jego cechy osobnicze, rodzaj komórki i jej wiek, liczba mitochondriów czy aktualne zapotrzebowanie na energię. Intensywność oddychania komórkowego jest większa w komórkach młodych i szybko rosnących (np. w roślinnych tkankach merystematycznych, kietkujących nasionach) oraz w czasie wykonywania pracy mechanicznej (np. w mięśniach szkieletowych). Niska intensywność oddychania komórkowego dotyczy komórek zwierząt zapadających w sen zimowy, komórek organów przetrwalnikowych, zarodników czy nasion w stanie spoczynku. Niektóre białka kompleksów łańcucha oddechowego są bardzo wrażliwe na działanie takich substancji, jak **tlenek węgla** czy **cyjanek potasu**. Pod ich wpływem łańcuch oddechowy ulega nieodwracalnemu zablokowaniu. Innymi przykładami inhibitorów łańcucha oddechowego są: **rotenon** (środek owadobójczy uzyskiwany z roślin tropikalnych) czy antymycyna A (antybiotyk przeciwgrzybiczy).

■ Paradoks tlenowy

Tlen określa się jako pierwiastek życiodajny, nasze życie bowiem jest od niego uzależnione. Jest niezbędny w procesie oddychania komórkowego. Stanowi ostateczny akceptor elektronów w łańcuchu oddechowym. Paradoksalnie, tlen pochodzący z tego samego procesu może być także toksyczny. Łańcuch transportu elektronów nie zawsze jest szczelny – elektrony „wyciekają” z niego, prowadząc do powstania tzw. **reaktywnych form tlenowych (RFT)**. Należą tu m.in. **nadtlenek wodoru** (H_2O_2 , woda utleniona), **anionorodnik ponadtlenkowy** (O_2^-) czy **rodnik hydroksy-**

reaktywne
formy tlenu

lowy ($\cdot\text{OH}$). Te pochodne tlenu są wysoce reaktywne i bardzo łatwo wchodzi w reakcje z większością związków zawartych w komórce, tj. lipidami, białkami czy kwasami nukleinowymi, prowadząc do ich zniszczenia, a co za tym idzie – do dezintegracji struktury i funkcji tkanek czy narządów. Należy zaznaczyć, że RFT powstają w mitochondriach stale, ale dzięki obecnym w komórce związkom – **antyoksydantom** (np. glutation, katalaza, witamina A, witamina E) są na bieżąco usuwane. Do niebezpiecznej sytuacji dochodzi w czasie nadmiernego nagromadzenia się RFT pod wpływem czynników stresowych (np. zanieczyszczeń, promieniowania czy dymu papierosowego). W takiej sytuacji obecne w komórce antyoksydanty nie są w stanie usunąć RFT i dochodzi do stanu określanego mianem **stresu oksydacyjnego** (ryc. IV.3.8.). Stres oksydacyjny jest podłożem wielu schorzeń, takich jak zaburzenia neurodegeneracyjne (np. choroba Alzheimera, Parkinsona), przyspieszonego starzenia się czy chorób sercowo-naczyniowych.

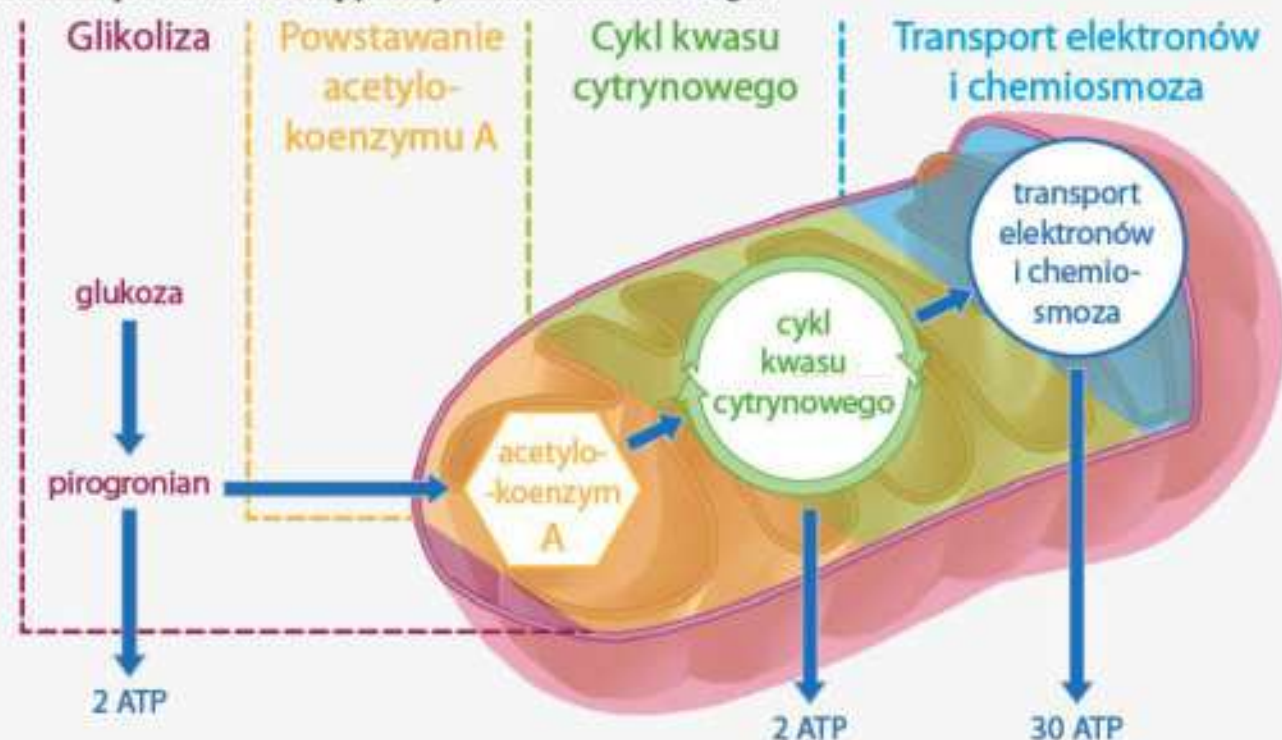


ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wyjaśnij, jakie znaczenie dla funkcjonowania organizmu ma oddychanie komórkowe.
2. Wymień etapy oddychania tlenowego i określ ich lokalizację.
3. Wytłumacz, w jaki sposób powstaje siła protonomotoryczna i jaki ma związek z syntezą ATP.
4. Przepisz do zeszytu i uzupełnij poniższy tekst.

W czasie glikolizy... jest rozkładana do dwóch cząsteczek... . Cykl Krebsa stanowi dalszy ciąg reakcji katabolicznych, w których pochodne pirogronianu są dalej utleniane do... i powstają przenośniki elektronów: ... i W czasie glikolizy oraz cyklu Krebsa powstaje... cząsteczek ATP. W ostatnim etapie oddychania komórkowego elektrony trafiają do łańcucha transportu elektronów i są ostatecznie przenoszone na Przepływ elektronów przez łańcuch oddechowy generuje..., która umożliwia syntezę...

5. Wyjaśnij, dlaczego syntezę ATP w czasie oddychania tlenowego nazywamy fosforylacją oksydacyjną.
6. Przedstaw bilans energetyczny brutto i netto oddychania komórkowego. Dlaczego pomiędzy tymi wartościami występuje różnica?
7. Schemat przedstawia etapy oddychania komórkowego.



7.1. Podaj, w której części komórki zachodzi:

- a) rozkład glukozy do pirogronianu,
- b) tworzenie acetylo-CoA.

Odpowiedź zapisz w zeszycie.

7.2. Wymień w zeszycie produkty cyklu Krebsa.

8. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń dotyczących procesu oddychania komórkowego. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. W czasie oddychania komórkowego organizm uzyskuje energię do przeprowadzania procesów życiowych.	...
2. Ostatecznymi produktami oddychania tlenowego są ATP, CO ₂ i H ₂ O.	...
3. Wszystkie etapy oddychania komórkowego zachodzą w mitochondrium.	...
4. NADH powstaje tylko w cyklu Krebsa, a ATP w łańcuchu oddechowym.	...

PODSUMOWANIE LEKCJI

- **Oddychanie komórkowe** to zbiór reakcji katabolicznych, w czasie których uwalnia się energia w postaci ATP. ◀ s. 196
- Oddychanie może przebiegać w **warunkach** tlenowych lub beztlenowych. ◀ s. 196
- Na oddychanie tlenowe, w którym substratem jest glukoza, składają się **cztery etapy**: glikoliza, reakcja pomostowa, cykl Krebsa oraz łańcuch oddechowy. ◀ s. 196
- **Glikoliza** ma miejsce w cytozolu i prowadzi do rozłożenia glukozy na dwie cząsteczki pirogronianu; w czasie fosforylacji substratowej powstają dwie cząsteczki ATP. ◀ s. 197
- **Reakcja pomostowa** przebiega w mitochondriach i polega na przekształceniu pirogronianu w acetylo-CoA i odłączeniu CO₂. ◀ s. 198
- **Cykl Krebsa** przebiega wyłącznie w warunkach tlenowych w mitochondriach; po jednym obrocie cyklu powstaje 2 CO₂, 3 NADH oraz 1 FADH₂, które przechodzą do łańcucha oddechowego. ◀ s. 199
- **Kompleksy białkowe** wbudowane w mitochondrialny łańcuch oddechowy przenoszą elektrony na tlen i powstaje woda. ◀ s. 200
- Wraz z transportem elektronów powstaje **gradient protonowy** po obu stronach wewnętrznej błony mitochondrialnej, który jako tzw. siła protonomotoryczna napędza syntezę ATP. ◀ s. 200
- W czasie zachodzącej w mitochondriach **fosforylacji oksydacyjnej** powstaje około 30 cząsteczek ATP. ◀ s. 201
- Ostateczny **zysk netto oddychania tlenowego** to 30 cząsteczek ATP (2 z glikolizy, 2 z cyklu Krebsa oraz 26 z łańcucha oddechowego). ◀ s. 202
- Na wydajność oddychania tlenowego wpływają **czynniki endogenne** (np. wiek i rodzaj komórek) oraz **egzogenne** (np. temperatura, pH, inhibitory). ◀ s. 203
- Oddychanie tlenowe jest źródłem **reaktywnych form tlenu**, których zawartość jest regulowana przez obecne w komórce antyoksydanty. ◀ s. 203

4. Oddychanie beztlenowe i fermentacja

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz podział organizmów ze względu na ich tolerancję na tlen;
- prześledzisz przebieg oddychania beztlenowego i fermentacji;
- poznasz rodzaje fermentacji;
- dowiesz się, jaki jest zysk energetyczny oddychania w warunkach beztlenowych.

Organizmy wykazują różną tolerancję na tlen i na tej podstawie możemy podzielić je na:

organizmy
tlenowe

- **organizmy tlenowe**, które do życia wymagają dostępu wolnego tlenu. Należy tu większość organizmów eukariotycznych;

organizmy
beztlenowe

- **organizmy beztlenowe**, które żyją w warunkach o ograniczonym dostępie do tlenu lub zupełnym jego braku. Dla niektórych organizmów nawet minimalna ilość tlenu jest toksyczna i te organizmy nazywamy **bezwzględnymi beztlenowcami** (anaerobami obligatoryjnymi). Do bezwzględnych beztlenowców zaliczamy m.in. bakterie chorobotwórcze: laseczkę zgorzeli gazowej (*Clostridium perfringens*), laseczkę tężca (*Clostridium tetani*) czy laseczkę jadu kiełbasianego (*Clostridium botulinum*) (**ryc. IV.4.1.**). Organizmy, które w obecności tlenu oddychają tlenowo, a przy jego braku – beztlenowo, nazywamy **beztlenowcami względnymi** (anaerobami fakultatywnymi). Ich przykładem są drożdże.



Ryc. IV.4.1. Laseczki jadu kiełbasianego (*Clostridium botulinum*) należą do bezwzględnych beztlenowców.

Beztlenowe oddychanie występuje także u organizmów eukariotycznych, w tym u człowieka. Te procesy „włączają” się przy niedoborze lub braku dostępu do tlenu. Do takiej sytuacji dochodzi w intensywnie pracujących włóknach mięśni szkieletowych. Z kolei u roślin bagiennych procesy oddychania beztlenowego zachodzą w tkankach korzeni zanurzonych w wodzie.

Podział beztlenowych procesów uzyskiwania energii uwzględnia rodzaj ostatecznego akceptora elektronów. Na tej podstawie wyróżniamy:

- **oddychanie beztlenowe**, w którym ostatecznym akceptorem elektronów jest związek nieorganiczny. Proces ten występuje u bakterii żyjących w glebie zalanej wodą, na dnie zbiorników wodnych lub bytujących w przewodzie pokarmowym zwierząt. Przeprowadzają go także bakterie denitryfikacyjne uczestniczące w obiegu azotu w przyrodzie. U tych organizmów w czasie oddychania komórkowego elektrony przechodzą od glukozy do NAD^+ , a następnie są przekazywane poprzez system przenośników w łańcuchu transportu elektronów, który jest sprzężony z syntezą ATP. Ostatecznym akceptorem elektronów może być azotan (NO_3^-), siarczan (SO_4^{2-}) lub wolna siarka. Końcowymi produktami oddychania beztlenowego są: CO_2 , jeden lub więcej **zredukowanych związków nieorganicznych** oraz ATP;
- **fermentację**, w której ostatecznym akceptorem elektronów jest **związek organiczny** (np. pirogronian czy aldehyd octowy). Fermentację przeprowadzają bakterie (np. bakterie mlekowe), grzyby (np. drożdże), protisty (np. orzęski bytujące w przewodzie pokarmowym przeżuwaczy) oraz pasożyty układu pokarmowego człowieka (np. glista ludzka czy tasiemce).

oddychanie beztlenowe

Przebieg fermentacji

Fermentacja przebiega w cytoplazmie i obejmuje dwa etapy:

fermentacja

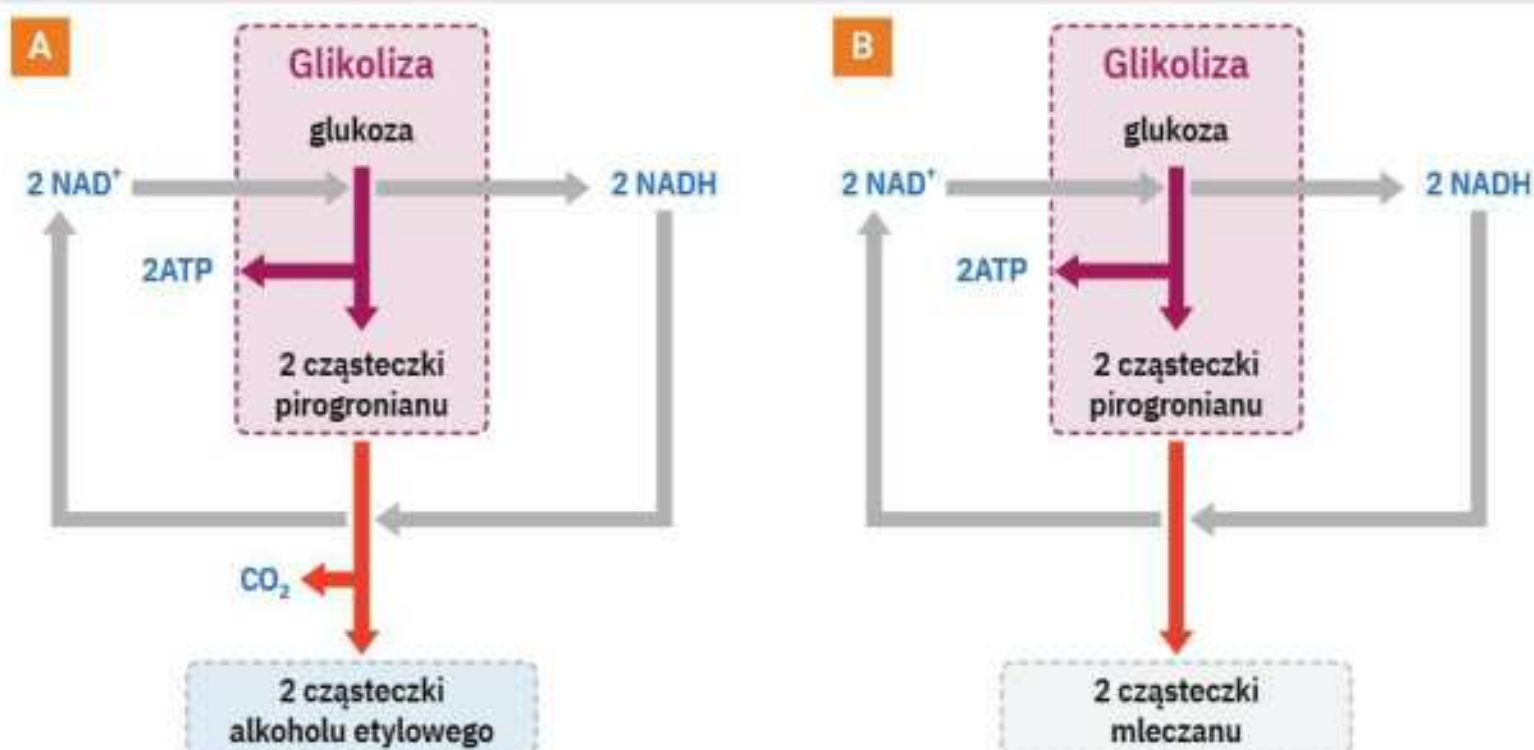
- **glikolizę**, w czasie której glukoza utlenia się do pirogronianu i powstają dwie cząsteczki NADH oraz dwie cząsteczki ATP. Przebieg glikolizy nie zależy od tlenu, dlatego jest taki sam zarówno w oddychaniu tlenowym, jak i beztlenowym;
- **redukcję**, w czasie której pirogronian ulega przemianie w kwas mlekowy (**fermentacja mlekowa**) lub etanol (**fermentacja alkoholowa**).

Fermentację mlekową przeprowadzają niektóre grzyby oraz bakterie. W czasie tego procesu wodór i elektrony z NADH są przenoszone na pirogronian, który ulega redukcji do mleczanu. Bakterie przeprowadzające fermentację mlekową są szeroko wykorzystywane przez ludzi, m.in. do produkcji jogurtów, kwaśnej śmietany czy kiszenia (m.in. kapusty czy ogórków). Najczęściej wykorzystywanymi gatunkami bakterii kwasu mlekowego są kultury *Lactobacillus acidophilus* (czytaj: laktobacillus acidofilus) oraz *Streptococcus thermophilus* (czytaj: streptokokus termofilus). Fermentacja mlekowa zachodzi także we włóknach mięśni szkieletowych podczas intensywnego wysiłku, kiedy spada szybkość oddychania tlenowego. Proces fermentacji trwa tylko kilka minut i służy syntezie ATP. Po ponownym dostarczeniu tlenu mięśnie kontynuują oddychanie tlenowe. Czasami fermentacja mlekowa trwa dłużej – np. zanurzony pod wodą i mało aktywny żółw czerwonolicy (**ryc. IV.4.2.**) może korzystać z tego sposobu dostarczania energii nawet przez dwa tygodnie.

fermentacja mlekowa



Ryc. IV.4.2. W komórkach żółwia czerwonolicego fermentacja może trwać nawet dwa tygodnie.



Ryc. IV.4.3. Przebieg fermentacji alkoholowej (A) oraz mlekowej (B).

fermentacja
alkoholowa

➤ **Fermentacja alkoholowa** była znana i stosowana od stuleci, ale dopiero w latach 1850–1870 **Ludwik Pasteur** wykazał, że fermentację ekstraktu winogron wywołują drożdże. W pierwszym etapie fermentacji alkoholowej pirogronian jest dekarboksylowany (odłącza się dwutlenek węgla) i przekształcany w **aldehyd octowy** (ryc. IV.4.3.). Następnie wodór z NADH (pochodzącego z glikolizy) jest wykorzystywany do redukcji aldehydu octowego do alkoholu etylowego (etanolu). Fermentację alkoholową od tysięcy lat ludzie wykorzystują do produkcji piwa, wina i innych napojów alkoholowych. Fermentujące drożdże znalazły także zastosowanie w piekarnictwie. Tworzący się w czasie redukcji pirogronianu CO_2 spulchnia ciasto, a alkohol odparowuje w czasie pieczenia.



Ryc. IV.4.4. **Biogaz** powstaje w biogazowniach w czasie czteroetapowego procesu zwanego fermentacją metanową. Biogazownie buduje się na obszarach rolniczych, przy oczyszczalniach ścieków lub przy składowiskach odpadów.

Oprócz wymienionych wyżej rodzajów znane są także inne fermentacje, przeprowadzane głównie przez bakterie. Na przykład zespół przemian określanych jako **fermentacja metanowa** jest szeroko stosowany w ochronie środowiska do uzyskiwania energoźnego **biogazu** (ryc. IV.4.4.). Niektóre procesy, znane z nazwy jako fermentacje (np. cytrynowa czy octowa), w rzeczywistości przebiegają w warunkach tlenowych.

Zysk energetyczny procesów beztlenowych

♦ zysk fermentacji

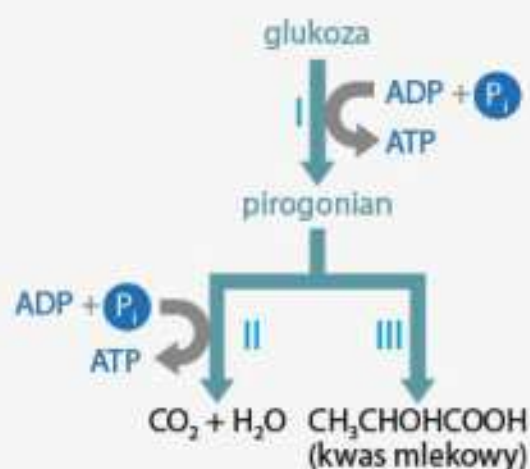
Wydajność energetyczna procesów beztlenowych jest znacznie mniejsza niż procesów tlenowych (**tab. IV.4.1.**). Całkowity zysk energetyczny fermentacji to tylko **dwie cząsteczki ATP** wytworzone w czasie glikolizy. W przypadku oddychania beztlenowego zysk energetyczny jest większy niż przy fermentacji, ale mniejszy niż w czasie oddychania tlenowego. Ilość powstałego ATP w oddychaniu beztlenowym zależy od gatunku bakterii przeprowadzającej ten proces.

Tab. IV.4.1. Porównanie wydajności energetycznej procesów beztlenowych i tlenowych

Cecha	Oddychanie tlenowe	Oddychanie beztlenowe	Fermentacja
Podstawowy substrat organiczny	glukoza	glukoza	glukoza
Losy elektronów z NADH wytworzonego w glikolizie	przejście do łańcucha transportu elektronów	przejście do łańcucha transportu elektronów	redukcja związków organicznych
Końcowy akceptor elektronów	tlen	związki nieorganiczne (NO_3^- , SO_4^{2-})	związki organiczne, np. pirogronian lub aldehyd octowy
Końcowe produkty	CO_2 , H_2O , ATP	CO_2 , zredukowany związek nieorganiczny, ATP	związek organiczny, CO_2 (w fermentacji alkoholowej), ATP
Lokalizacja w komórce	cytoplazma, mitochondria	cytoplazma	cytoplazma
Wydajność energetyczna	30 cząsteczek ATP	mniejsza niż w oddychaniu tlenowym, większa niż w fermentacji	2 cząsteczki ATP
Przykłady organizmów/komórek, w których zachodzi	większość organizmów eukariotycznych	bakterie denitryfikacyjne, bakterie żyjące na dnie zbiorników wodnych oraz bytujące w jelitach zwierząt	bakterie (np. mlekowe), grzyby (drożdże), protisty (np. orzęski), pasożyty układu pokarmowego (np. tasiemiec), włókna mięśni szkieletowych przy niedotlenieniu

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Omów przebieg fermentacji alkoholowej oraz jej zastosowanie.
2. Porównaj przebieg oddychania komórkowego w komórkach włókna mięśnia szkieletowego w obecności i przy braku tlenu.
3. Przedstaw zysk netto oddychania w warunkach beztlenowych i porównaj go z bilansem energetycznym oddychania tlenowego.
4. W dostępnych źródłach znajdź informację na temat przebiegu i zastosowania fermentacji:
 - a) metanowej,
 - b) propionowej.
5. Na poniższym schemacie przedstawiono dwa procesy uzyskiwania ATP w komórkach organizmu człowieka. Proces A składa się z etapów I i II, a proces B – z etapów I i III.



- 5.1. Podaj w zeszycie nazwy procesów A i B oraz określ, w jakim rodzaju komórek organizmu człowieka zachodzą oba procesy.
- 5.2. Omów w zeszycie lokalizację komórkową oraz warunki, w jakich zachodzą oba te procesy. Określ istotę ich współlistnienia.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 206 ▶ • Organizmy pod względem tolerancji na tlen dzielimy na **tlenowe (aerobowe)** oraz **beztlenowe (anaerobowe)**.
- s. 207 ▶ • Energia w warunkach beztlenowych może być uzyskiwana w czasie **oddychania beztlenowego** (u bakterii) i **fermentacji** (m.in. u bakterii i drożdży).
- s. 207 ▶ • W **oddychaniu beztlenowym wytwarza się ATP**, a końcowym akceptorem elektronów jest związek nieorganiczny (np. azotan lub siarczan).
- s. 207 ▶ • **Fermentacja** obejmuje glikolizę oraz redukcję związku organicznego.
- s. 207 ▶ • W czasie **fermentacji mlekowej** pirogronian (z glikolizy) jest redukowany do kwasu mlekowego;
- s. 208 ▶ • w czasie **fermentacji alkoholowej** pirogronian jest najpierw przekształcany w aldehyd octowy, a następnie w etanol, uwalnia się także CO₂.
- s. 209 ▶ • **Całkowity zysk fermentacji** to 2 cząsteczki ATP wytworzone w czasie glikolizy.

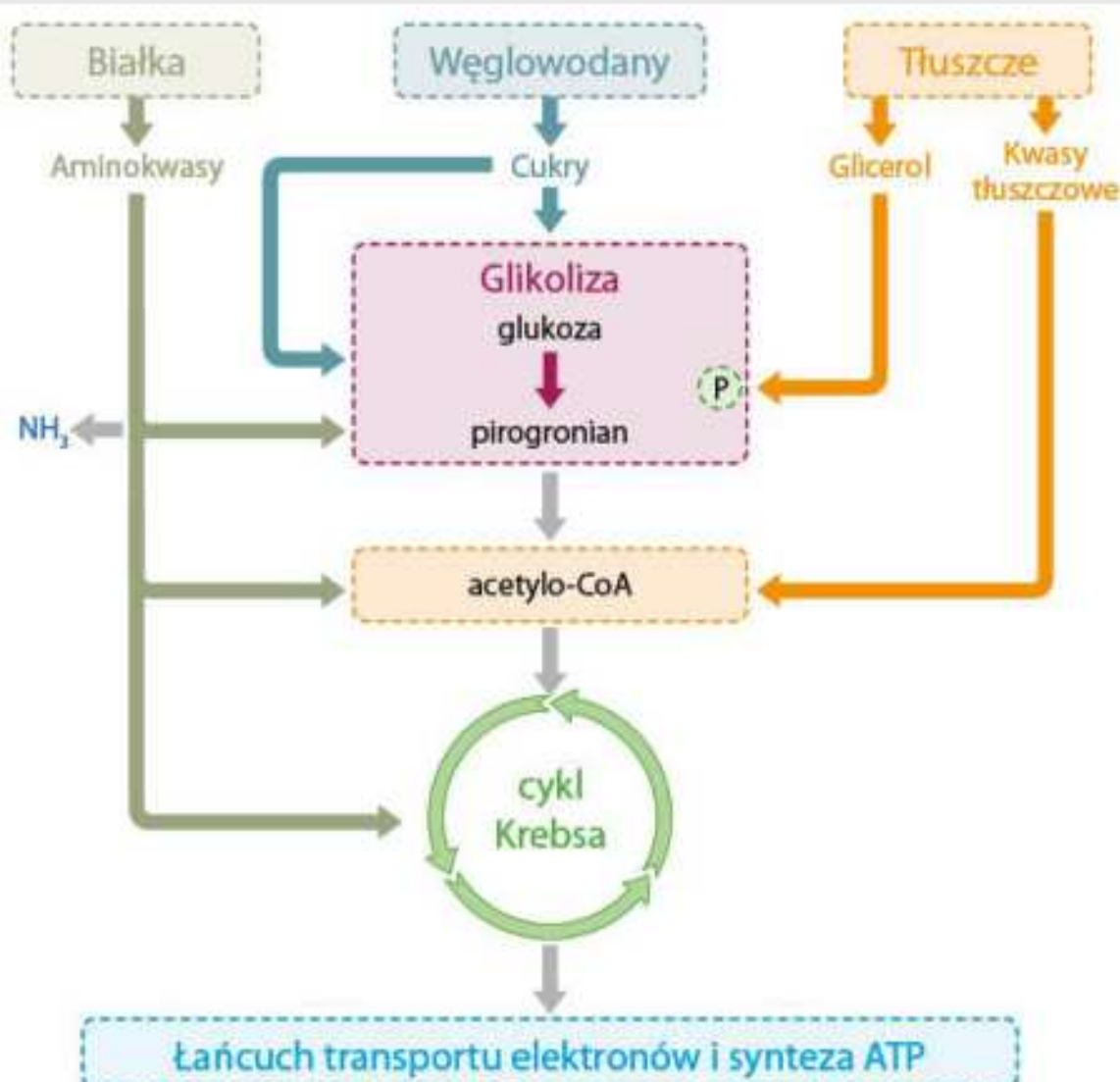
5. Inne procesy metaboliczne

NA TEJ LEKCJI:

- zrozumiesz, na czym polega metabolizm glikogenu;
- przeanalizujesz przebieg i znaczenie glukoneogenezy;
- poznasz procesy rozkładu i syntezy kwasów tłuszczowych;
- poznasz znaczenie szlaku pentozofosforanowego.

W opisanych dotychczas procesach oddychania komórkowego jako wyjściowy substrat uwzględniano glukozę. W organizmie ludzi i zwierząt wolna glukoza jest mało powszechna, a na zapasy energetyczne narządów i tkanek człowieka składają się także inne substancje organiczne (**tab. IV.5.1.**). Glukoza powstaje na drodze przemian z innych, węglowodanowych i niewęglowodanowych, produktów. Dostarczane pokarmy zawierają głównie tłuszcze, białka, sacharozę i skrobię. Wszystkie te związki są wykorzystywane do syntezy ATP w procesie oddychania komórkowego (ryc. IV.5.1.).

♦ synteza ATP



Ryc. IV.5.1. Częsteczki białek, węglowodanów i tłuszczów dostarczane wraz z pokarmem stanowią paliwo dla oddychania komórkowego.

Trawienie m.in. skrobi i sacharozy dostarcza glukozy i innych monosacharydów. Białka są najpierw trawione do aminokwasów. Część aminokwasów jest z powrotem wykorzystywana do budowy białek. Natomiast z części jest usuwana grupa aminowa (w procesie **deaminacji**) i po dalszych przekształceniach zostają one włączone do glikolizy lub cyklu Krebsa. Tłuszcze ulegają rozkładowi do glicerolu i kwasów tłuszczowych. Glicerol po przemianach do aldehydu 3-fosfoglicerynowego zostaje włączony do glikolizy. Produkty pochodzące z katabolizmu kwasów tłuszczowych zasilają łańcuch oddechowy, a w efekcie – syntezę ATP (**ryc. IV.5.1.**).

Tab. IV.5.1. Zapasy energetyczne dorosłego człowieka ważącego 70 kg

Narząd/tkanka	Dostępna energia w kJ (kcal)		
	Glukoza lub glikogen	Triacyloglicerole (tłuszcze proste)	Białka
krw	250 (60)	20 (4,5)	0 (0)
wątroba	1700 (400)	2000 (450)	1700 (400)
mózg	30 (8)	0 (0)	0 (0)
mięśnie	5000 (1200)	2000 (450)	100 000 (24 000)
tkanka tłuszczowa	330 (80)	560 000 (135 000)	170 (40)

Źródło: J.L. Tymoczko, J. Berg, L. Stryer, Biochemia. Krótki kurs; Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

Metabolizm glikogenu

Glikogen jest główną formą magazynowania glukozy u zwierząt. Występuje przede wszystkim w wątrobie i w mięśniach. Glikogen mięśniowy zapewnia „paliwo” w samym mięśniu, natomiast wątrobowy jest magazynem i źródłem glukozy transportowanej do krwi i dalej do wszystkich komórek, zwłaszcza w okresach między posiłkami. Zapas glikogenu wątrobowego wystarcza na około 18 h głodzenia, podczas gdy ubytek glikogenu mięśniowego obserwuje się głównie po długotrwałym wysiłku. Rozkład glikogenu na glukozę nazywamy **glikogenolizą**. Jest to proces, w którego przebiegu biorą udział dwa enzymy: jeden odcina kolejne cząsteczki glukozy, a drugi usuwa rozgałęzienia cząsteczki glikogenu (hydrolizuje wiązania 1,6-glikozydowe).

glikogenoliza ➤

Nieprawidłowy metabolizm glikogenu w dziedzicznych **chorobach spichrzania glikogenu** (np. choroba von Gierkego, choroba Pompego) prowadzi do osłabienia mięśni, a nawet do zgonu.

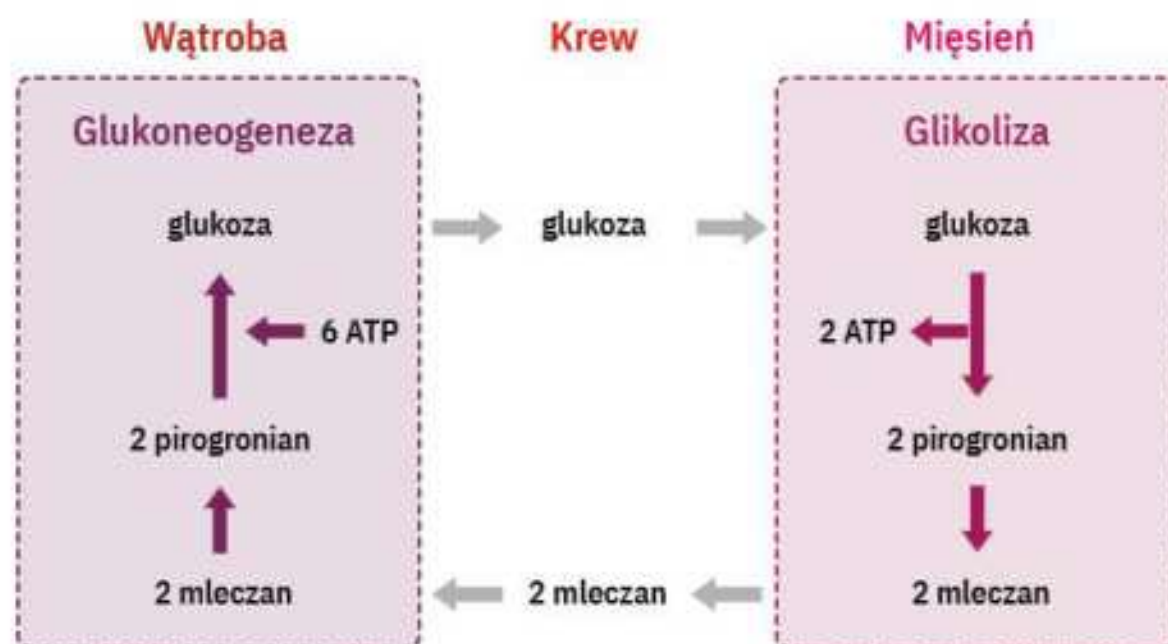
glukoneogeneza ➤ **Glukoneogeneza**

Związki inne niż węglowodany, które dostarczamy wraz z pożywieniem, również stanowią paliwo energetyczne. Jednak aby mogły być utlenione w procesie oddychania komórkowego, muszą zostać najpierw przekształcone w glukozę lub glikogen w procesie **glukoneogenezy**. Głównymi substratami dla glukoneogenezy są: **mleczan, niektóre aminokwasy** oraz **glicerol** (pochodzący z katabolizmu lipidów).

Glukoneogeneza przebiega głównie w wątrobie i w nerkach. Niektóre z tych substratów są najpierw przekształcane w pirogronian (np. mleczan), a inne są włączane do szlaku glukoneogenezy na późniejszych etapach. Należy zaznaczyć, że glukoneogeneza nie jest odwróceniem glikolizy.

Mleczan jest także w sposób ciągły produkowany w warunkach beztlenowych z glukozy w erytrocytach (krwinkach czerwonych) i mięśniach oraz w siatkówce i w rdzeniu nerki. Następnie jest on transportowany do wątroby, gdzie zostaje przekształcony z powrotem do glukozy w czasie glukoneogenezy. Przemiany te nazywamy **cyklem Corich** (czytaj: korich) od nazwiska małżeństwa Gerty i Carla Corich, którzy go opisali. Zaburzenia cyklu Corich (np. w chorobach wątroby) mogą doprowadzić do nagromadzenia mleczanu i tzw. **kwasicy mleczanowej**.

◀ cykl Corich



Ryc. IV.5.2. Cykl Corich – mleczan wytworzony w komórkach mięśniowych w czasie fermentacji jest wytworzony z glukozy i transportowany do wątroby, gdzie w czasie glukoneogenezy jest z powrotem przekształcany do glukozy.

Glukoneogeneza uzupełnia zapotrzebowanie na glukozę, zwłaszcza kiedy z dietą dostarczamy zbyt mało węglowodanów. Stała podaż węglowodanów jest niezbędna, ponieważ stanowią one podstawowe źródło energii. Dostępność glukozy (lub glikogenu) krytyczne ma znaczenie w:

- **układzie nerwowym i w erytrocytach** – w warunkach hipoglikemii (zbyt małej ilości glukozy) dochodzi do zaburzeń pracy mózgu – może wystąpić śpiączka lub zgon;
- **mięśniu szkieletowym** – glukoza jest jedynym źródłem energii w warunkach beztlenowych;
- **gruczole sutkowym** – glukoza jest koniecznym substratem do syntezy laktozy, która odżywia płód;
- **tkance tłuszczowej** – glukoza stanowi źródło glicerolu – składnika tłuszczów właściwych.

Degradacja i biosynteza tłuszczów

■ β -oksydacja kwasów tłuszczowych

tłuszcze jako źródło energii

- ▶ **Tłuszcze** są wysokokalorycznym paliwem biologicznym. Rozkład 1 g tłuszczu dostarcza ponad dwa razy więcej energii (39,4 kJ; 9,4 kcal) niż utlenienie 1 g glukozy (17 kJ; 4,1 kcal). Powstające w czasie rozkładu tłuszczów kwasy tłuszczowe są doskonałym źródłem energii dla mięśnia sercowego oraz mięśni szkieletowych (w czasie spoczynku).

β -oksydacja

- ▶ Tłuszcze właściwe (triacyloglicerole) są rozkładane do glicerolu i kwasów tłuszczowych. Glicerol jest przekształcany w aldehyd 3-fosfoglicerynowy i włączany do glikolizy. Natomiast kwasy tłuszczowe utleniane są w procesie zwanym **β -oksydacją** (beta-oksydacją), który zachodzi w matriks mitochondrialnej. Według najnowszych badań enzymy przeprowadzające β -oksydację tworzą jeden duży kompleks złożony z wielu biokatalizatorów i zakotwiczony w wewnętrznej błonie mitochondrialnej (w pobliżu łańcucha oddechowego i syntazy ATP). β -oksydacja polega na stopniowym odłączaniu od kwasów tłuszczowych fragmentów dwuwęglowych – reszt acetylowych, które łączą się z koenzymem A (CoA), tworząc
- ▶ **acetylokoenzym A** (acetylo-CoA). Częsteczki acetylo-CoA są włączane do cyklu Krebsa. W wyniku β -oksydacji powstają także duże ilości zredukowanych nukleotydów NADH oraz $FADH_2$, które zostają utleniane w łańcuchu oddechowym. Według obliczeń z rozkładu kwasu palmitynowego (C16) powstaje aż **106 cząsteczek ATP**, czyli ponad 3 razy więcej niż z utlenienia jednej cząsteczki glukozy (30 ATP).

acetylo-CoA

energia
z rozkładu kwasu
tłuszczowego

■ Zaburzenia przebiegu β -oksydacji kwasów tłuszczowych

Wzmoczone utlenianie kwasów tłuszczowych jest obserwowane w czasie głodówki oraz w cukrzycy. Prowadzi ono do powstania ciał ketonowych w wątrobie (z acetylo-CoA, którego jest za dużo, aby w całości mógł trafić do cyklu Krebsa). Długotrwała synteza ciał ketonowych, np. u osób z nieleczoną cukrzycą, może prowadzić do **kwasicy ketonowej**, w której dochodzi do zaburzeń łaknienia, utraty świadomości, osłabienia, odwodnienia oraz bólu w klatce piersiowej. Charakterystycznym objawem jest także wyczuwalny w oddechu zapach acetonu.



Ryc. IV.5.3. W niedojrzałych owocach drzewa akee znajduje się toksyna hamująca β -oksydację kwasów tłuszczowych.

Z kolei **hamowanie β -oksydacji** kwasów tłuszczowych obserwuje się pod wpływem niektórych toksyn roślinnych. Tak się dzieje w przypadku **jamajskiej choroby wymiotnej**, która jest spowodowana spożywaniem niedojrzałych owoców drzewa akee (ryc. IV.5.3.) zawierających toksynę o nazwie **hipoglicyn**. Z kolei **zespół Zellwegera** występuje u osób z wrodzonym brakiem peroksysomów we wszystkich tkankach. Brak zdolności rozkładania kwasów tłuszczowych o długich łańcuchach (C26–C38) powoduje ich gromadzenie się w tkance mózgowej, co prowadzi do jej uszkodzenia.

■ Synteza kwasów tłuszczowych

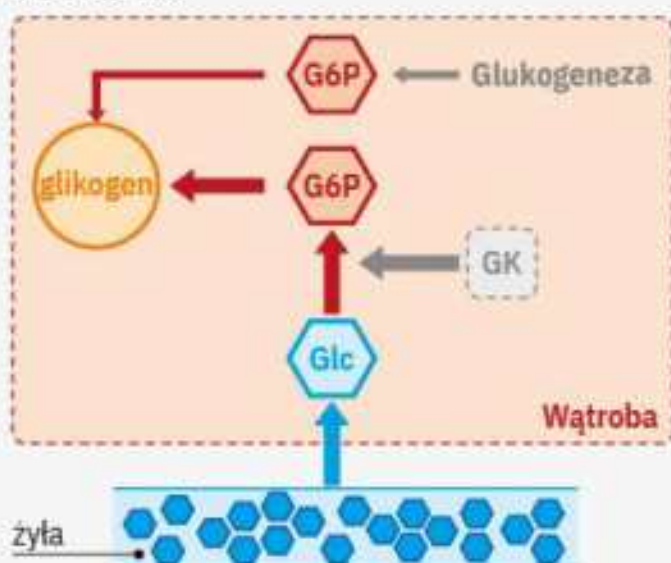
■ synteza kwasów tłuszczowych

Tłuszcze i lipidy konieczne do funkcjonowania naszego organizmu dostarczamy w większości wraz z dietą, dlatego zapotrzebowanie na ich produkcję jest niewielkie. Jednakże niektóre tkanki, np. tkanka tłuszczowa czy tkanki budujące wątrobę, mają zdolność **syntezy kwasów tłuszczowych**. Synteza kwasów tłuszczowych jest niezbędna w czasie rozwoju embrionalnego oraz w gruczołach sutkowych podczas laktacji po porodzie. Substrat do syntezy kwasów tłuszczowych to acetylo-CoA, który także stanowi produkt ich degradacji. Proces rozpoczyna się od przeniesienia acetylo-CoA z mitochondrium do cytoplazmy. Synteza kwasów tłuszczowych zachodzi poprzez dobudowywanie jednostek dwuwęglowych do specjalnego białkowego nośnika i wydłużanie łańcucha kwasu tłuszczowego.

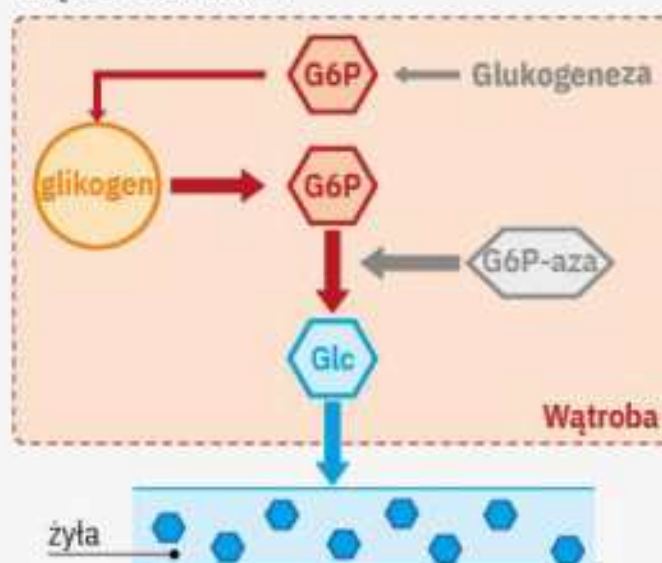
ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Podaj przykłady sytuacji, w których rozkład glikogenu ma kluczowe znaczenie. Wytłumacz, na czym polega ten proces.
2. Wyjaśnij pojęcie glukoneogenezy i podaj przykłady narządów, dla których ten proces ma największe znaczenie.
3. Wymień przykłady procesów metabolicznych, w których acetylo-CoA jest:
 - a) substratem,
 - b) produktem.
4. Porównaj wydajność syntezy ATP z utlenienia jednej cząsteczki kwasu tłuszczowego i jednej cząsteczki glukozy.
5. Na podstawie mechanizmu metabolizmu kwasów tłuszczowych wyjaśnij, dlaczego kwasy tłuszczowe mają parzystą liczbę atomów węgla w cząsteczce.
6. Wytłumacz związek pomiędzy szlakiem pentozofosforanowym a syntezą RNA.
7. Schemat przedstawia procesy zachodzące w komórkach wątroby po posiłku oraz między posiłkami. Po analizie wykresu wykonaj polecenia.

PO POSIŁKU



MIĘDZY POSIŁKAMI



7.1. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Glikogen jest intensywnie gromadzony w wątrobie po posiłkach.	...
2. Po posiłku glukoneogeneza oraz hydroliza glikogenu przebiegają intensywnie, ponieważ stężenie glukozy we krwi spada.	...
3. Rolą zapasów glikogenu w wątrobie jest zapewnienie stałego zaopatrzenia tkanek w glukozę między posiłkami.	...
4. Długotrwała głodówka stymuluje glukoneogenezę i syntezę glikogenu.	...

7.2. Wskaż, które z zaznaczonych na rysunku procesów zachodzących w wątrobie są procesami anabolicznymi, a które – katabolicznymi. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 211 ▶ • Do syntezy ATP są **wykorzystywane wszystkie składniki dostarczane wraz z pokarmem**: węglowodany, białka i tłuszcze.
- s. 212 ▶ • W trakcie **glikogenolizy** dochodzi do rozkładu glikogenu, który jest formą zapasową glukozy u zwierząt.
- s. 212 ▶ • W czasie **glukoneogenezy** ze związków innych niż węglowodany (np. aminokwasów, mleczanu, glicerolu) powstaje glukoza.
- s. 214 ▶ • Najlepszym źródłem energii (zwłaszcza dla mięśnia sercowego oraz mięśni szkieletowych) są **tłuszcze**.
- s. 214 ▶ • Kwasy tłuszczowe są rozkładane w procesie **β -oksydacji** poprzez stopniowe odłączanie fragmentów dwuwęglowych (reszt acetylowych), które w postaci acetylo-CoA są włączane do cyklu Krebsa.
- s. 214 ▶ • Z rozkładu jednej cząsteczki **kwasu tłuszczowego** powstaje ponad **3 razy więcej ATP** niż z utlenienia jednej cząsteczki glukozy.
- s. 215 ▶ • Kwasy tłuszczowe są syntetyzowane z **acetylo-CoA** w cytoplazmie.

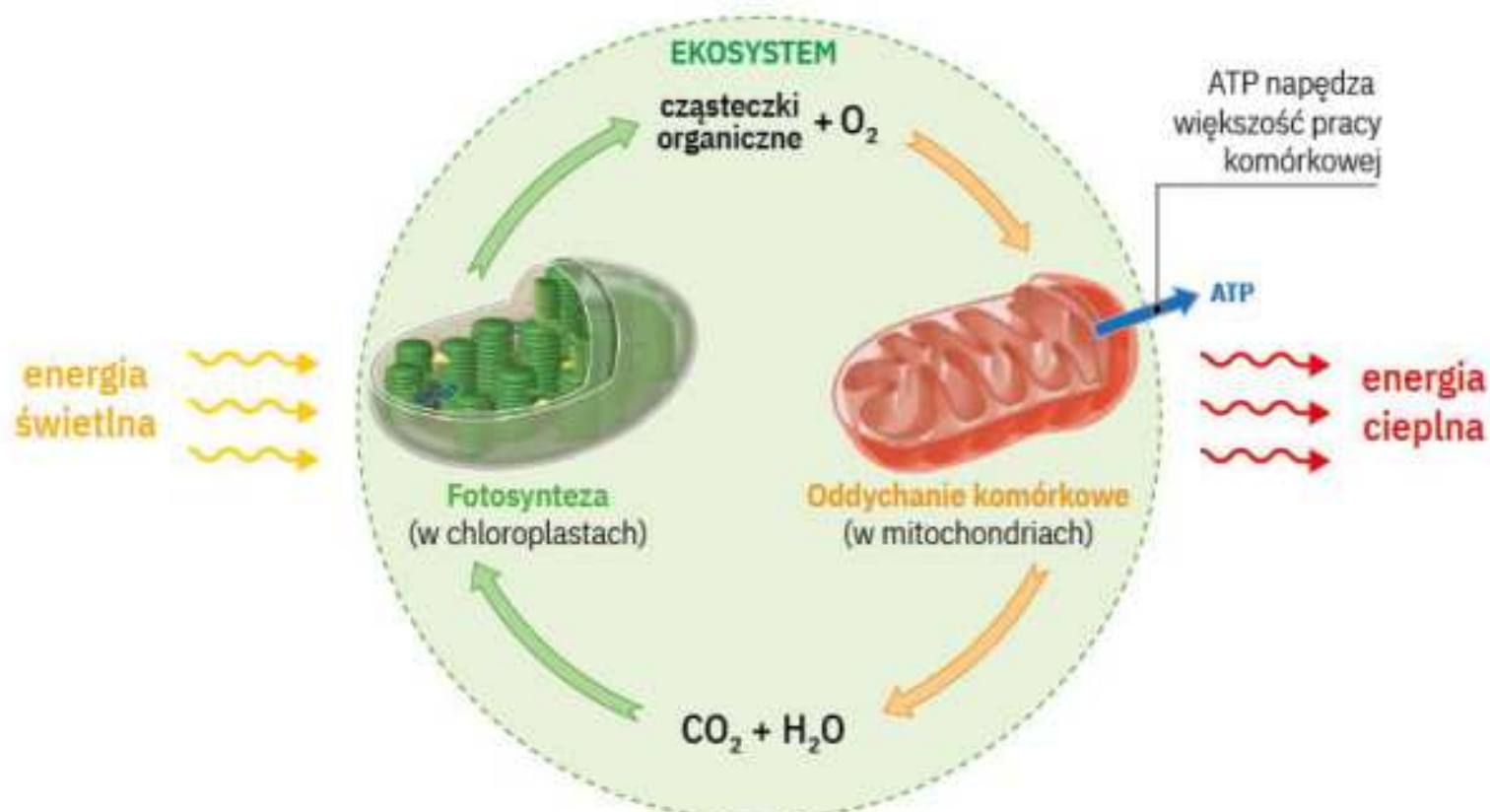
6. Fotosynteza

NA TEJ LEKCJI

- poznasz podział organizmów ze względu na sposób pozyskiwania pokarmu;
- dowiesz się, jak są zbudowane chloroplasty i jakie funkcje pełnią;
- poznasz właściwości światła słonecznego;
- prześledzisz przebieg jasnej i ciemnej fazy fotosyntezy;
- przeanalizujesz czynniki regulujące intensywność fotosyntezy;
- poznasz typy roślin C_3 , C_4 oraz CAM;
- zrozumiesz, jakie znaczenie ma fotosynteza oraz jakimi metodami się ją bada.

Wszystkie rośliny i zwierzęta uzyskują energię w wyniku oddychania komórkowego. W trakcie tego procesu cukry oraz inne składniki organiczne są utleniane tlenem pobranym z atmosfery, uwalniając przy tym energię. Końcowymi produktami są także CO_2 i woda. Fotosynteza prowadzi zatem do zmniejszenia zawartości CO_2 w atmosferze i zwiększenia w niej udziału O_2 . Wyliczono, że gdyby nie było ciągłego dopływu tlenu na naszej planecie, zostałby on zużyty w ciągu 3000 lat. Straty materii organicznej oraz tlenu są na szczęście uzupełniane przez równoległą **produkcję węglowodanów i tlenu** w procesie **fotosyntezy** (ryc. IV.6.1.). Życie na Ziemi istnieje dzięki promieniowaniu słonecznemu. Zawarte w liściach roślin chloroplasty pochłaniają energię Słońca i w czasie przemian fotosyntetycznych zamieniają ją w energię wiązań chemicznych węglowodanów i innych związków organicznych.

produkty
fotosyntezy



Ryc. IV.6.1. Zależność między oddychaniem komórkowym i fotosyntezą.

■ Organizmy autotroficzne i heterotroficzne

W zależności od sposobu pozyskiwania pokarmu organizmy dzielimy na:

- autotrofy** ▶ ■ **autotrofy**, czyli organizmy samożywne, które syntetyzują swoje cząsteczki organiczne z CO_2 i innych związków nieorganicznych, pochodzących ze środowiska przy udziale energii świetlnej (fotosynteza) lub chemicznej (chemosynteza). Organizmy autotroficzne stanowią pożywienie, a zarazem źródło związków organicznych dla innych organizmów nieautotroficznych – dlatego są **producentami** biosfery. Autotrofami przeprowadzającymi fotosyntezę są rośliny, sinice oraz bakterie zielone i purpurowe. Autotrofami chemosyntetyzującymi są bakterie, np. nitryfikacyjne;
- heterotrofy** ▶ ■ **heterotrofy**, czyli organizmy cudzożywne, które nie produkują pokarmu, tylko odżywiają się gotową materią organiczną. To **konsumenci** biosfery. Organizmy te, do których zaliczamy bakterie, protisty, grzyby i zwierzęta, są całkowicie uzależnione od autotrofów zarówno pod względem pożywienia, jak i tlenu, który jest uwalniany do atmosfery jako produkt uboczny fotosyntezy.

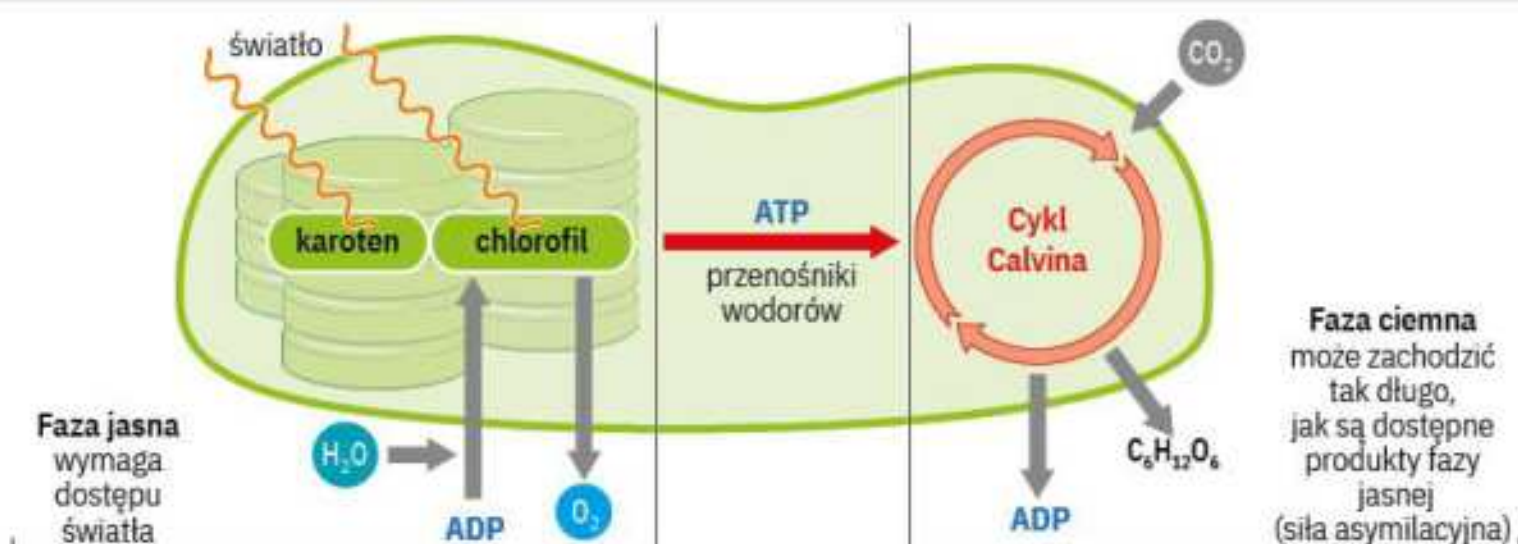
Fotosynteza: wprowadzenie

W czasie fotosyntezy energia zaabsorbowana (pochłonięta) przez chlorofil służy do syntezy węglowodanów. Ogólne równanie fotosyntezy przedstawia się następująco:



Jest to reakcja redoks, w czasie której dwutlenek węgla redukuje się do glukozy, a woda utlenia się do tlenu. Na tę sumaryczną reakcję składa się wiele etapów, z których część przebiega w błonach tylakoidów, a część w stromie chloroplastu (**ryc. IV.6.2.**). Generalnie fotosyntezę dzielimy na dwie fazy:

- faza jasna** ▶ ■ **fazę jasną** – inaczej zależną od światła, w czasie której powstają NADPH oraz ATP, następuje rozkład wody i uwalnia się tlen (**ryc. IV.6.2.**);
- faza ciemna** ▶ ■ **fazę ciemną**, czyli niezależną od światła, w której dochodzi do włączania węgla pochodzącego z CO_2 w szkielet związków organicznych i do wytworzenia węglowodanów. W tych reakcjach syntezy zużywane są cząsteczki ATP i NADPH wytworzone w czasie fazy jasnej (**ryc. IV.6.2.**).



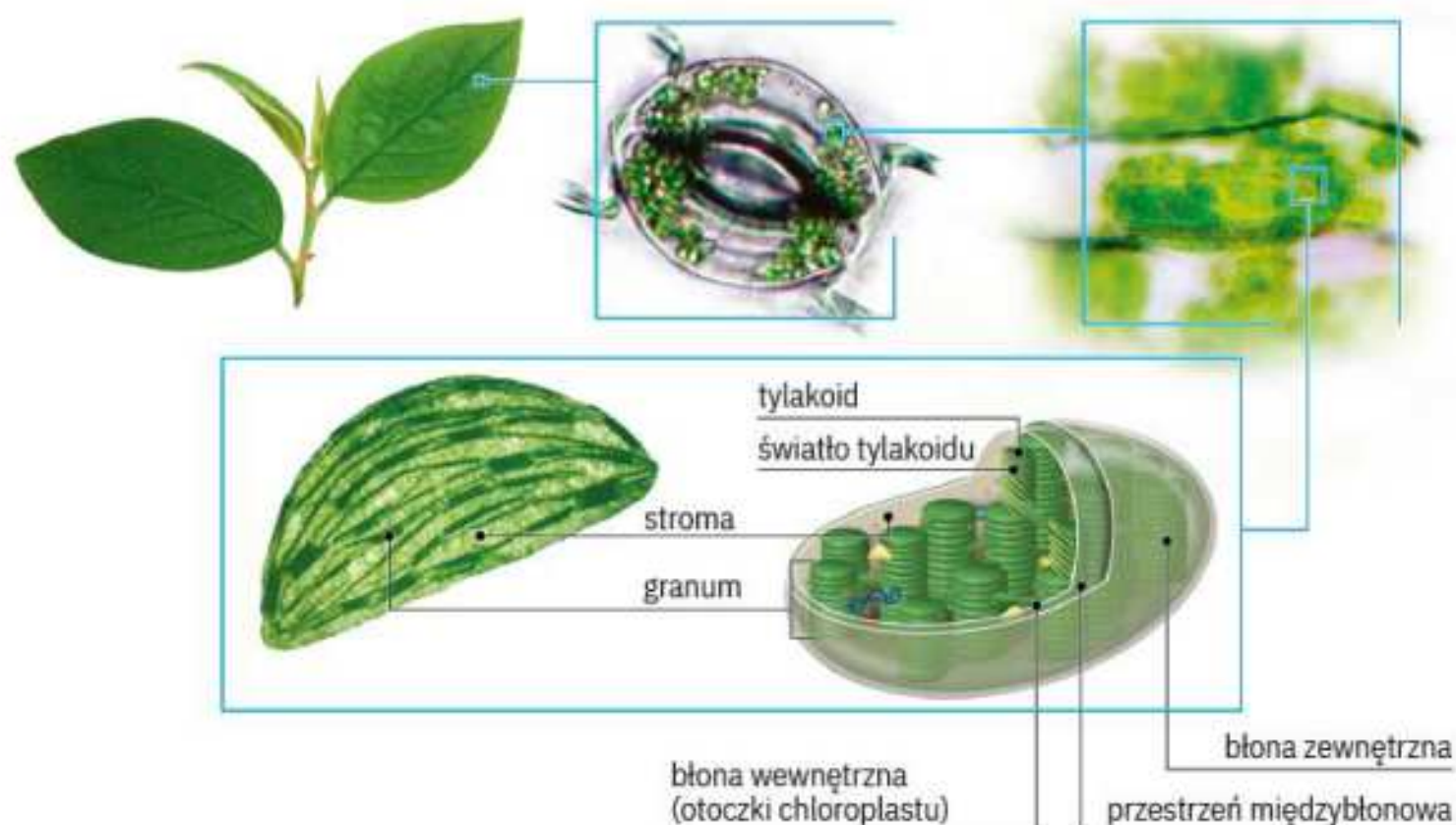
Ryc. IV.6.2. Ogólny schemat fotosyntezy. Dwie powiązane ze sobą fazy fotosyntezy (faza jasna i faza ciemna) przebiegają w chloroplastach.

Budowa chloroplastów i barwników fotosyntetycznych

■ Chloroplasty

chloroplasty

U roślin fotosynteza odbywa się w **chloroplastach**. Podobnie jak mitochondrium, chloroplast jest otoczony **dwiema błonami**: zewnętrzną i wewnętrzną, pomiędzy którymi występuje **przestrzeń międzybłonowa** (ryc. IV.6.3.). Wnętrze chloroplastu wypełnia stroma. W stromie znajdują się struktury błonowe w kształcie dysku, zwane **tylakoidami**. Stosy ułożonych jeden na drugim tylakoidów tworzą grana. Grana są ze sobą połączone błonami tylakoidów, które nazywamy **lamellami stromy**. W błonach tylakoidów zachodzą etapy fotosyntezy zależne od światła, natomiast w stromie – asymilacja węgla i synteza cukru.



Ryc. IV.6.3. Budowa i lokalizacja chloroplastów będących miejscem zachodzenia fotosyntezy.

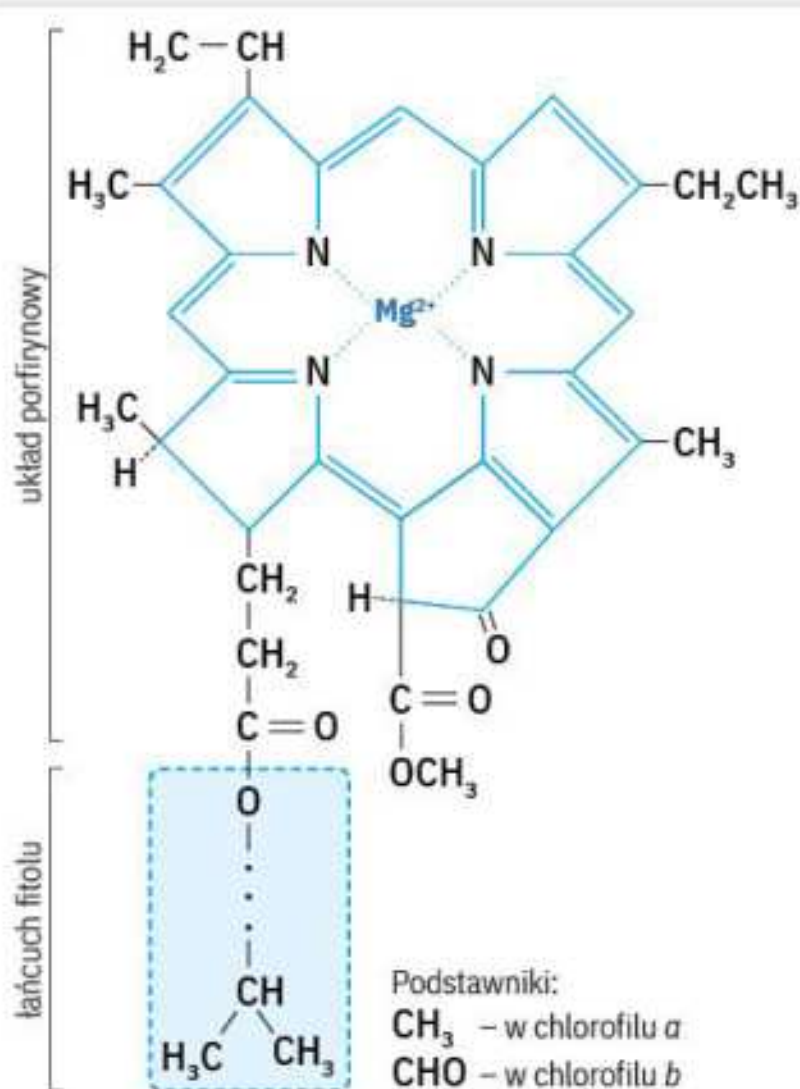
W zależności od gatunku, typu komórki czy warunków wzrostu, komórki liści roślin zawierają od 1 do 100 chloroplastów. Na przekroju blaszki liściowej (ryc. IV.6.3.) widać, że chloroplasty akumulują się w komórkach mezofilu – tkanki miękkiszowej wypełniającej wnętrze liścia. Przez małe otwory w epidermie (skórcie) liścia, czyli tzw. szparki, do wnętrza liścia dostaje się CO_2 . Tą samą drogą O_2 opuszcza liść (ryc. IV.6.3.).

Podobnie jak w przypadku mitochondrium uważa się, że chloroplasty powstały w wyniku **endosymbiozy**. Chloroplasty mają swój własny, kolisty DNA (chlDNA) oraz aparat do syntezy białek. Są organellami półautonomicznymi, tzn. informacja o części białek chloroplastowych jest zapisana w DNA jądrowym komórki. Przyjmuje się, że to uzależnianie chloroplastu pojawiło się w wyniku ewolucji, po tym, jak przypominający dzisiejszą sinicę mikroorganizm został wchłonięty przez komórkę gospodarza.

Barwniki fotosyntetyczne

Zawarty w chloroplastach główny barwnik fotosyntetyczny – **chlorofil** (ryc. IV.6.4.) – nadaje liściom zieloną barwę i stanowi około 4% suchej masy chloroplastów. Cząsteczka chlorofilu jest zbudowana z dwóch części: układu pierścieniowego oraz łańcucha bocznego. Pierścień, zwany porfiryńowym, składa się z mniejszych pierścieni oraz umieszczonego centralnie atomu magnezu. Do pierścienia dołączony jest hydrofobowy łańcuch boczny. Pierścień odpowiada za absorpcję światła, a łańcuch boczny – za za-

absorpcja światła



Ryc. IV.6.4. Budowa chlorofilu.

kotwiczenie chlorofilu w błonie. Znamy kilka rodzajów chlorofilu (tab. IV.6.1.). Różnica pomiędzy chlorofilem *a* i *b* dotyczy tylko jednego podstawnika w pierścieniu: w chlorofilu *a* występuje grupa metylowa ($-CH_3$), a w chlorofilu *b* reszta karbonylowa ($-CHO$) (ryc. IV.6.4.).

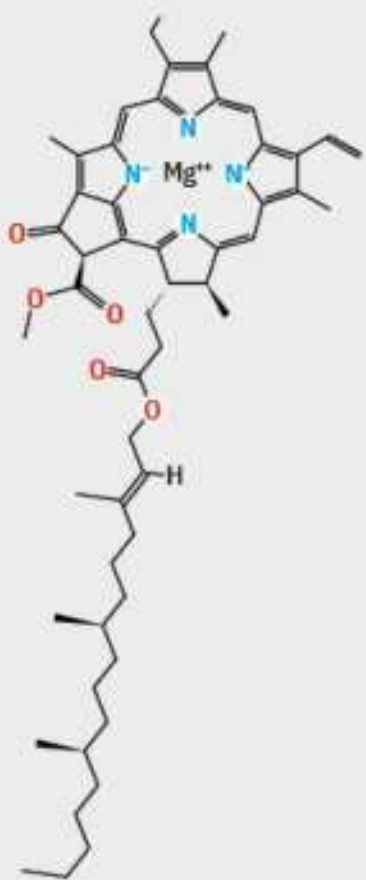
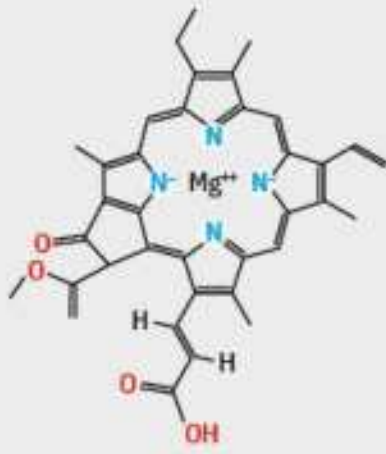
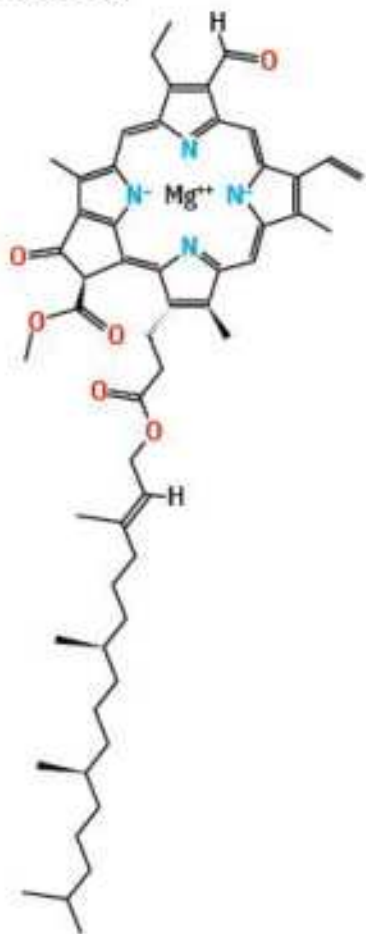
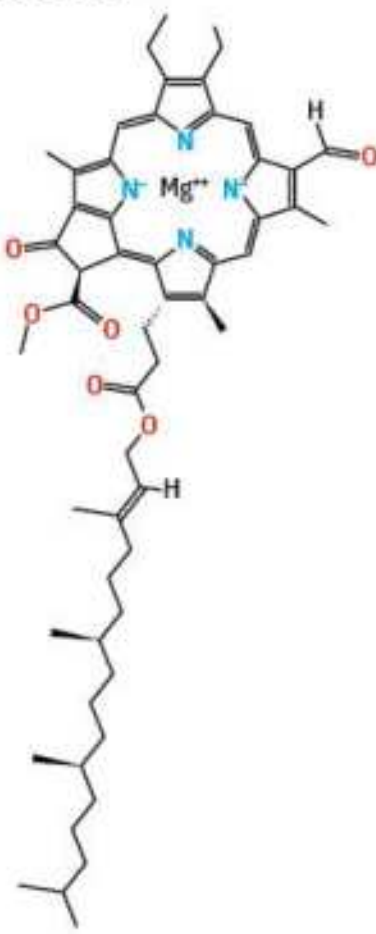
Oprócz chlorofilu, w większości fotosyntetycznych komórek występują żółte i pomarańczowe **karotenoidy** (tab. IV.6.1.). Ich obecność w liściach jest maskowana przez chlorofile, ale późną jesienią, kiedy chlorofil ulega degradacji, stają się widoczne (ryc. IV.6.5.). Karotenoidy dzielimy na: **karoteny** (np. β -karoten) zbudowane wyłącznie z węgla i wodoru oraz **ksantofile** (np. luteina), w skład których wchodzi węgiel, wodór i tlen (tab. IV.6.1.). Karotenoidy bardzo

wydajnie absorbują promieniowanie świetlne, a pochłoniętą energię przekazują na chlorofile. Z tego względu nazywamy je **barwnikami pomocniczymi**.

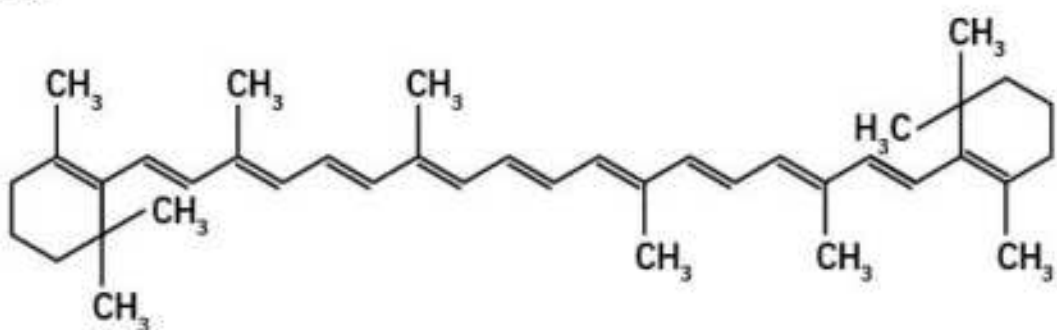
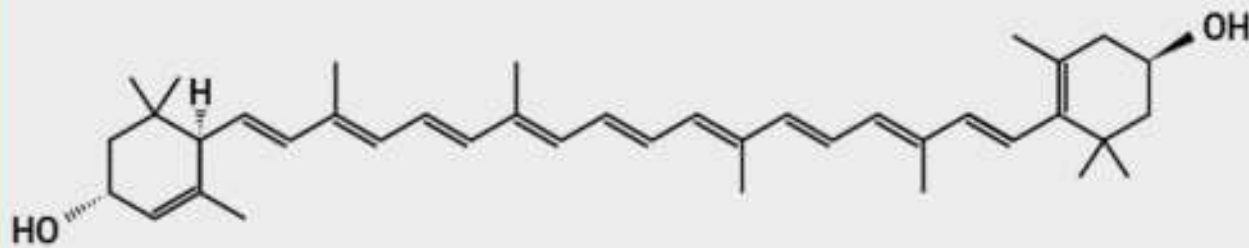
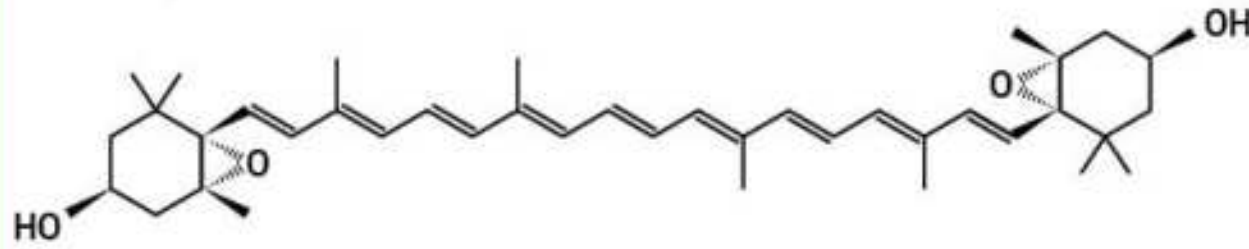
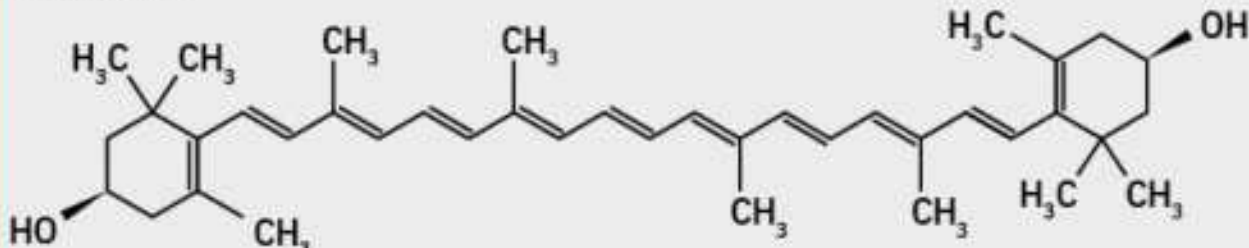


Ryc. IV.6.5. Obecność karotenoidów w liściach uwidacznia się jesienią, kiedy chlorofil ulega degradacji.

Tab. IV.6.1. Podstawowe barwniki fotosyntetyczne

Rodzaj barwnika i jego budowa	Występowanie	Rodzaj barwnika i jego budowa	Występowanie
chlorofile chlorofil a 	wszystkie rośliny wyższe i glony	chlorofile chlorofil c 	okrzemki i brunatnice
chlorofil b 	wszystkie rośliny wyższe i zieleńce	chlorofil d 	krasnorosty

Tab. IV.6.1. Podstawowe barwniki fotosyntetyczne

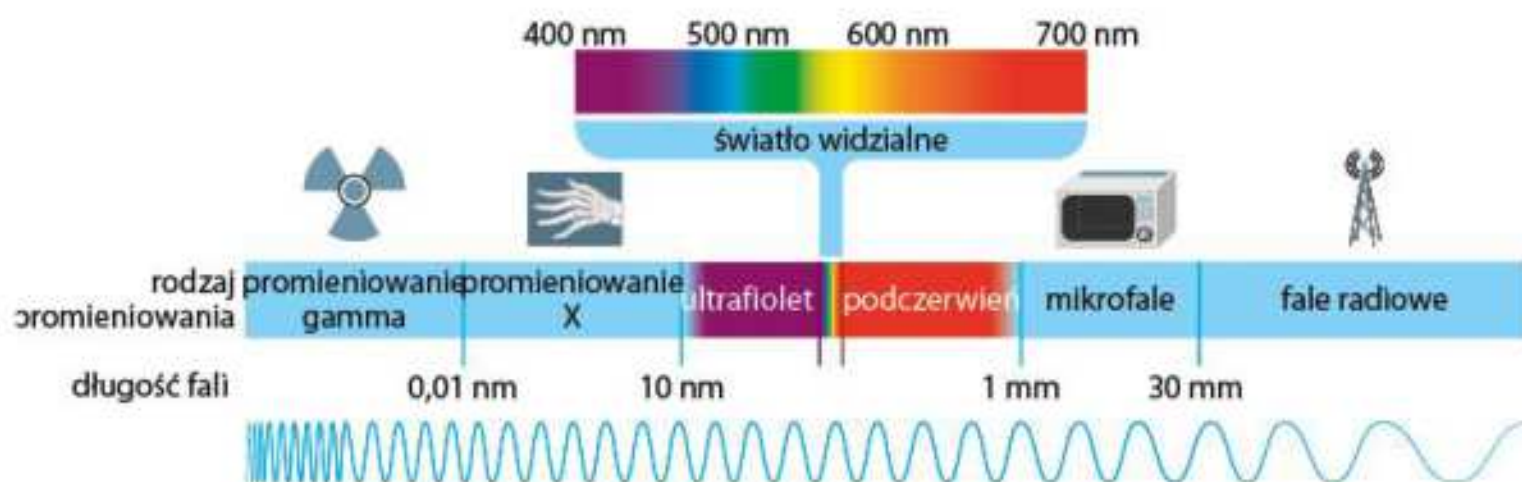
Rodzaj barwnika i jego budowa	Występowanie
Karotenoidy β-karoten 	rośliny wyższe i większość głonów
luteina 	zielenice, krasnorosty i rośliny wyższe
wiolaksantyna 	rośliny wyższe
zeaksantyna 	rośliny wyższe

Natura światła

Światło to nic innego niż forma energii docierająca do Ziemi ze Słońca. Energię tę nazywamy **promieniowaniem elektromagnetycznym** (ryc. IV.6.6.). Energia elektromagnetyczna przemieszcza się w postaci miarowych fal, a odległość pomiędzy nimi nazywamy **długością fali**. Całkowity zakres promieniowania to **widmo elektromagnetyczne**. Długości fali w całym zakresie widma mają wartości od nanometra (dla promieniowania gamma) do ponad kilometra (dla fal radiowych). Najważniejszy zakres długości fali, który napędza fotosyntezę i warunkuje istnienie

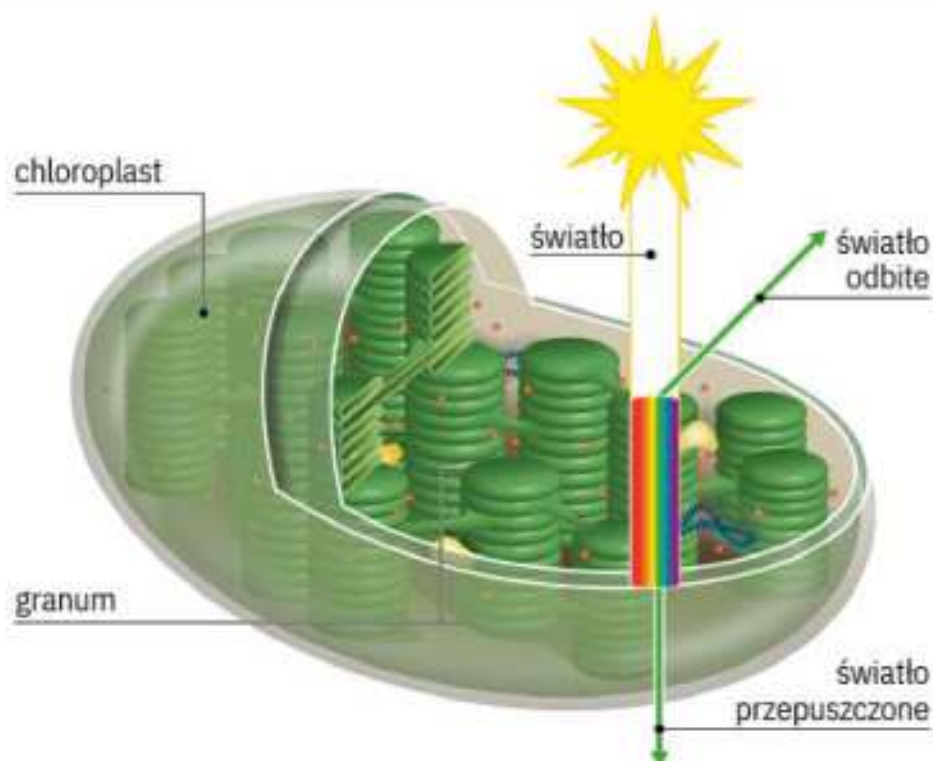
życia na Ziemi, mieści się w wąskim zakresie między 380 a 750 nm. Zakres ten nazywamy **światłem widzialnym**, ponieważ możemy „zobaczyć” jego barwy (ryc. IV.6.6.). Światło składa się z małych porcji zwanych fotonami, z których każdy ma określoną ilość energii. Ilość energii jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali – im mniejsza długość fali, tym większa energia każdego z fotonów.

zakres widzialny światła

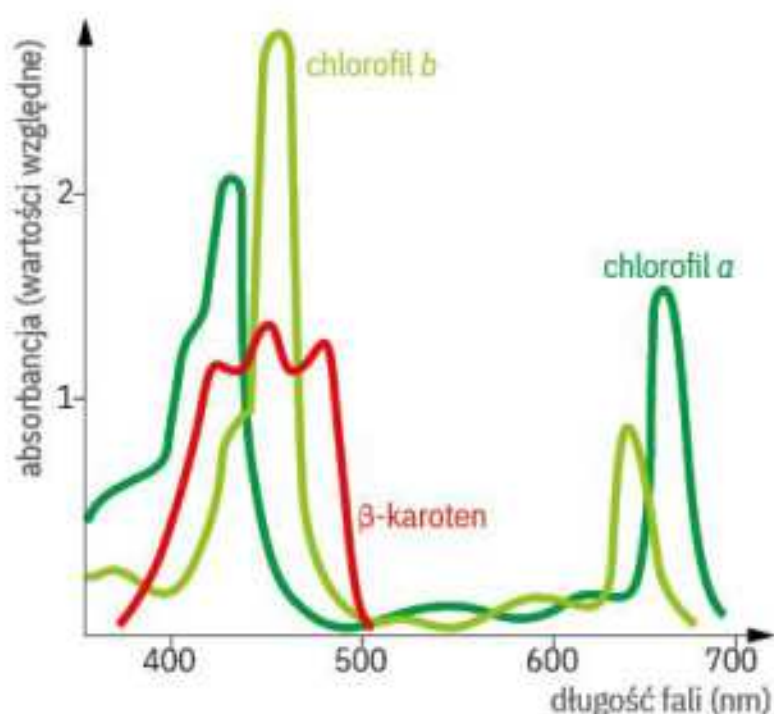


Ryc. IV.6.6. Promieniowanie elektromagnetyczne.

Światło, padając na określoną materię, może zostać przez nią pochłonięte (zaabsorbowane), odbite lub przepuszczone. Substancje absorbujące światło widzialne nazywamy **barwnikami** (dlatego chlorofile czy karotenoidy to barwniki). Barwa materii oświetlonej białym światłem wynika z odbicia przez barwnik określonej długości fali. Jeżeli barwnik zaabsorbuje wszystkie długości fali, to będzie miał kolor czarny. Liść wydaje nam się zielony, ponieważ zawarte w chloroplastach barwniki fotosyntetyczne pochłaniają światło fioletowo-niebieskie i czerwone, a odbijają zielone (ryc. IV.6.7.).



Ryc. IV.6.7. Zielona barwa liści jest uwarunkowana oddziaływaniem światła z chlorofilem zawartym w chloroplastach. Chlorofile absorbują światło fioletowo-niebieskie i czerwone, a odbijają zielone.



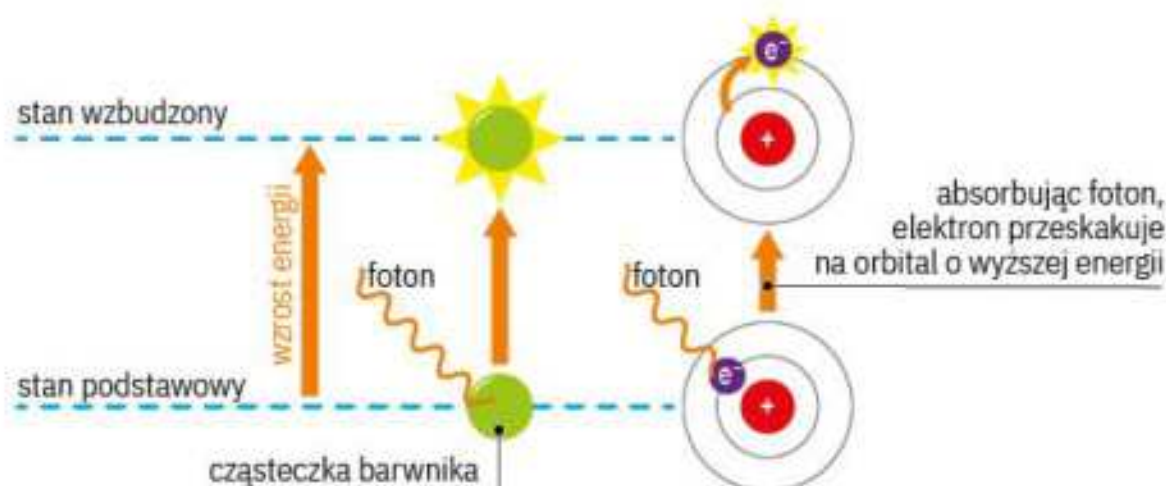
Ryc. IV.6.8. Widmo absorpcyjne barwników fotosyntetycznych. Krzywe na wykresie przedstawiają długości fali, które najlepiej są absorbowane przez chlorofile i karotenoidy. Najwyższe wzniesienia na krzywych (pikach) określamy jako maksimum absorpcji.

W celu dokładnego wyznaczenia absorbowanych długości fali przez barwniki fotosyntetyczne stosuje się **metodę spektrofotometryczną**. W metodzie tej na roztwór barwnika kieruje się wiązkę światła o różnych długościach fali i mierzy się ilość światła, która przez ten barwnik została zatrzymana (tzw. absorbancja) lub przepuszczona (tzw. transmitancja). Wynikiem pomiaru jest graficzny obraz w postaci **widma absorpcyjnego** (ryc. IV.6.8.).

Z widma absorpcyjnego chlorofilu *a* i *b* wynika, że pochłaniają one światło w nieco innym zakresie długości fali światła fioletowo-niebieskiego oraz czerwonego. Z widma absorpcyjnego karotenoidów widzimy, że absorbują one inny zakres promieniowania niż chlorofile – fioletowe oraz niebiesko-zielone długości fali. W czasie fotosyntezy karotenoidy „wspomagają” chlorofile w absorpcji światła, rozszerzając zakres promie-

niowania, które jest pochłaniane. Barwniki te pełnią także funkcje ochronne – pochłaniają nadmiar energii i rozpraszają ją w postaci ciepła. W przeciwnym razie mogłoby dojść do zniszczenia elementów istotnych dla procesu fotosyntezy.

Podczas absorpcji światła foton niosący odpowiednią energię wybija jeden z elektronów w cząsteczce barwnika i przenosi go na inny orbital. Mówimy, że cząsteczka przechodzi ze **stanu podstawowego** w **stan wzbudzony** (ryc. IV.6.9.). Cząsteczka w stanie wzbudzonym jest dość niestabilna i dąży do powrotu do stanu podstawowego. Aby do tego doszło, może przekazać wzbudzony elektron do sąsiedniej cząsteczki (co ma miejsce w fotosyntezie). W przypadku wyizolowanych barwników elektron bardzo szybko wraca do stanu podstawowego, a towarzyszy temu emisja światła zwanego **fluorescencją** lub ciepła.

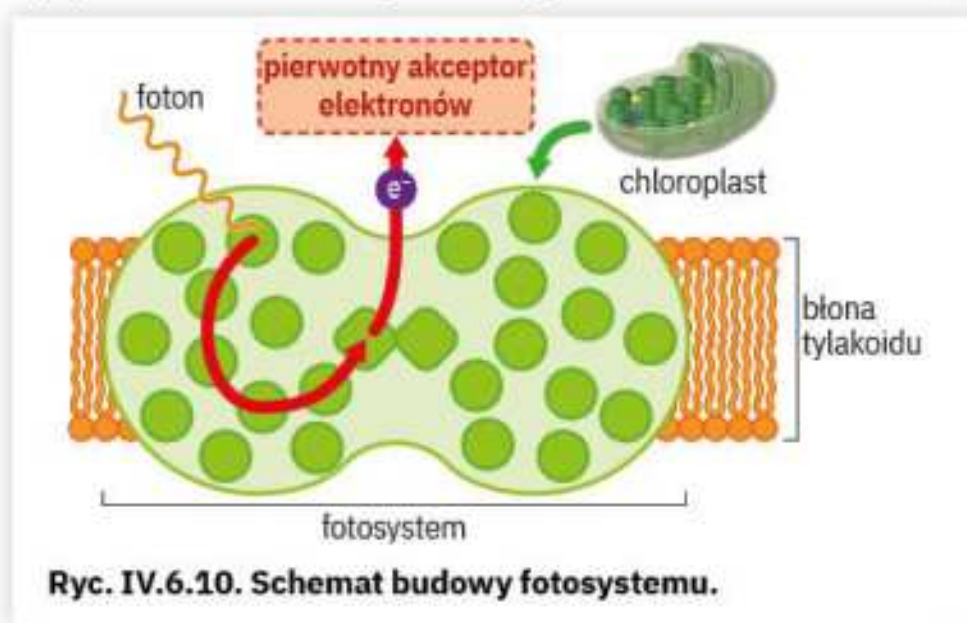


Ryc. IV.6.9. Zasada wzbudzenia cząsteczki barwnika przez foton światła.

Aparat fotosyntetyczny

aparat
fotosyntetyczny

Cząsteczki chlorofilu i innych barwników są zorganizowane w układy białkowo-barwnikowe zwane **kompleksami antenowymi**. Zadaniem tych kompleksów jest absorpcja energii świetlnej i przekazanie jej do **centrum reakcji** wrażliwych na światło układów fotosyntetycznych, czyli tzw. fotosystemów (**ryc. IV.6.10.**). U roślin występują dwa rodzaje fotosystemów: **fotosystem I** i **fotosystem II**. Fotosystemy oraz inne przENOŚNIKI elektronów warunkują przebieg jasnej fazy fotosyntezy, czyli przekształcenie energii promieniowania świetlnego w energię chemiczną. Wszystkie wymienione elementy stanowią **aparat fotosyntetyczny**, dzięki któremu możliwe jest zachodzenie fotosyntezy.



Fotosystem I (PSI) to duży kompleks białkowy. W jego centrum reakcji znajduje się para cząsteczek chlorofilu α . Maksimum absorpcji światła dla tych cząsteczek chlorofilu wynosi 700 nm, dlatego też centrum reakcji PSI nazywamy P-700 (z ang. *pigment 700*).

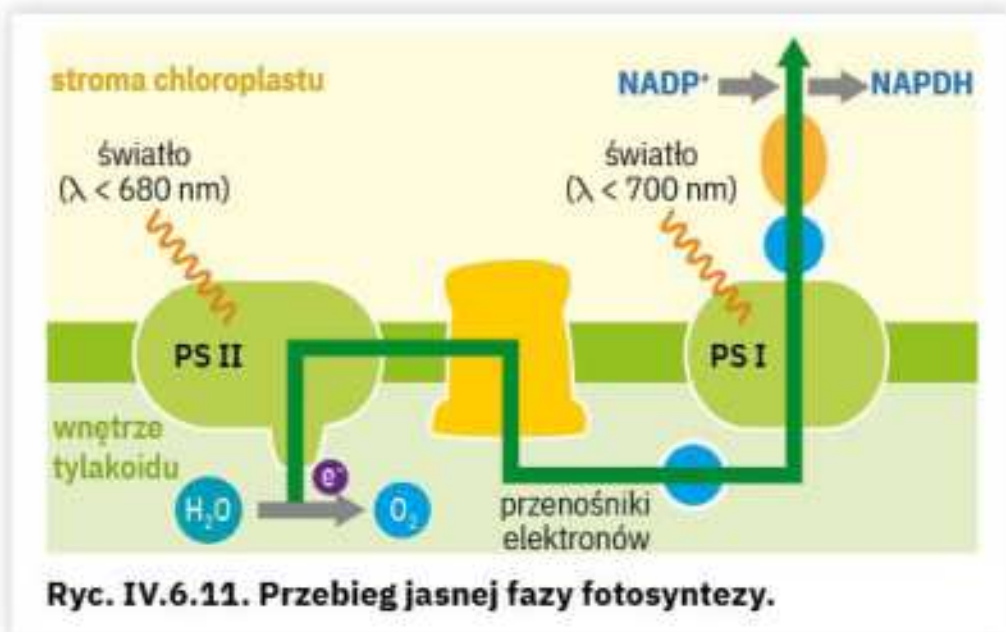
Fotosystem II (PSII) to także układ białkowo-barwnikowy z parą cząsteczek chlorofilu α w centrum reakcji. Chlorofil centrum reakcji PSII nazywamy P-680, bo maksimum jego absorpcji wynosi właśnie 680 nm.

Przebieg fotosyntezy

dwie fazy
fotosyntezy

Faza jasna – zależna od światła

Faza jasna fotosyntezy zachodzi w błonach tylakoidów. Główną rolą tej fazy jest powstanie tzw. **siły asymilacyjnej**, na którą składają się **ATP** oraz **NADPH**, a która jest niezbędna do przebiegu drugiej fazy. Wzbudzone światłem cząsteczki chlorofilu uwalniają elektrony, które są przenoszone przez fotosyntetyczny łańcuch transportu elektronów. Przepływ elektronów prowadzi do powstania gradientu protonów po obu stronach błony (podobnie jak w oddychaniu komórkowym). Przepływ protonów związany z dążeniem układu do wyrównania ich stężenia napędza syntezę ATP. Energia konieczna do syntezy ATP (z ADP i P_i) pochodzi zatem z fotonów, dlatego proces ten nazywamy **fosforylacją fotosyntetyczną** (**ryc. IV.6.11.**).



fosforylacja
fotosyntetyczna

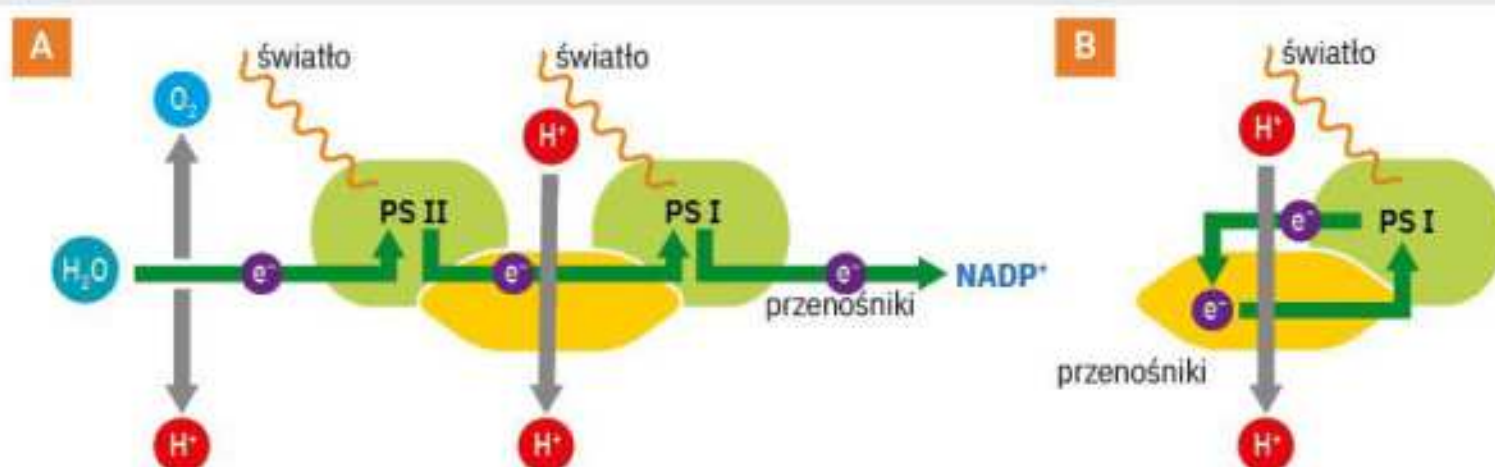


W trakcie jasnej fazy fotosyntezy transport elektronów może się odbywać dwoma szlakami. Są to:

- **niecykliczny transport elektronów** i związana z nim niecykliczna fosforylacja fotosyntetyczna – wymaga udziału obu fotosystemów;
- **cykliczny transport elektronów** i związana z nim cykliczna fosforylacja fotosyntetyczna – odbywa się tylko wokół fotosystemu I.

Niecykliczny transport elektronów rozpoczyna zaabsorbowanie fotonu przez cząsteczkę barwnika w kompleksie antenowym (**ryc. IV.6.12.**). Foton ten jest przekazywany do centrum reakcji P-700 PSI. Pod jego wpływem dochodzi do wybicia elektronu z cząsteczki chlorofilu w centrum reakcji, gdzie powstaje **luka elektronowa**. Wybity elektron przechodzi na związek zwany pierwotnym akceptorem, a następnie przez kolejne przENOŚNIKI dociera do białka ferredoksyny. Z ferredoksyny trafia na NADP^+ , gdzie ma miejsce enzymatyczna synteza NADPH (NADPH powstaje po przyjęciu dwóch elektronów i protonu). Lukę elektronową w PSI wypełniają elektrony pochodzące z PSII. Fotosystem II ulega aktywacji przez foton, który wybija elektron z centrum reakcji. Zanim jednak dotrze on do PSI, przechodzi przez szereg przENOŚNIKÓW, w tym plastochinon, cytochrom b_6f oraz plastocyjaninę. Wybicie elektronu z P-680 również pozostawia w nim lukę elektronową. Zapełniają ją elektrony pochodzące z **rozkładu wody**. Rozkład wody na 2 elektrony, 2 protony i tlen (O_2) jest przeprowadzany przez złożony **kompleks rozkładający wodę** (z ang. *oxygen evolving complex*; OEC). Elektrony zapełniają lukę elektronową w P-680, protony trafiają do przestrzeni wnętrza tylakoidu, a tlen, jako produkt uboczny, zostaje uwolniony do atmosfery (**ryc. IV.6.12.**).

luka elektronowa w PSI



Ryc. IV.6.12. Fosforylacja niecykliczna (A) i cykliczna (B).

Reasumując, w czasie niecyklicznego transportu elektronów ich przenoszenie odbywa się liniowo – od wody do NADP^+ . Woda jest pierwotnym donorem elektronów, a NADP^+ – końcowym akceptorem. W trakcie przepływu elektronów tracą one nieznacznie energię, czemu towarzyszy proces pompowania protonów ze stromy chloroplastu do wnętrza tylakoidu. Wytwarza się **gradient protonowy**, czyli różnica stężeń protonów po obu stronach błony. Aby wyrównać tę różnicę, protony przepływają z wnętrza tylakoidu do stromy przez kanał w kompleksie **syntazy ATP** (**ryc. IV.6.13.**). Przepływ protonów napędza syntezę ATP. Opisany tu mechanizm

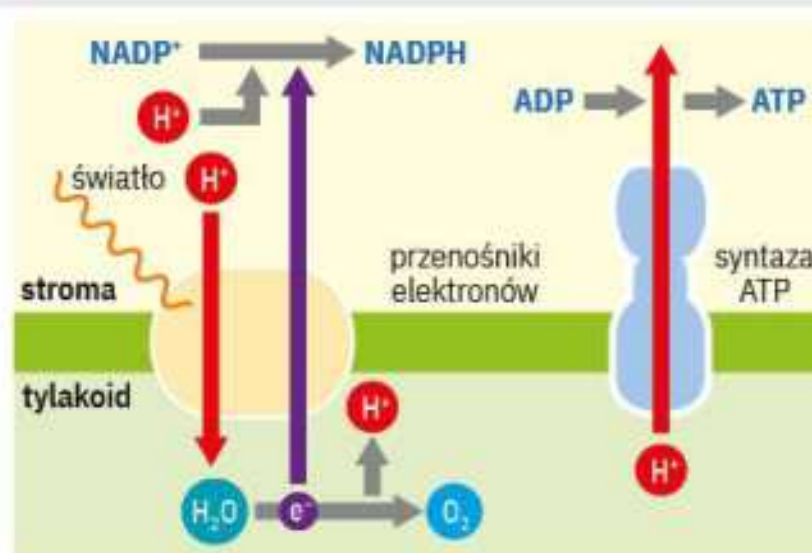
chemiosmozy, czyli sprzężenia fosforylacji ADP z przepływem protonów, obserwowaliśmy już w przypadku łańcucha oddechowego. **Całość przemian niecyklicznego transportu elektronów prowadzi do powstania ATP i NADPH (siła asymilacyjna) oraz uwolnienia tlenu.**

W **cyklicznym transporcie elektronów** uczestniczy tylko fotosystem I (ryc. IV.6.14.). W trakcie tego procesu nie tworzy się NADPH, a powstaje tylko ATP. Elektrony uwolnione z fotosystemu I przepływają przez przenośniki (ferredoksynę, cytochrom b_6f , plastocyjaninę) i wracają

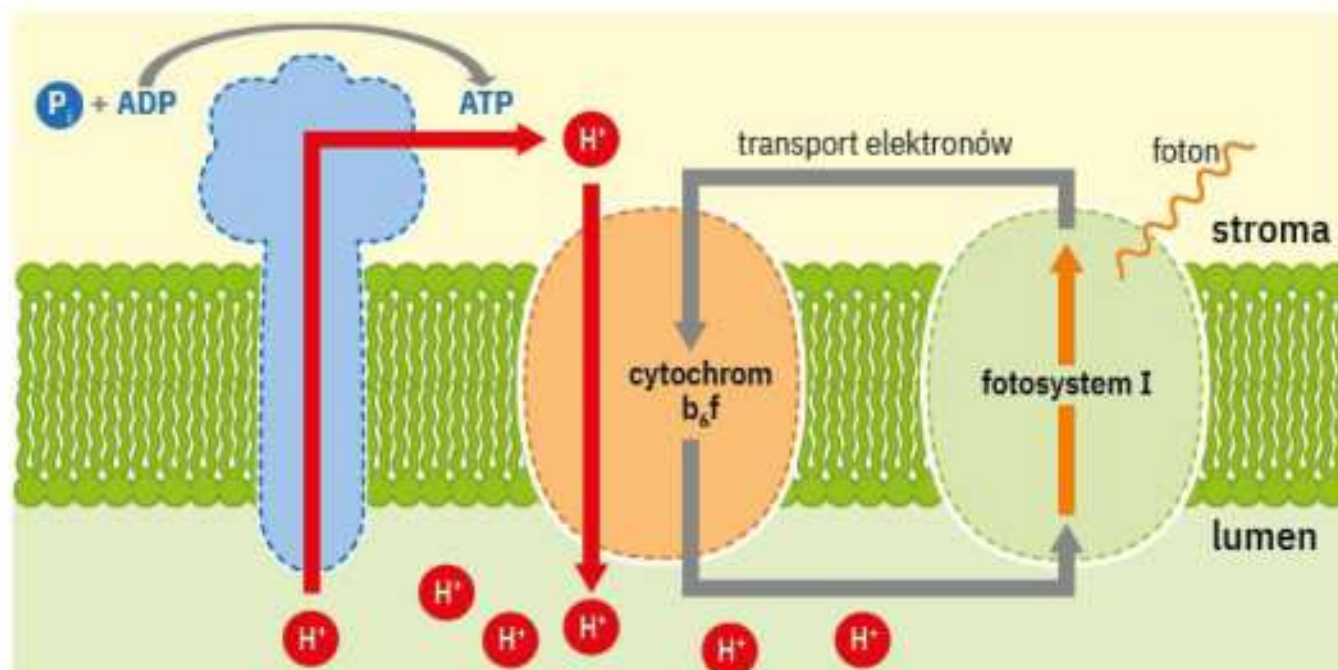
znowu do PSI, uzupełniając jego luki elektronowe. Wytworzony w czasie transportu elektronów gradient protonów służy jako siła napędowa syntazy ATP. Ponieważ w cyklicznym transporcie elektronów nie bierze udziału PSII, nie zachodzi także rozkład wody – nie uwalnia się tlen. Choć znaczenie cyklicznego transportu elektronów nie jest wciąż jasne, wydaje się, że jest to alternatywna droga produkcji ATP w warunkach dużego zapotrzebowania na to źródło energii. Porównanie cyklicznego i niecyklicznego transportu elektronów przedstawia **tabela IV.6.2.**

Tab. IV.6.2. Porównanie niecyklicznego i cyklicznego transportu elektronów

	Niecykliczny transport elektronów	Cykliczny transport elektronów
donor elektronów	H_2O	brak
wydzielanie tlenu	tak	nie
akceptor elektronów	$NADP^+$	brak
udział fotosystemów	PSI, PSII	PSI
postać energii	ATP i NADPH	ATP



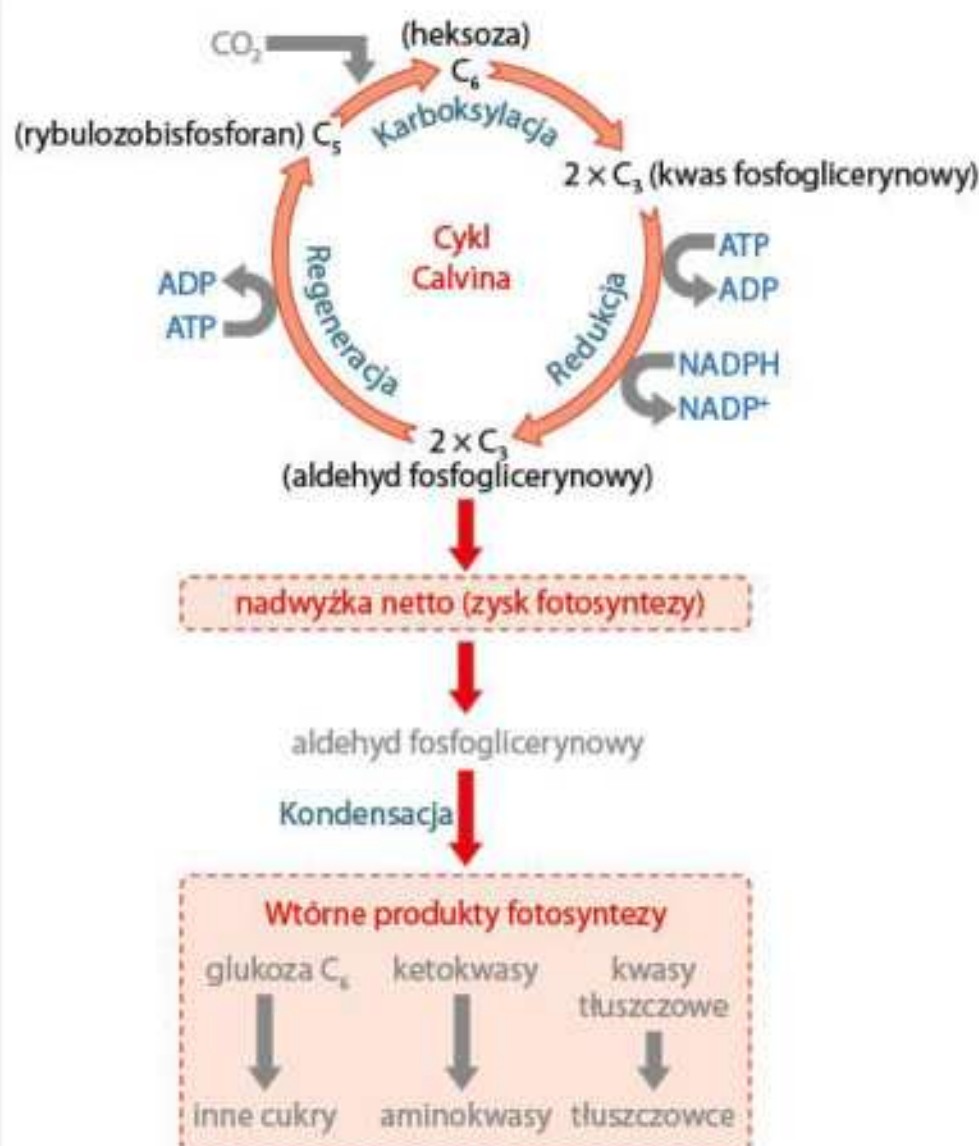
Ryc. IV.6.13. Chloroplastowa syntaza ATP napędzana jest siłą protonomotoryczną.



Ryc. IV.6.14. Zasada cyklicznego transportu elektronów wokół PSI.

■ Faza ciemna – niezależna od światła – cykl Calvina-Bensona

Siła asymilacyjna (ATP i NADPH) wytworzona w jasnej fazie jest wykorzystywana w biosyntezie związków organicznych z CO_2 (ryc. IV.6.15.). Całość przemian tego cyklu nazywano **cyklem Calvina-Bensona**, od nazwisk uczonych, którzy w latach 1950–1960 wyjaśnili ten proces. Reakcje cyklu Calvina-Bensona zachodzą w trzech etapach, a każdy z nich musi zajść sześć razy, aby mogła powstać jedna cząsteczka glukozy. Cykl Calvina-Bensona obejmuje:



Ryc. IV.6.15. Przebieg cyklu Calvina-Bensona.

1. **karboksylację**, w czasie której CO_2 pochodzący z atmosfery jest przyłączany do pięciowęglowego związku – rybulozo-1,5-bisfosforanu (RuBP). Reakcję tę katalizuje enzym **karboksylaza/oksygenaza rybulozo-1,5-bisfosforanowa**, znana także jako **Rubisco** (czytaj: rubisko). W reakcji przeprowadzanej przez Rubisco powstaje nietrwały związek sześciowęglowy, który rozpada się na dwie trójwęglowe cząsteczki **kwasu 3-fosfoglicerynowego**.

2. **redukcję**, w czasie której kwas 3-fosfoglicerynowy przy udziale **siły asymilacyjnej** (ATP i NADPH) jest przekształcany w **aldehyd 3-fosfoglicerynowy**. Aldehyd ten to **pierwotny produkt fotosyntezy**, który służy do syntezy innych cukrów (mono- i polisacharydów), a także innych związków organicznych.

3. **regenerację**, która polega na odtworzeniu rybulozo-1,5-bisfosforanu. Do tego potrzeba ATP oraz pięciu cząsteczek aldehydu-3-fosfoglicerynowego.

W procesie asymilacji węgla uczestniczy: sześć cząsteczek CO_2 , ATP i NADPH. Z sześciu wytworzonych cząsteczek aldehydu 3-fosfoglicerynowego tylko jedna służy do syntezy glukozy, reszta stanowi substraty do regeneracji RuBP.

Rubisco ► Kluczowym enzymem cyklu Calvina-Bensona jest enzym **Rubisco**. To duże białko, złożone aż z 16 podjednostek, najobficiej występujące w komórkach roślinnych i prawdopodobnie także w całej biosferze. Stanowi jeden z najważniejszych enzymów, ponieważ jego aktywność powoduje wprowadzanie do biosfery węgla organicznego. Jednak enzym ten wykazuje podwójną aktywność: karboksylacji, czyli

przyłączania CO_2 do RuBP, oraz oksygenacji, czyli łączenia się z tlenem. W efekcie oksygenacji powstaje tylko jedna cząsteczka aldehydu 3-fosfoglicerynowego. Proces ten nazwano **fotooddychaniem** (fotorespiracją). Fotooddychanie jest procesem niekorzystnym, ponieważ związki organiczne przekształcane są w CO_2 , a równocześnie nie powstaje ani ATP, ani NADPH. Fotooddychanie zachodzi najczęściej u roślin w warunkach małego stężenia CO_2 i dużego nagromadzenia tlenu. Taka sytuacja ma miejsce podczas gorących dni – przy dużym nasłonecznieniu i niedoborze wody. Skutkiem fotooddychania jest zmniejszenie wydajności plonów i przyrostu biomasy roślin.

✦ fotooddychanie

Rośliny typu C_3 , C_4 oraz CAM

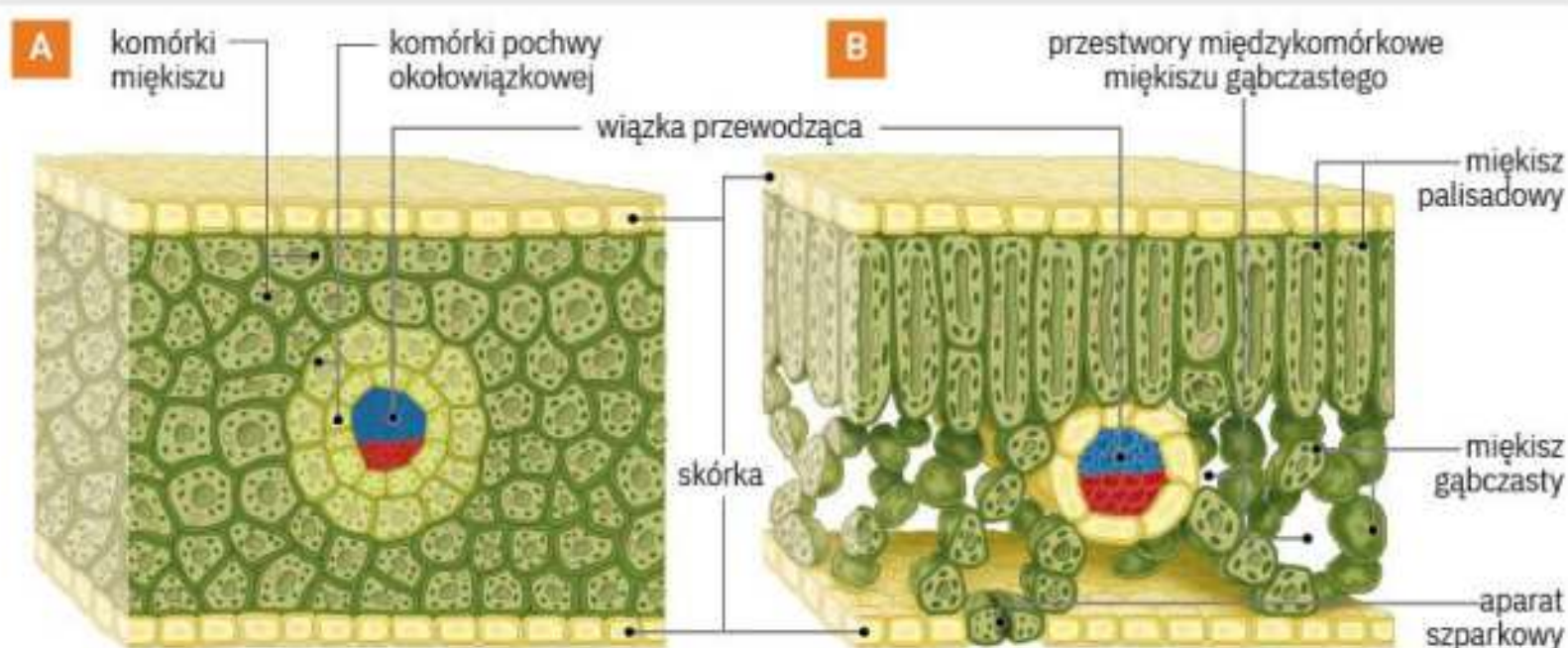
U większości roślin pierwszym produktem karboksylacji jest trójwęglowa cząsteczka kwasu 3-fosfoglicerynowego (patrz wyżej). Z tego powodu rośliny te nazwano **roślinami typu C_3** . U niektórych roślin występujących w suchym i gorącym klimacie (np. trzcina cukrowa, kukurydza) pierwotnym akceptorem CO_2 jest związek czterowęglowy – szczawiooctan. Dlatego te rośliny nazywamy **roślinami typu C_4** . U niektórych roślin CO_2 jest także wiązany do szczawiooctanu, ale w przeciwieństwie do roślin typu C_4 , to proces rozdzielony czasowo – asymilacja CO_2 ma miejsce w nocy. Rośliny te nazywamy **CAM (typu CAM)**.

✦ rośliny typu C_3

U **roślin typu C_4** asymilacja CO_2 jest rozdzielona przestrzennie, co umożliwia specjalna budowa anatomiczna liścia (ryc. IV.6.16.). Komórki mezofilu liścia rośliny C_4 wiążą się z komórkami **pochwy okołowiązkowej**, która otacza wiązkę przewodzącą. Cały proces obejmuje dwa etapy:

✦ rośliny typu C_4

- **szlak przemian C_4** , który występuje w komórkach mezofilu i polega na wiązaniu i akumulacji dwutlenku węgla; wytworzony w tym czasie czterowęglowy szczawiooctan jest „nośnikiem” CO_2 ;
- **cykl Calvina-Bensona**, który przebiega w komórkach pochwy okołowiązkowej i rozpoczyna się od przetransportowania, przekształcenia i odłączenia CO_2 od szczawiooctanu. Dalsze reakcje są typowe dla cyklu (ryc. IV.6.16.).



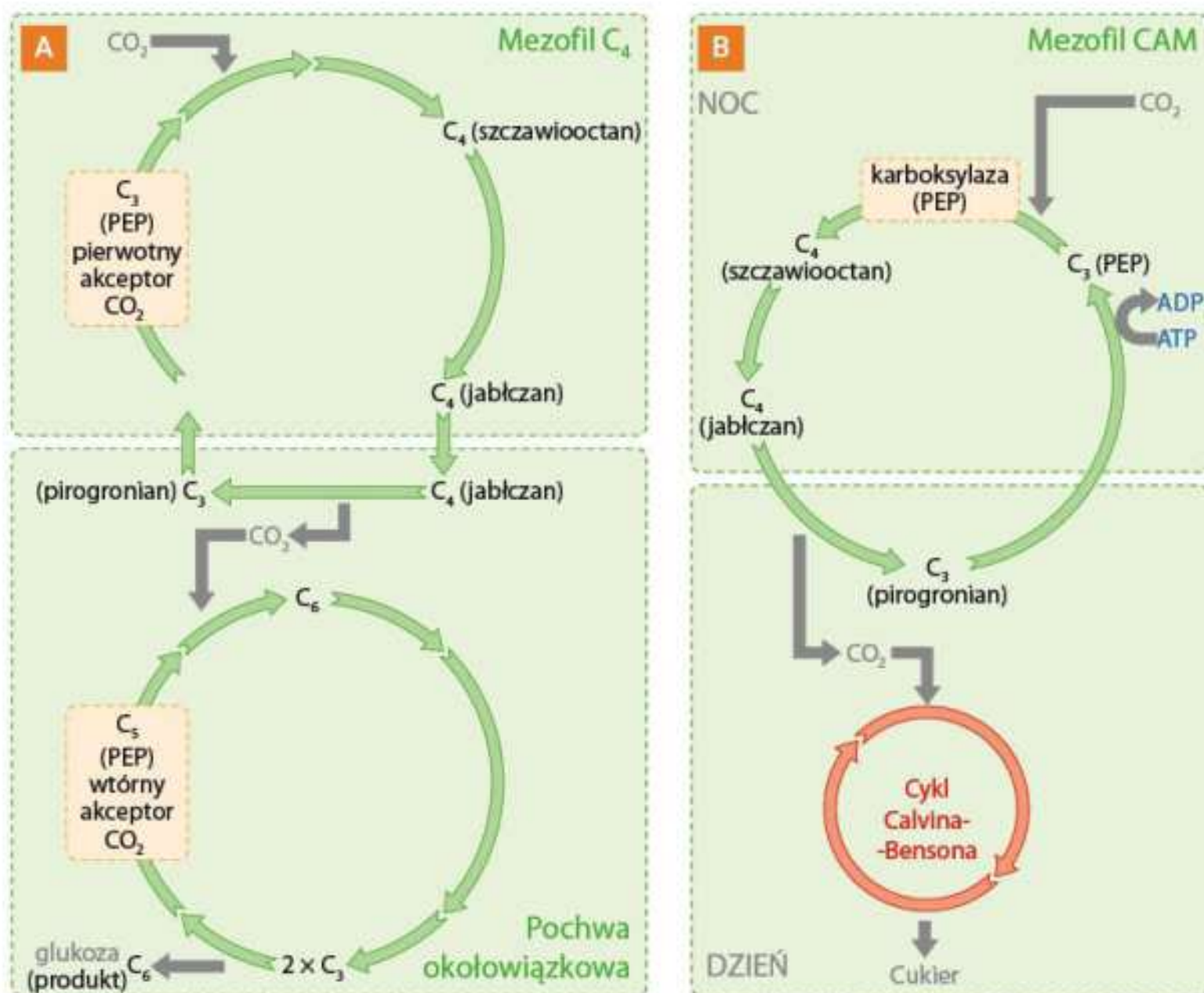
Ryc. IV.6.16. Porównanie budowy anatomicznej liścia roślin typu C_4 (A) oraz C_3 (B).

Proces wiązania CO_2 u roślin typu C_4 ma na celu zmaksymalizowanie jego stężenia w komórkach pochwy okołowiązkowej. Stężenie CO_2 w tych komórkach może być kilkadziesiąt razy większe niż w komórkach mezofilu roślin C_3 . Przekłada się to na większą produktywność roślin C_4 w porównaniu z roślinami C_3 .

szlak CAM ▶

Rośliny żyjące na obszarach gorących i suchych wykształciły wiele mechanizmów przystosowawczych do tych warunków. Jednym z nich jest sposób wiązania CO_2 , nazywany **szlakiem CAM**, od rodziny roślin gruboszowatych, u której po raz pierwszy go opisano (z ang. *crassulacean acid metabolism*, czytaj: krasualacen acids) metabolizm, CAM, czyli metabolizm kwasowy roślin gruboszowatych). Szlak CAM występuje także u innych rodzin, m.in. kaktusowatych, liliowatych czy storczykowatych.

Ponieważ rośliny **typu CAM** muszą ograniczać transpirację i straty wody w dzień, ich aparaty szparkowe są zamknięte. To uniemożliwia wymianę gazową i dopływ CO_2 . U tych roślin aparaty szparkowe otwierają się w nocy i wtedy ma miejsce pobieranie oraz akumulacja CO_2 . Dwutlenek węgla wiązany jest w szczawiooctan, który po przekształceniu w inny kwas – jabłczan – ulega nagromadzeniu w wakuoli komórek mezofilu. W tej formie CO_2 „czeka”, kiedy w ciągu dnia może być wykorzystany w czasie typowej fotosyntezy – fazy jasnej i cyklu Calvina-Bensona. Porównanie asymilacji CO_2 u roślin typu C_4 oraz CAM przedstawiono na **rycynie IV.6.17**.



Ryc. IV.6.17. Porównanie asymilacji CO_2 u roślin typu C_4 (A) oraz CAM (B). U roślin typu C_4 asymilacja CO_2 i cykl Calvina-Bensona są rozdzielone przestrzennie, a u roślin typu CAM – czasowo.

Sposób wiązania CO_2 u roślin typu CAM nie zwiększa ich produktywności, jak to ma miejsce w przypadku roślin typu C_4 . Metabolizm CAM jest przykładem znakomitego przystosowania roślin do niekorzystnych warunków środowiska, np. pustynnych. Wśród roślin CAM istnieją także takie, które mogą przestawiać się z fotosyntezy typu CAM na fotosyntezę typu C_3 (i odwrotnie). Przykładem jest przypołudnik kryształkowy – *Mesembryanthemum crystallinum* (czytaj: masembrateum krystalinum). Roślina ta, rosnąc w warunkach silnego zasolenia gleby, zmienia metabolizm C_3 na CAM (ryc. IV.6.18.).



Ryc. IV.6.18. *Mesembryanthemum crystallinum* to roślina, która w warunkach silnego zasolenia zmienia metabolizm typu C_3 na CAM.

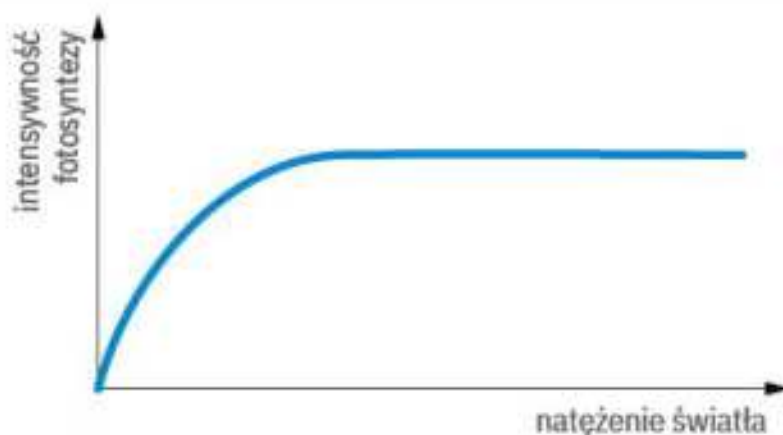
Czynniki wpływające na wydajność fotosyntezy

czynniki
wpływające na
fotosyntezę

Intensywność fotosyntezy u roślin jest uwarunkowana czynnikami wewnętrznymi oraz zewnętrznymi. Do ważnych **czynników wewnętrznych** należą: liczba i rozmieszczenie aparatów szparkowych (warunkują szybkość wnikania CO_2 i uwalniania O_2), powierzchnia blaszki liściowej czy grubość kutykuli. Nie mniejsze znaczenie ma rozmieszczenie w komórkach mezofilu chloroplastów oraz zawartość w nich chlorofilu.

Czynnikami zewnętrznymi regulującymi intensywność fotosyntezy są: światło, temperatura, stężenie CO_2 oraz dostępność wody i soli mineralnych.

Światło jest szczególnie istotne dla przebiegu fazy jasnej fotosyntezy. Z pochłoniętej w około 80% energii świetlnej rośliny wykorzystują tylko niespełna 4%. Wydajność fotosyntezy zależy także od jakości docierającego światła – jego barwy i natężenia. Zależność między intensywnością fotosyntezy a natężeniem światła jest liniowa tylko do pewnego momentu zwanego świetlnym punktem wysycenia, w którym fotosynteza osiąga wartość maksymalną (ryc. IV.6.19.).



Ryc. IV.6.19. Wpływ natężenia światła na intensywność fotosyntezy.

Przy nadmiernym oświetleniu dochodzi do zahamowania fotosyntezy, co jest głównie związane z utlenieniem chlorofilu w fotosystemach. Rośliny różnią się zdecydowanie tolerancją na natężenie światła. **Rośliny światłolubne** są przystosowane do wzrostu w warunkach dużego nasłonecznienia. Należą tu zboża i liczne rośliny uprawne. Z kolei **rośliny ceniolubne** najlepiej funkcjonują w warunkach słabego nasłonecznienia. Rośliny tego typu wybierają tereny zacienione, np. występują w runie leśnym. Przykładem jest szczawik zajęczy i przylaszczka pospolita.

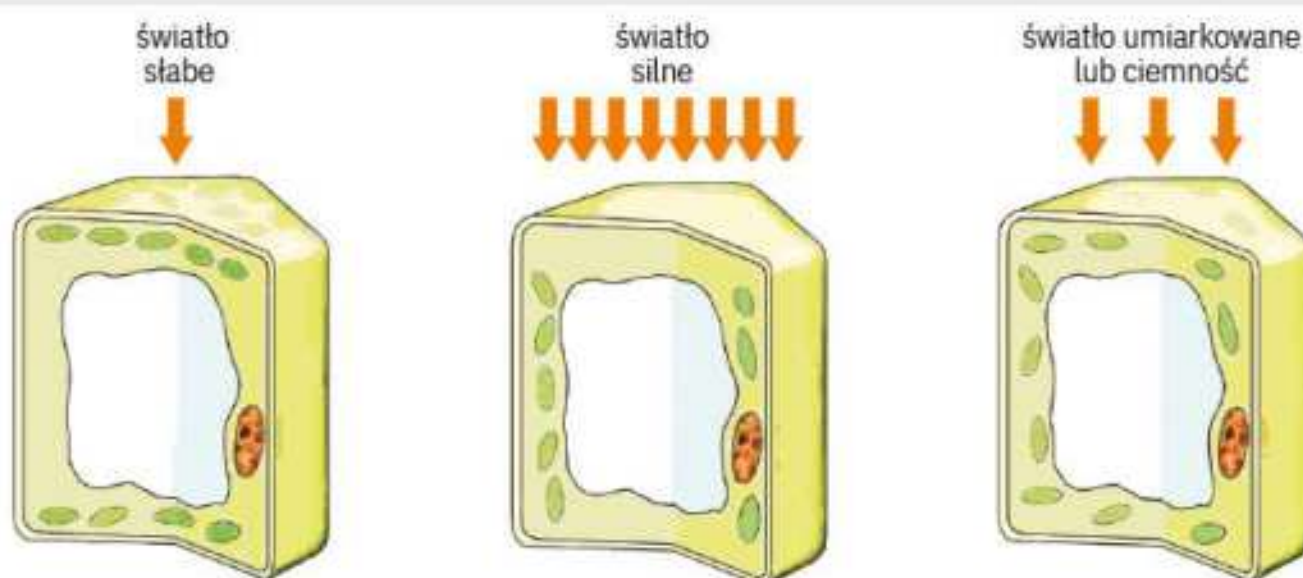
Choć rośliny nie mają możliwości aktywnego poruszania się, wykształciły mechanizmy związane z ruchem, które pozwalają im na regulowanie ilości docierającego światła. Osiągają to poprzez:

- **ruchy liści**, np. szczawik zajęczy pod wpływem silnego światła zmienia położenie blaszek liściowych z poziomego na pionowy (ryc. IV.6.20.);



Ryc. IV.6.20. Szczawik zajęczy to roślina ceniolubna, która reguluje dopływ światła za pomocą ruchów liści – przy małym nasłonecznieniu liście są ustawione poziomo (A), a przy dużym liście są zwinione i mają pozycję pionową (B).

- **ruchy chloroplastów** – ten mechanizm jest stosowany w celu wychwycenia jak największej ilości światła, a także ograniczenia jego dopływu (ryc. IV.6.21.).

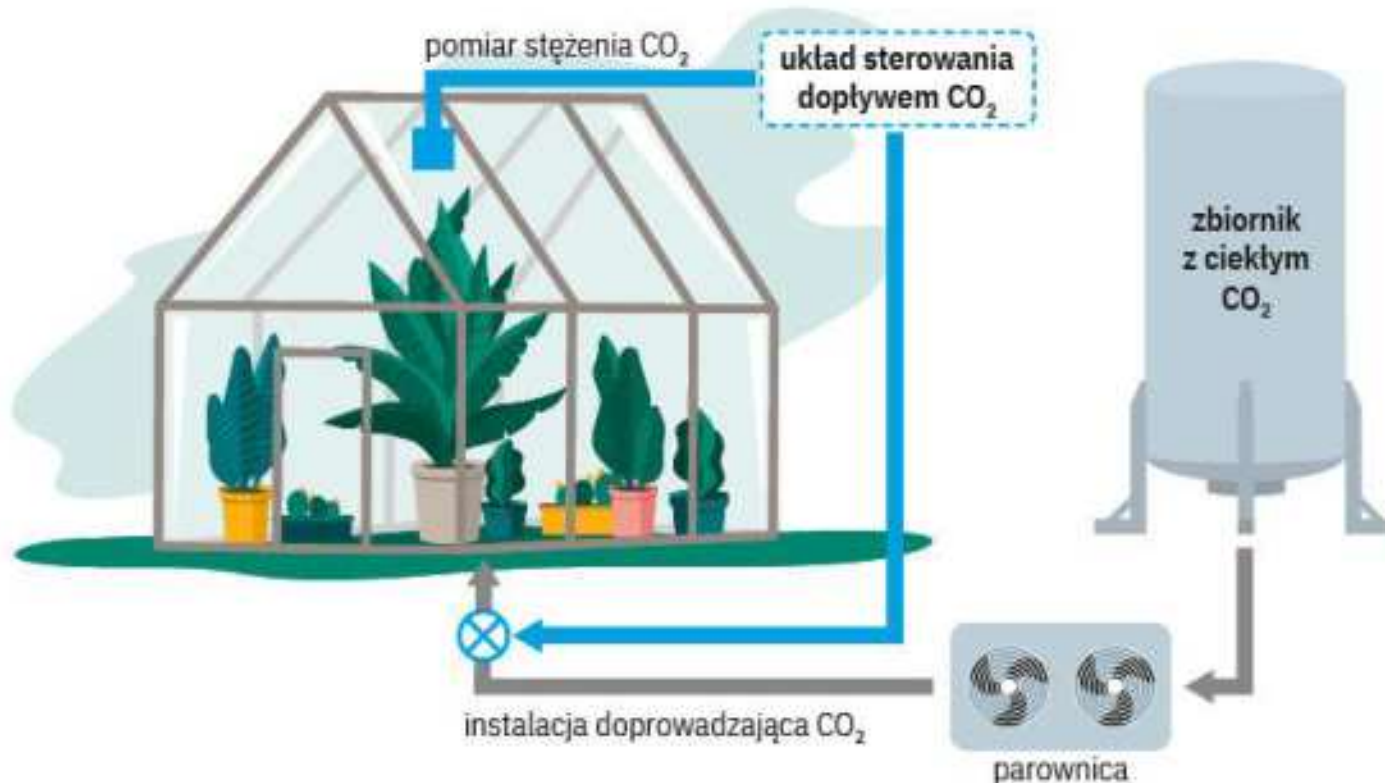


Ryc. IV.6.21. Ułożenie chloroplastów w zależności od natężenia światła.

Temperatura wpływa na wszystkie reakcje katalizowane enzymatycznie. Dla większości roślin naszej strefy klimatycznej optimum temperaturowe wynosi 20–35°C. Poniżej i powyżej tej wartości obserwuje się spadek intensywności fotosyntezy. Rośliny innych stref klimatycznych mają inne wymagania temperaturowe. Rośliny stref okołobiegunowych mogą prowadzić fotosyntezę w temperaturze bliskiej 0°C, a z kolei te ze strefy okołorównikowej – nawet w temperaturze ponad 45°C.

Zawartość CO₂ w atmosferze (0,03%) jest poniżej wartości optymalnych dla fotosyntezy. Enzym Rubisco przeprowadzający jego asymilację pracuje wydajniej przy

większych jego stężeniach. Fakt ten wykorzystuje się w hodowli roślin. W specjalnie przystosowanych pomieszczeniach sztucznie zwiększa się zawartość CO_2 (ryc. IV.6.22.).



Ryc. IV.6.22. Schemat systemu wzbogacania pomieszczenia hodowlanego w CO_2 .

Woda ma wieloraki wpływ na intensywność fotosyntezy. Jest substratem tego procesu (rozkład wody dostarcza elektronów i protonów w fazie jasnej), zapewnia odpowiedni turgor komórek mezofilu, a także wpływa na otwieranie i zamykanie się aparatów szparkowych (poprzez uwodnienie komórek budujących aparat). Woda stanowi także środowisko większości reakcji fotosyntetycznych. Zarówno niedobór, jak i nadmiar wody wpływają niekorzystnie na proces fotosyntezy.

Niedobór **solí mineralnych** (np. żelaza, magnezu czy azotu) hamuje syntezę chlorofilu, cytochromów i nukleotydów – kluczowych elementów aparatu fotosyntetycznego. Z kolei brak potasu, manganu i chloru ogranicza aktywność enzymów biorących udział w reakcjach fazy jasnej i ciemnej.

Znaczenie fotosyntezy

znaczenie fotosyntezy

Fotosynteza ma ogromne znaczenie dla środowiska. Wynika to m.in. z następujących faktów:

- rośliny jako producenci wytwarzają niemal całą **materię organiczną** wykorzystywaną jako **źródło węgla** przez heterotrofów (w tym ludzi);
- fotosynteza jest **źródłem tlenu** na Ziemi, co warunkuje życie organizmów oddychających tlenowo;
- rośliny poprzez asymilację CO_2 usuwają go z atmosfery, ograniczając **efekt cieplarniany** i globalne ocieplenie.

► Jak się bada fotosyntezę?

Badania procesu fotosyntezy są niezmiernie ważne nie tylko z punktu widzenia jego fundamentalnego znaczenia dla naszego życia. Do badania procesów fotosyntetycznych wykorzystuje się szereg technik i metod, spośród których najbardziej popularne są:

- **elektroda tlenowa Clarka** o wysokiej czułości, za której pomocą mierzy się szybkość wydzielania O_2 w fotosyntezie (np. w warunkach różnego natężenia światła); do tego celu wykorzystuje się wyizolowane chloroplasty lub zawiesinę glonów czy sinic;
- **analizator CO_2 w podczerwieni** służy do pomiaru szybkości asymilacji dwutlenku węgla przez jego uwalnianie (w czasie fotooddychania);
- **metody fluorescencyjne**, za których pomocą bada się wydajność fotosyntezy oraz procesy bioenergetyczne zachodzące w czasie jasnej fazy fotosyntezy;
- **mikroskopia** – za pomocą mikroskopu optycznego można „obejrzeć” komórki czy chloroplasty, a do badania mniejszych obiektów, np. budowy błon fotosyntetycznych, niezbędne jest zastosowanie mikroskopu elektronowego (transmisyjnego lub skaningowego);
- **inżynieria genetyczna**, która pozwala na badanie funkcji genów i kodowanych przez nie białek zaangażowanych w proces fotosyntezy.



Eksperyment

1. Rozdział barwników fotosyntetycznych liścia na bibule

Wprowadzenie: Liście roślin zawierają kilka rodzajów barwników fotosyntetycznych: chlorofil *a* i *b* oraz karotenoidy. Chlorofil *a* jest niebiesko-zielony, a chlorofil *b* żółto-zielony. Występujące w największych ilościach karotenoidy: – luteina i β -karoten – są odpowiednio żółte i pomarańczowe. Do rozdziału barwników wyizolowanych z liścia stosuje się metody chromatograficzne, których najprostszym przykładem jest chromatografia bibułowa.

Problem badawczy: Jakie barwniki znajdują się w natce pietruszki?

Hipoteza badawcza: Natka pietruszki zawiera chlorofile i karotenoidy.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: Z bibuły wytnij pasek o wymiarach 2 cm na 10 cm. Natkę pietruszki (ok. 10 g) potnij nożyczkami na małe kawałki i utrzyj w moździerzu z 10 ml acetonu. Pobierz strzykawką około 1 ml klarownego ekstraktu i nanieś kilkakrotnie na bibułę w odległości około 0,5 cm od krótszej krawędzi. Bibułę wraz z naniesionym ekstraktem umieść pionowo w zlewce wypełnionej acetonem na wysokości nie większej niż 0,5 cm od dna. Nakryj zlewkę szkiełkiem zegarkowym i obserwuj wędrówkę barwników w górę bibuły.

Opracowanie wyników: Przerysuj do zeszytu wzór uzyskanych barwników. Z wykorzystaniem dostępnej literatury określ pozycję chlorofilu *a*, chlorofilu *b*, luteiny oraz β -karotenu.

Wnioski: Sformułuj wniosek.

W dostępnej literaturze poszukaj informacji na temat innych karotenoidów występujących w liściach roślin oraz ich zastosowań.

Eksperyment



2. Wpływ natężenia światła na intensywność fotosyntezy

Wprowadzenie: Intensywność fotosyntezy w dużym stopniu zależy od czynników zewnętrznych, takich jak światło, temperatura czy dostępność wody.

Problem badawczy: Sformułuj problem badawczy.

Hipoteza badawcza: Wzrost natężenia światła powoduje wzrost natężenia fotosyntezy.

Instrukcja przeprowadzenia doświadczenia: W 4 zlewkach z wodą wzbogaconą w CO_2 i o temperaturze pokojowej umieść jednakowej wielkości pędy moczarki kanadyjskiej. Jedną zlewkę umieść w miejscu bez dostępu światła (próba kontrolna), a trzy pozostałe w różnych odległościach (25 cm, 75 cm oraz 150 cm) od źródła światła (próba badawcza). Obserwuj wydzielanie się pęcherzyków gazu w każdej ze zlewek.

Opracowanie wyników: Sporządź w zeszycie tabelę, w której uwzględnisz wynik doświadczenia dla każdej z prób.

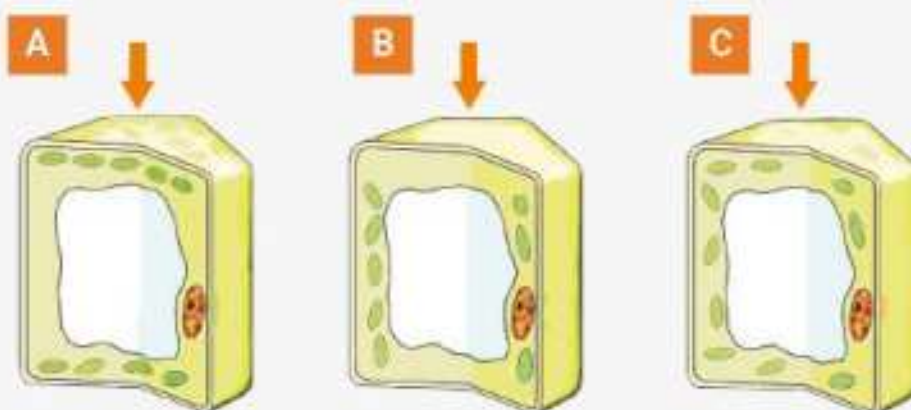
Wnioski: Wraz ze wzrostem natężenia światła wzrasta intensywność fotosyntezy.

W dostępnej literaturze poszukaj informacji na temat sztucznej fotosyntezy i wyjaśnij, na czym ona polega.

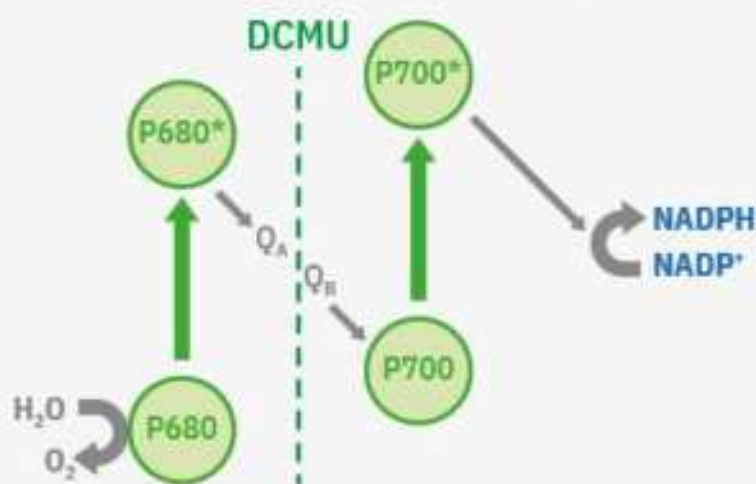
ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- Wyjaśnij różnicę pomiędzy autotrofami i heterotrofami. Podaj po trzy przykłady organizmów z każdej z grup.
- Narysuj i opisz w zeszycie schemat organelli komórkowej, w której zachodzi fotosynteza.
- Określ, jaką rolę odgrywają chlorofil i karotenoidy w przebiegu jasnej fazy fotosyntezy.
- Porównaj fosforylację cykliczną i niecykliczną.
- Omów, w jaki sposób powstaje siła asymilacyjna.
- Wymień etapy cyklu Krebsa i omów znaczenie każdego z nich.
- Wskaż podobieństwa i różnice między fosforylacją oksydacyjną i fotosyntetyczną.
- Podaj, na jakiej podstawie dokonano podziału roślin na typy C_3 , C_4 oraz CAM.
- Wymień i scharakteryzuj czynniki zewnętrzne wpływające na proces fotosyntezy.

- Na rycinach przedstawiono ułożenie chloroplastów pod wpływem silnego i słabego światła. Dopasuj do schematów następujące opisy: *słabe światło*, *umiarkowane światło*, *silne światło*. Wyjaśnij, jakie znaczenie ma takie ułożenie chloroplastów. Odpowiedź zapisz w zeszycie.



11. Niektóre naukowe przewidywania sugerują, że gdyby ustała fotosynteza, życie z powierzchni Ziemi znikłoby w ciągu 25 lat. Podaj w zeszycie co najmniej trzy powody takiego stanu rzeczy.
12. W dostępnej literaturze znajdź informacje na temat wybranej metody fluorescencyjnej pomiaru fotosyntezy i sporządź w zeszycie krótką notatkę na jej temat.
13. W badaniach nad fotosyntezą roślin stosuje się organiczny związek – inhibitor łańcucha transportu elektronów o nazwie DCMU. Miejsce jego działania pokazano na poniższym rysunku.



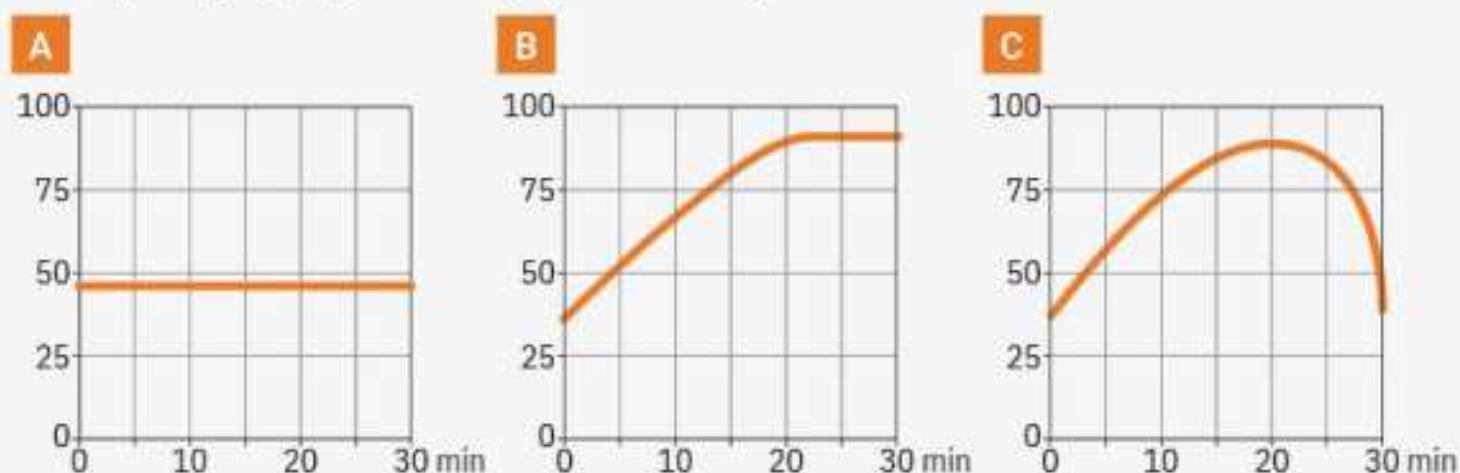
13.1. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. DCMU hamuje niecykliczny transport elektronów.	...
2. W wyniku działania DCMU nie powstaje siła asymilacyjna.	...
3. DCMU blokuje proces rozkładu wody w kompleksie rozkładającym wodę.	...
4. Pod wpływem DCMU przepływ elektronów jest zahamowany, ale ATP się tworzy.	...

13.2. Wytłumacz, dlaczego DCMU znalazł zastosowanie jako herbicyd.

14. Intensywność procesu fotosyntezy można szacować na podstawie ilości wydzielanego tlenu. Typowe doświadczenie polega na umieszczeniu moczarki kanadyjskiej w zlewce z wodą wzbogaconą w CO_2 i liczeniu wydzielających się bąbelków tlenu (gazu) od momentu włączenia umiarkowanego, równomiernego oświetlenia.

Wskaż, który wykres odpowiada zależności intensywności fotosyntezy w czasie, mierzonej jako ilość wydzielającego się tlenu. Swoój wybór uzasadnij.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- W czasie fotosyntezy są syntetyzowane węglowodany i uwalnia się tlen. s. 217
- **Autotrofy** to organizmy samożywne, które syntetyzują swoje cząsteczki z prostych związków nieorganicznych przy udziale energii świetlnej lub chemicznej. s. 218
- **Organizmy heterotroficzne** to organizmy cudzożywne, które odżywiają się gotową materią organiczną. s. 218
- U roślin fotosynteza przebiega w **chloroplastach**. s. 219
- **Chloroplast** jest otoczony podwójną błoną. W jego wnętrzu znajduje się stroma, w której są zawieszone grana zbudowane z tylakoidów ułożonych jeden na drugim. s. 219
- W czasie fotosyntezy są absorbowane **fotony światła słonecznego w zakresie widzialnym** widma elektromagnetycznego. s. 223
- Głównym **barwnikiem fotosyntetycznym jest chlorofil** (u roślin wyższych chlorofil *a* i *b*), który jest zbudowany z dwóch części: pierścienia porfiryнового oraz łańcucha bocznego. s. 220
- **Barwnikami pomocniczymi** są karotenoidy (karoteny i ksantofile), które działają jak anteny – zbierają i przekazują fotony na chlorofil. s. 220
- **Aparat fotosyntetyczny** jest zbudowany z kompleksów białkowo-barwnikowych: kompleksów antenowych, fotosystemów (I i II) i przenośników. s. 225
- Fotosynteza obejmuje **dwie fazy**: jasną (zależną od światła) oraz ciemną (niezależną od światła, zwaną cyklem Calvina-Bensona). s. 225
- W trakcie niecyklicznego transportu elektrony wybite z centrum **reakcji PSI i PSII** są transportowane przez szereg błonowych przenośników na NADP^+ , a wytworzony w tym czasie gradient protonów służy do syntezy ATP (fosforylacja fotosyntetyczna). s. 225
- **Luka elektronowa w PSI** jest zapelniana przez elektron pochodzący z PSII, a dziura w PSII jest zapelniana przez elektrony pochodzące z rozkładu wody (produktem ubocznym jest tlen). s. 226
- W **fosforylacji cyklicznej** bierze udział tylko PSI i powstaje ATP (nie tworzy się NADPH). s. 225
- Główną funkcją fazy jasnej przebiegającej w błonach tylakoidów jest produkcja siły asymilacyjnej, czyli ATP i NADPH wykorzystywanej w **cyklu Calvina-Bensona**. s. 228
- **Faza ciemna** (cykl Calvina-Bensona), która obejmuje karboksylację, redukcję i regenerację, polega na włączeniu CO_2 w szkielet związków organicznych – powstaje aldehyd 3-fosfoglicerynowy, z którego jest syntezowana glukoza. s. 228
- Kluczowym enzymem cyklu Calvina-Bensona jest karboksylaza/oksygenaza rybulozo-1,5-bisfosforanowa – **Rubisco**, która katalizuje przyłączanie CO_2 do związku pięciowęglowego, a także bierze udział w fotooddychaniu. s. 228
- U roślin **typu C_3** (np. zboża, rośliny uprawne) pierwszym produktem karboksylacji jest związek trójwęglowy (kwas 3-fosfoglicerynowy), a u roślin typu C_4 (np. kukurydza) i typu CAM (np. agawa) – związek czterowęglowy (szczawiooctan). s. 229
- Rośliny **typu C_4 i CAM** dążą do maksymalnego zagęszczania CO_2 w komórkach; u roślin typu C_4 faza jasna i asymilacja CO_2 są rozdzielone przestrzennie (zachodzą w komórkach mezofilu i pochwy okółowiązkowej), a u roślin typu CAM są rozdzielone czasowo (faza jasna zachodzi w dzień, a asymilacja CO_2 w nocy). s. 229

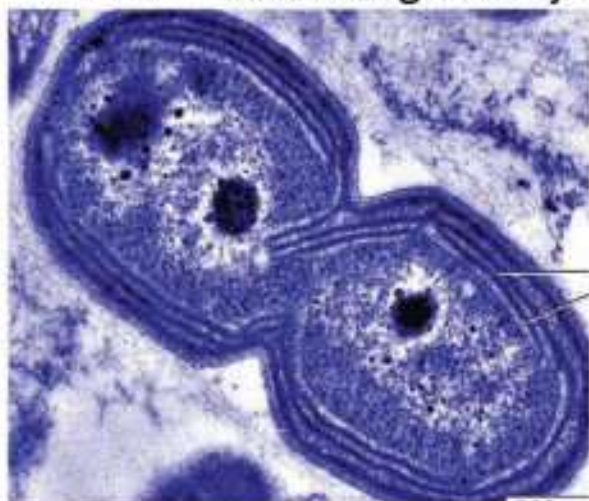
- s. 231 ▶ • Na proces fotosyntezy wpływają **czynniki zewnętrzne**: światło, temperatura, zawartość CO_2 oraz dostępność wody i soli mineralnych.
- s. 233 ▶ • Fotosynteza ma **fundamentalne znaczenie** dla środowiska, m.in. produkuje materię organiczną i dostarcza życiodajnego tlenu.
- s. 234 ▶ • **Intensywność fotosyntezy** bada się różnymi metodami, m.in.: za pomocą elektrody tlenowej czy metod fluorescencyjnych.

7. Chemosynteza

NA TEJ LEKCJI:

- poznasz znaczenie i przebieg chemosyntezy;
- dowiesz się, w których organizmach zachodzi chemosynteza.

- chemosynteza ▶ **Chemosynteza** to, podobnie jak fotosynteza, rodzaj autotrofizmu. W przeciwieństwie do fotoautotrofów chemoautotrofy do wytwarzania pokarmu nie wykorzystują energii świetlnej. Energia potrzebna do asymilacji CO_2 pochodzi z **utleniania prostych związków** nieorganicznych lub organicznych. Chemosynteza zachodzi u bakterii, a ich podział opiera się na rodzaju substratu wykorzystywanego jako źródło energii. Bakterie chemosyntetyczne dzielimy na dwie grupy: **chemolitotrofy** i **chemoorganotrofy**. Chemolitotrofy utleniają proste związki nieorganiczne: związki azotu (bakterie nitryfikacyjne), związki siarki (bakterie siarkowe), związki żelaza (bakterie żelaziste) czy wodór (bakterie wodorowe). Chemoorganotrofy wykorzystują z kolei proste związki organiczne, takie jak metan czy metanol. Chemosynteza jest procesem ewolucyjnie znacznie starszym niż fotosynteza. Obecnie chemosynteza ma duże znaczenie w cyklach biogeochemicznych (obiegach pierwiastków). Szczególnie istotne z rolniczego punktu widzenia są bakterie nitryfikacyjne (**tab. IV.7.1., ryc. IV.7.1.**), które przekształcają amoniak tworzący się w czasie rozkładu materii organicznej w azotany. Wzbogacają przez to glebę w niezbędne związki azotu, przyswajane następnie przez rośliny.



Ryc. IV.7.1. Bakterie nitryfikacyjne (*Nitrosomonas*) są przykładem organizmów chemosyntetycznych.

- etapy chemosyntezy ▶ Generalnie, chemosynteza u bakterii obejmuje **dwa etapy**:
1. utlenienie związku chemicznego i uzyskanie energii użytecznej biologicznie (ATP i NADH lub NADPH), co jest odpowiednikiem fazy jasnej fotosyntezy;
 2. asymilację CO_2 i wytworzenie cukrów prostych przy wykorzystaniu siły asymilacyjnej z pierwszego etapu. Ta faza jest analogiczna do cyklu Calvina-Bensona.

W **tabeli IV.7.1.** przedstawiono najważniejsze przykłady związków, których utlenienie dostarcza siły asymilacyjnej w trakcie chemosyntezy.

Tab. IV.7.1. Przykłady bakterii chemosyntetycznych i utlenianych przez nich związków

Rodzaj bakterii	Rodzaj utlenianego związku
Bakterie nitryfikacyjne – występują w glebie i w zbiornikach wodnych. <i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrosocystis</i> (czytaj: nitrosomonas, nitrosokystis) <i>Nitrobacter</i> , <i>Nitrococcus</i> (czytaj: nitrobakter, nitrokokus)	$\text{NH}_3 + 1 \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ $\text{NO}_2^- + 1 \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$
Bakterie siarkowe – występują w zbiornikach wody słodkiej i morskiej, w źródłach wody siarkowej, w osadach dennych, ściekach kanalizacyjnych. <i>Beggiatoa</i> (czytaj: begiatoa) <i>Thiothrix</i> (czytaj: tiotriks)	$\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{S}^0$ $\text{S}^0 + \text{H}_2\text{O} + 1 \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
Bakterie żelaziste – występują w środowiskach zakwaszonych (gleby, wody, kwaśne gorące źródła). <i>Ferrobactillus</i> (czytaj: ferobaktilus)	$4\text{FeCO}_3 + \text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 4\text{CO}_2$
Bakterie wodorowe – występują w glebie. <i>Hydrogenomonas</i> (czytaj: hydrogenomonas)	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Bakterie metanowe – występują w glebie, zbiornikach wodnych. <i>Methylobacter</i> (czytaj: metylobakter) <i>Methanomonas</i> (czytaj: metanomonas)	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CHOH} + 2\text{H}$ $\text{CHOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCOOH} + 2\text{H}$ $\text{HCOOH} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}$

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

- Wyjaśnij, na czym polega chemosynteza, i podaj przykłady organizmów, u których zachodzi.
- Scharakteryzuj przebieg chemosyntezy.
- Wyjaśnij, na czym opiera się podział bakterii chemosyntetycznych i podaj ich przykłady.
- Sporządź w zeszyte tabelę porównującą fotosyntezę z chemosyntezą, uwzględniając pierwotne źródło energii, znaczenie procesu dla organizmu, u którego przebiega, oraz znaczenie procesu dla biosfery.
- Poniżej przedstawiono dwie reakcje asymilacji dwutlenku węgla przez dwie grupy organizmów autotroficznych.

Określ, która z reakcji przedstawia chemosyntezę, a która – fotosyntezę. Uzasadnij odpowiedź w zeszyte.



PODSUMOWANIE LEKCJI

- Chemosynteza** jest rodzajem autotrofizmu. s. 238
- Energia potrzebna do asymilacji CO_2 pochodzi z **utleniania prostych związków** nieorganicznych (chemolitotrofy) lub organicznych (chemoorganotrofy). s. 238
- Do **chemolitotrofów** zaliczamy np. bakterie siarkowe, żelazowe czy nitryfikacyjne. s. 238
- Chemoorganotrofy** utleniają np. metan lub metanol. s. 238
- Chemosynteza obejmuje **dwa etapy**: 1. utlenienie związku chemicznego sprzężonego z syntezą ATP oraz NADH/NADPH; 2. asymilację CO_2 i wytworzenie cukrów prostych. s. 238

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

s. 173 ► Porównanie anabolizmu i katabolizmu

Cecha	Anabolizm	Katabolizm
rodzaj reakcji	reakcje syntezy	reakcje rozkładu
efekt energetyczny	reakcje endoergiczne (zużywanie energii)	reakcje egzoergiczne (uwalnianie energii)
przykład reakcji	fotosynteza, synteza białek	oddychanie komórkowe, β -oksydacja kwasów tłuszczowych

s. 174 ► Przenośniki energii i elektronów w komórce

Przenośnik energii/elektronów	Pełna nazwa	Charakterystyka
ATP	adenozynotrójfosforan	Uniwersalny przenośnik energii w komórce; zawiera wiązania wysokoenergetyczne pomiędzy resztami fosforanowymi; hydroliza tych wiązań prowadzi do uwolnienia znacznych ilości energii.
NAD ⁺ /NADH	dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy	Przejściowy zapas energii; nośnik elektronów i protonów; bierze udział w oddychaniu komórkowym i syntezie ATP.
NADP ⁺ /NADPH	fosforan dinukleotydu nikotynoamidoadeninowego	Nośnik elektronów w reakcjach syntezy (np. kwasów tłuszczowych czy steroidów); składnik fotosyntetycznej siły asymilacyjnej.
FAD/FADH ₂	dinukleotyd flawinowy	Przejściowy zapas energii; nośnik elektronów i protonów; bierze udział w oddychaniu komórkowym, kofaktor wielu enzymów.

s. 176 ► Rodzaje fosforylacji (syntezy) ATP

Rodzaj fosforylacji	Mechanizm	Miejsce zachodzenia	Proces, w którym zachodzi
Fosforylacja substratowa	przeniesienie reszty fosforanowej z cząsteczki związku organicznego na ADP	cytozol	oddychanie komórkowe (glikoliza, cykl Krebsa), fermentacja (glikoliza)
Fosforylacja oksydacyjna	transport elektronów przez łańcuch oddechowy na ostateczny akceptor – tlen wyzwala energię do syntezy ATP	wewnętrzna błona mitochondrialna	oddychanie komórkowe (łańcuch oddechowy)
Fosforylacja fotosyntetyczna	synteza ATP napędzana energią świetlną	błony tylakoidów	fotosynteza

Budowa enzymów

🔥 s. 179

Część białkowa	Część niebiałkowa (kofaktor)	
	jony metali (np. Mg^{2+} , Zn^{2+})	koenzymy (np. NAD^+ , FAD, witaminy)

Rodzaje specyficzności enzymów

🔥 s. 182

Specyficzność substratowa	Specyficzność katalizowanej reakcji	Stereospecyficzność
Enzym działa tylko na jeden wybrany substrat.	Enzym katalizuje określony rodzaj reakcji chemicznej.	Enzym działa tylko na jeden stereoizomer z danej pary tych izomerów (D lub L).

Czynniki wpływające na działanie enzymów

🔥 s. 183

Czynniki				
stężenie substratu	temperatura	pH	aktywatory	inhibitory

Rodzaje inhibicji enzymatycznej

🔥 s. 184

Inhibicja enzymatyczna		
Nieodwracalna	Odwracalna	
Inhibitor wiąże się kowalencyjnie z enzymem i dezaktywuje go nieodwracalnie.	Kompetycyjna	Niekompetycyjna
	• struktura inhibitora zbliżona do struktury substratu • inhibitor konkuruje z substratem o miejsce aktywne • wzrost stężenia substratu odblokowuje enzym	• inhibitor łączy się z enzymem w innym miejscu niż miejsce aktywne • inhibitor zmienia konformację enzymu i zmniejsza jego wydajność • siła inhibicji niezależna od stężenia substratu

Parametry charakteryzujące szybkość reakcji enzymatycznej

🔥 s. 187

Szybkość reakcji enzymatycznej	
Szybkość początkowa V_0	ilość produktu tworzonego w określonym czasie (s) przy stałym stężeniu enzymu
Szybkość maksymalna V_{max}	maksymalna szybkość enzymu w sytuacji obsadzenia substratami wszystkich miejsc aktywnych enzymu
Stała Michaelisa K_M	stężenie substratu, przy którym szybkość reakcji jest równa połowie szybkości maksymalnej

s. 196 ▶ **Etapy oddychania komórkowego**

Cecha	Glikoliza	Reakcja pomostowa	Cykl Krebsa	Łańcuch oddechowy
Sens etapu	rozkład glukozy do 2 cząsteczek pirogronianu	przekształcenie pirogronianu w acetylo-CoA	cykl reakcji, w których powstają NADH i FADH ₂	transport elektronów na tlen, synteza ATP
Substraty	glukoza, NAD ⁺ , ADP	pirogronian, NAD ⁺ , CoA	acetylo-CoA, NAD ⁺ , FAD, H ₂ O, ADP	O ₂ , NADH, FADH ₂ , ADP
Produkty	pirogronian, NADH, ATP	acetylo-CoA, CO ₂ , NADH	CO ₂ , NADH, FADH ₂ , ATP	H ₂ O, NAD ⁺ , FAD, ATP
Lokalizacja	cytozol	matriks mitochondrialna	matriks mitochondrialna	wewnętrzna błona mitochondrialna
Zysk energetyczny netto	2 ATP	0	2 ATP	26 ATP

s. 207 ▶ **Porównanie oddychania tlenowego i fermentacji**

Cecha	Oddychanie tlenowe	Fermentacja
Etapy	glikoliza, reakcja pomostowa, cykl Krebsa, łańcuch oddechowy	glikoliza, redukcja
Lokalizacja	cytozol i mitochondria	cytozol
Wymagania tlenowe	tylko w obecności tlenu	bez dostępu tlenu
Produkty końcowe	CO ₂ , H ₂ O	mleczan (fermentacja mlekowa), alkohol etylowy (fermentacja alkoholowa)
Rodzaj fosforylacji	substratowa i oksydacyjna	substratowa
Zysk energetyczny netto	30 ATP	2 ATP

s. 211 ▶ **Inne procesy metaboliczne**

Proces	Sens procesu	Powstające produkty	Lokalizacja
Glikogenoliza	rozkład glikogenu w celu uzupełnienia zasobów glukozy	glukoza (utlenianie w oddychaniu komórkowym)	wątroba, mięśnie szkieletowe
Glukoneogeneza	powstawanie glukozy z substancji innych niż cukry	glukoza (z kwasu mlekowego, glicerolu lub niektórych aminokwasów)	wątroba, nerki
β-oksydacja	rozkład kwasów tłuszczowych pochodzących z pokarmów	acetylo-CoA (włączany do cyklu Krebsa)	większość komórek organizmu
Szlak pentozofosforanowy	alternatywna droga utleniania glukozy	ryboza, NADPH (służą do syntezy, np. RNA)	erytrocyty, wątroba

FOTOSYNTENZA

Przebieg fotosyntezy

s. 217

Faza jasna	• absorpcja fotonu i wybicie elektronu z PSI • transport elektronu na NADP^+ i powstanie NADPH • wybicie elektronu przez foton z PSII i jego transport do PSI • rozkład wody na protony, elektrony i tlen • wypełnienie luki elektronowej w PSII • transport elektronów napędza powstanie siły protonomotorycznej • synteza ATP	powstaje siła asymilacyjna (NADPH i ATP)
Faza ciemna	trzy etapy: karboksylacja (włączanie CO_2 do rybulozo-1,5-bisfosforanu), redukcja (powstanie aldehydu 3-fosfoglicerynowego), regeneracja (odtworzenie rybulozo-1,5-bisfosforanu)	powstaje aldehyd 3-fosfoglicerynowy, z którego syntetyzowana jest glukoza i inne związki organiczne

Porównanie fosforylacji cyklicznej i niecyklicznej

s. 227

Cecha	Fosforylacja niecykliczna	Fosforylacja cykliczna
Warunki przebiegu	optymalne stężenia CO_2 i natężenia światła	niskie stężenie CO_2 , silne natężenie światła
Udział fotosystemów	PSI, PSII	PSI
Transport elektronów	elektrony z PSI na NADP^+ elektrony z PSII do PSI elektrony z rozkładu wody na PSII	elektrony z PSI przez szereg przenośników trafiają z powrotem do PSI
Rozkład wody	zachodzi, uwalnia się tlen	brak
Produkt	NADPH, tlen, ATP	ATP
Znaczenie	produkcja materii organicznej i uwalnianie tlenu	produkcja ATP przy zwiększonym zapotrzebowaniu na energię

Czynniki wpływające na intensywność fotosyntezy

s. 231

Czynniki			
intensywność światła	temperatura	dostępność wody i soli mineralnych	dostępność CO_2

s. 229 ► **Rośliny typu C₃, C₄ i CAM**

Typ roślin	Pierwotny produkt asymilacji CO ₂	Komórki, w których zachodzi asymilacja	Przykład roślin
C ₃	kwas 3-fosfoglicerynowy (C ₃)	komórki mezofilu	większość roślin
C ₄	szczawiooctan (C ₄)	komórki mezofilu i komórki pochwy okołowiązkowej	kukurydza, trzcina cukrowa, sorgo, proso
CAM	szczawiooctan (C ₄)	komórki mezofilu w ciągu nocy	ananas, agawa, wanilia

s. 238 ► **Porównanie fotosyntezy i chemosyntezy**

Cecha	Fotosynteza	Chemosynteza
Źródło energii	światło	utlenianie związków nieorganicznych (chemolitotrofy) lub organicznych (chemoorganotrofy)
Pierwszy etap	faza jasna – zależna od światła – przekształcenie energii świetlnej w energię w postaci ATP	utlenienie związków mineralnych, wytworzenie ATP oraz NADH lub NADPH
Drugi etap	faza ciemna – cykl Calvina-Ben-sona	redukcja CO ₂ z wykorzystaniem siły asymilacyjnej i wbudowanie w związki organiczne
Organizmy, u których zachodzi	rośliny, bakterie, sinice	bakterie (nitryfikacyjne, siarkowe, żelaziste, wodorowe, metanowe)
Znaczenie dla biosfery	wytwarzanie materii organicznej uwalnianie tlenu	obieg pierwiastków w przyrodzie przekształcanie amoniaku w azotany dostępne dla roślin

BLOK ĆWICZENIOWY

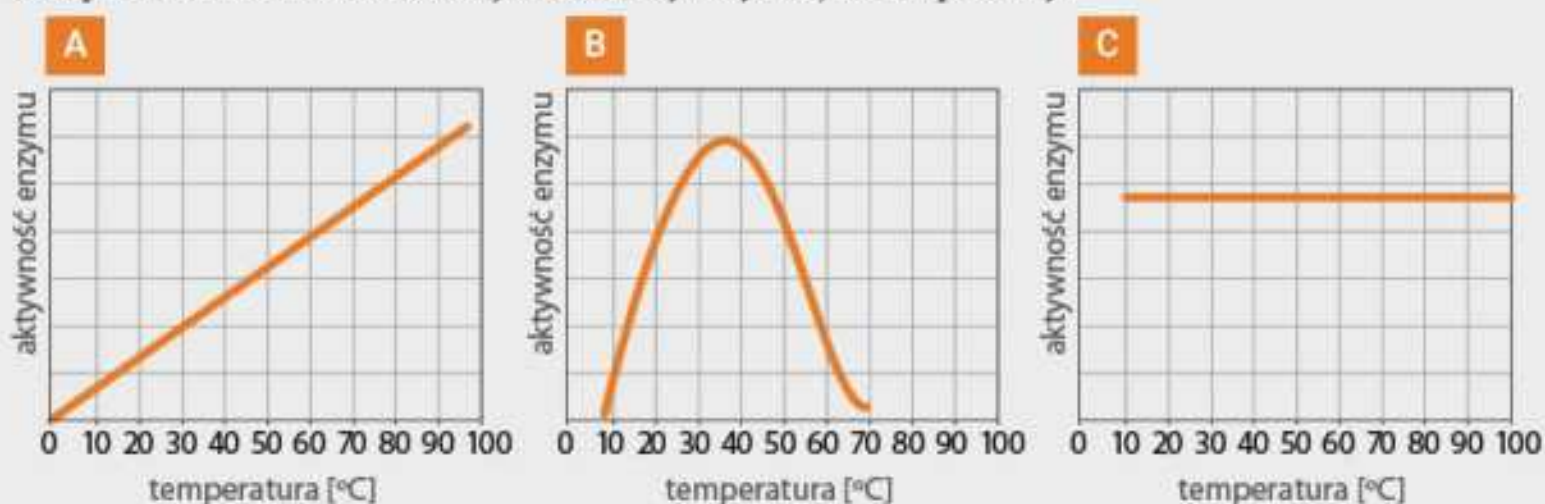
1. (0–1 pkt)

Poniżej wymieniono procesy biochemiczne zachodzące w komórkach organizmów.

Wskaż procesy zachodzące w komórkach organizmu człowieka. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

- A. fermentacja mlekowa
- B. fotosynteza
- C. oddychanie tlenowe
- D. chemosynteza
- E. β -oksydacja kwasów tłuszczowych

2. Jednym z czynników warunkujących aktywność enzymatyczną jest temperatura. Na poniższych wykresach przedstawiono zależność aktywności enzymatycznej od temperatury.



2.1. (0–1 pkt)

Wskaż, który wykres (A–C) przedstawia zależność aktywności enzymatycznej od temperatury w komórkach większości organizmów, w tym organizmu człowieka. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

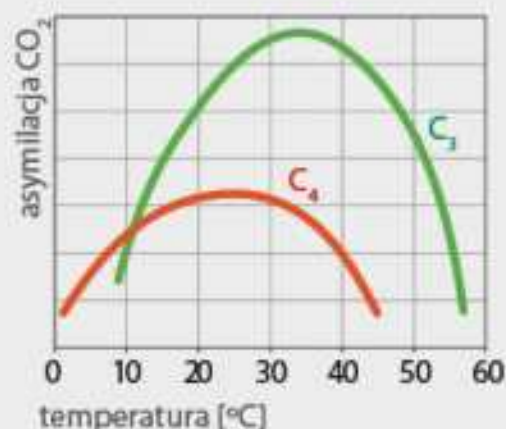
2.2. (0–1 pkt)

Wyjaśnij w zeszycie, dlaczego wysoka gorączka jest stanem zagrażającym życiu.

3. (0–1 pkt)

Wykres przedstawia wpływ temperatury na natężenie fotosyntezy, mierzony jako szybkość asymilacji CO_2 u roślin typu C_3 i C_4 .

W zeszycie sformułuj dwa wnioski wynikające z analizy wykresu.



4. (0–1 pkt)

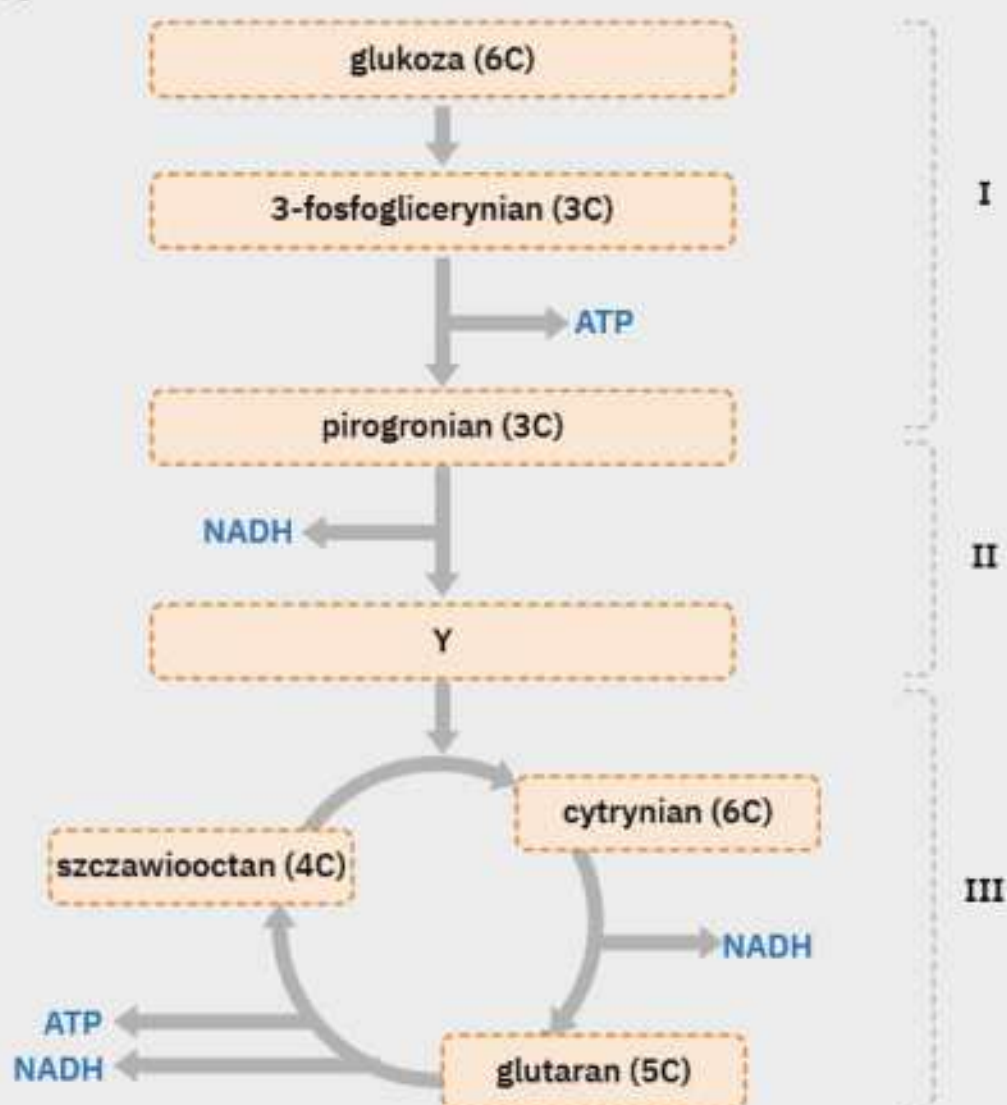
Jednym ze sposobów leczenia na poziomie molekularnym jest zastosowanie inhibitorów enzymów. Przeczytaj poniższy tekst i wykonaj polecenie.

Proteaza HIV-1 to enzym wirusa HIV. W leczeniu zakażenia HIV-1 stosowanych jest kilka inhibitorów tego enzymu. Są to niskocząsteczkowe związki, których budowa została opracowana na podstawie podobieństwa strukturalnego do naturalnych substratów dla tego enzymu. Pierwszym inhibitorem proteazy HIV, który w roku 1995 został zaakceptowany w Stanach Zjednoczonych przez FDA (ang. Food and Drug Administration) był Saquinavir. Według badań prowadzonych na komórkach u osób przewlekle zakażonych HIV, stężeniem wymaganym do zahamowania 50% replikacji wirusa było stężenie od 20 do 500 nM tej substancji.

„Postępy Biochemii” 2017, 63(4), s. 261–269 (skrótowe).

Nazwij i wyjaśnij w zeszycie, na czym polega opisany w tekście rodzaj inhibicji wykorzystanej w hamowaniu aktywności enzymu wirusa HIV.

5. Na poniższym schemacie przedstawiono w uproszczony sposób przebieg pewnego procesu. Po analizie schematu wykonaj polecenia.

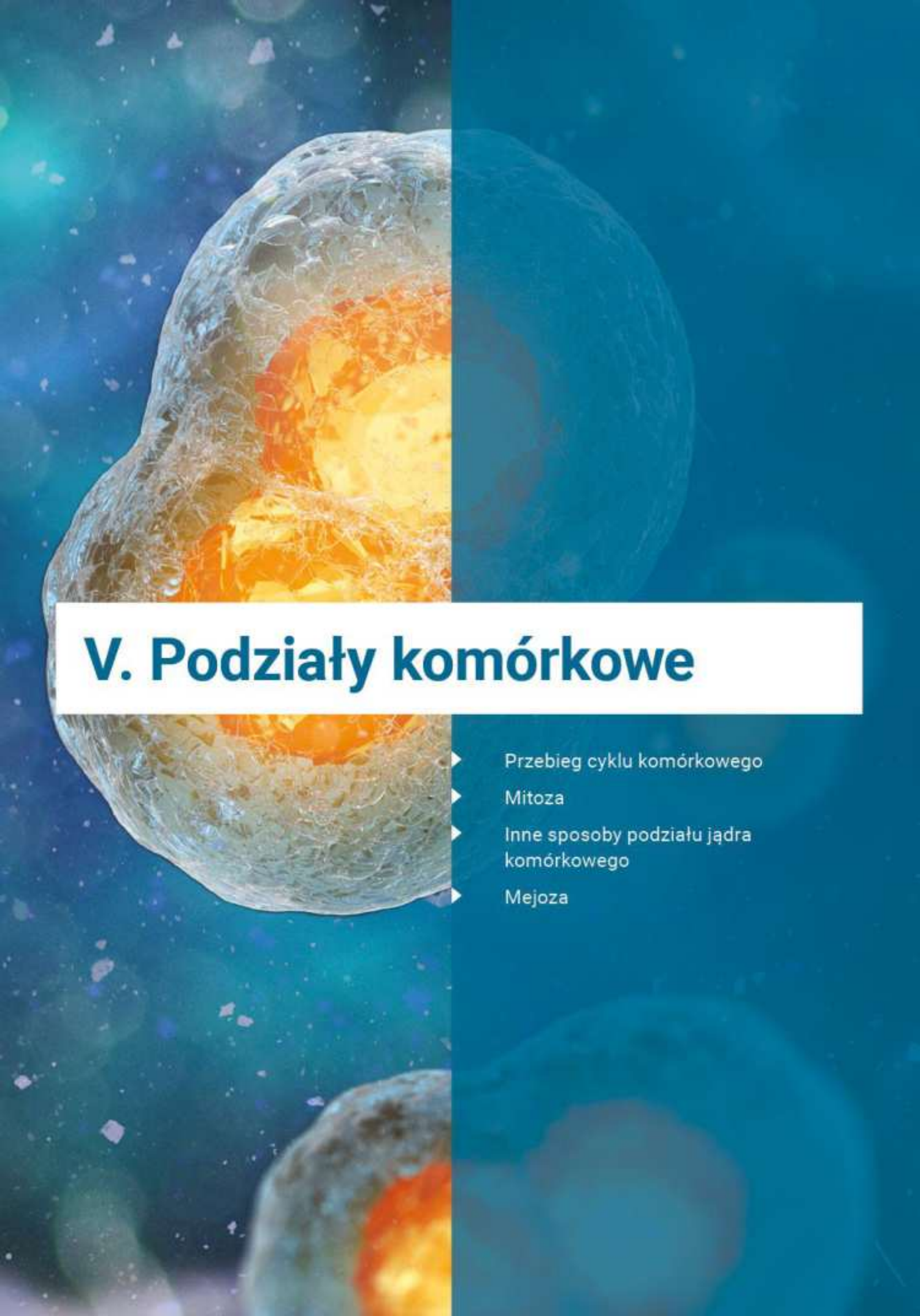


5.1. (0–1 pkt)

Podaj w zeszycie nazwę tego procesu.

5.2. (0–1 pkt)

Wymień w zeszycie etapy procesu zaznaczone cyframi I–III i określ ich lokalizację w komórce.

A microscopic image of a cell, likely a eukaryotic cell, with a prominent, glowing orange nucleus. The cell is surrounded by a blue, textured environment, possibly representing the cytoplasm or extracellular space. The image is split vertically, with the left side showing the cell's internal structure and the right side showing a more uniform blue background.

V. Podziały komórkowe

▶ Przebieg cyklu komórkowego

▶ Mitoza

▶ Inne sposoby podziału jądra komórkowego

▶ Mejoza

1. Przebieg cyklu komórkowego

NA TEJ LEKCJI:

- przeanalizujesz cykl komórkowy;
- poznasz fazy cyklu komórkowego: interfazę i podział komórki.

rodzaje podziałów komórkowych

Każda komórka powstaje w wyniku podziału istniejącej już komórki macierzystej. Podział komórki obejmuje podział jądra komórkowego – **kariokinezę** oraz podział cytoplazmy – **cytokinezę**. W zależności od sposobu podziału jądra komórkowego i jego skutków dla nowo powstałych komórek potomnych wyróżniamy dwa podstawowe **rodzaje podziałów**: mitozę i mejozę, a także stosunkowo rzadziej występującą amitozę (podział bezpośredni) i endomitozę. Podziały te występują w komórkach eukariotycznych. Komórki prokariotyczne dzielą się w wyniku podziału bezpośredniego. Często terminem „mitoza” i „mejoza” określa się cały proces podziału komórki – kariokinezę i cytokinezę.

cykl komórkowy

interfaza

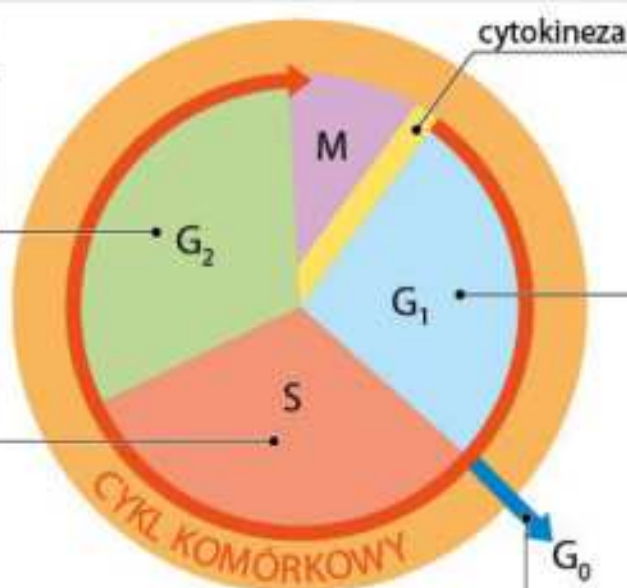
Okres od początku jednego podziału komórki do początku następnego podziału nazywamy **cyklem komórkowym**. W cyklu życiowym komórki wyróżniamy dwa podstawowe etapy: podział komórki oraz procesy jej wzrostu i różnicowania się. Okres między dwoma kolejnymi podziałami to **interfaza**. Jest ona najdłuższą fazą i obejmuje około 70–90% długości całego cyklu komórkowego. Kończy się z chwilą śmierci komórki lub w momencie rozpoczęcia następnego podziału. Podczas tej fazy komór-

Faza G_2

to okres przygotowania komórki do podziału. Podczas tej fazy następuje synteza białek niezbędnych do budowy mikrotubul wrzeciona podziałowego.

Faza S

to etap podwojenia ilości DNA (replikacja) oraz syntezy białek histonowych, które są materiałem budulcowym chromosomów. Po replikacji nić chromatynowa każdego chromosomu zostaje podwojona. Dzięki temu komórka wytwarza kopie wszystkich swoich chromosomów.



Faza G_1

obejmuje okres po zakończeniu podziału komórki. W jej trakcie komórka przygotowuje się do syntezy DNA, odbudowuje białka (synteza białek) wchodzące w skład różnych organelli komórkowych i enzymy niezbędne do replikacji (syntezy) DNA. W fazie tej następuje również wzrost komórki. To najdłuższa faza interfazy, w której zachodzą intensywne procesy metaboliczne.

Faza G_0

część komórek po przejściu fazy G_1 traci zdolność do dzielenia się oraz syntezy kwasu DNA i może w tej fazie funkcjonować od kilku do kilkunastu miesięcy lub znacznie dłużej, aż do uzyskania całkowitego zróżnicowania do pełnienia określonej funkcji. W organizmie człowieka w fazie G_0 (faza spoczynku, gdzie komórki przeprowadzają wszystkie reakcje metaboliczne, ale nie mogą się dzielić) znajduje się szereg komórek, np. limfocyty, komórki wątroby, nerek, ślinianek. Czasami komórki z fazy G_0 mogą powtórnie wrócić do cyklu podziałowego przez wejście do fazy G_1 lub fazy S.

Ryc. V.1.1. Fazy cyklu komórkowego.

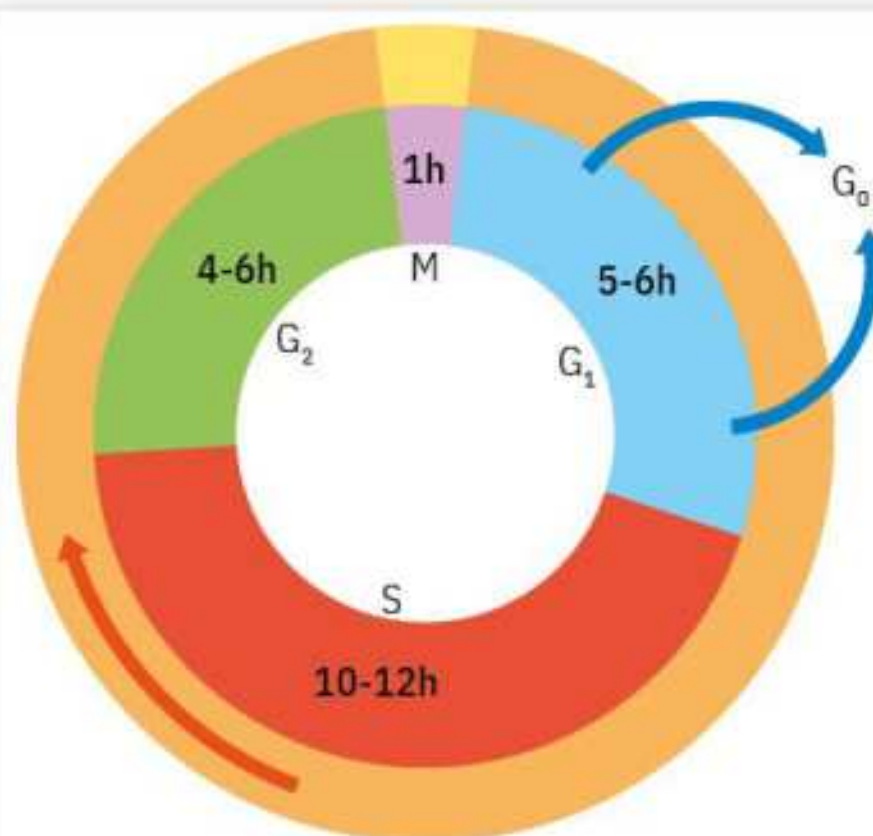
ka rośnie, syntetyzuje potrzebne do podziału substancje, w tym podwaja chromosomy. Interfaza składa się z trzech następujących po sobie faz: G_1 , S i G_2 (**ryc. V.1.1.**).

Po zakończeniu interfazy komórka przechodzi do **fazy M**, na którą składa się mitoza i cytokineza. Czynnikiem pobudzającym ten proces jest zmiana stężenia białek cyklin, które decydują o przebiegu cyklu komórkowego. ◀ faza M

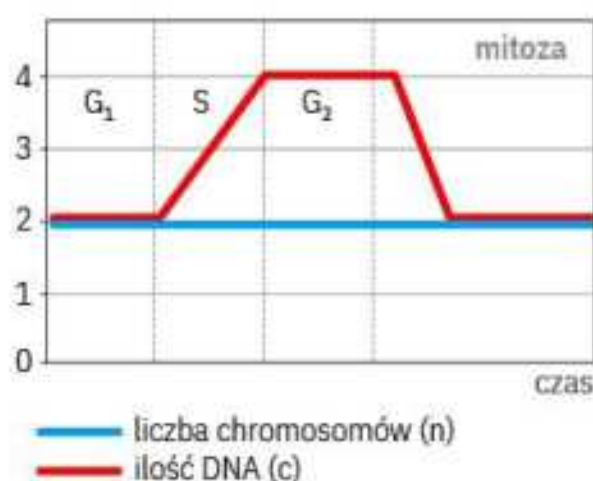
Czas trwania cyklu komórkowego zależy od rodzaju komórki i funkcji, jaką spełnia w organizmie. Długość cyklu komórkowego dla większości komórek roślinnych i zwierzęcych wynosi od 8 do 24 godzin, natomiast u bakterii trwa zaledwie około 30 minut. W komórkach tkanek embrionalnych, które stale się dzielą, jest bardzo krótki – trwa nawet do kilku minut. Komórki, które są zróżnicowane, nie dzielą się tak intensywnie, mają wydłużony cykl komórkowy, np. cykl życiowy komórek wątroby zamyka się w ciągu roku.

Po podziale komórka może przejść w fazę różnicowania się w określony rodzaj tkanki, może zastępować stare komórki nowymi, może dalej się dzielić lub przejść w fazę G_0 , czyli spoczynku. Cykl komórkowy komórki ludzkiej może się zamknąć w 24 godzinach (**ryc. V.1.2.**).

W komórce diploidalnej przed rozpoczęciem podziału komórkowego ilość DNA jest określana jako $2c$. Podczas podziału komórkowego DNA ulega syntezie (replikacji), jego ilość zwiększa się do $4c$, a następnie rozdziela się do dwóch komórek potomnych. Efektem tych zmian jest taka sama ilość DNA w każdej z komórek potomnych, co w komórce macierzystej przed jej podziałem (**ryc. V.1.3.**).



Ryc. V.1.2. Czas trwania cyklu komórkowego komórki ludzkiej.



W **fazie G_1** ilość DNA w komórce diploidalnej ($2n$ liczba chromosomów) wynosi $2c$.

Podczas **fazy S** następuje podwojenie (replikacja) DNA i w efekcie jego ilość wzrasta z $2c$ do $4c$, a nie zmienia się liczba chromosomów.

Taka ilość DNA utrzymuje się przez całą **fazę G_2** .

Podczas **fazy M** (mitozy) następuje podział komórki i każda z dwóch komórek potomnych otrzymuje połowę podwojonej ilości DNA podczas fazy S.

Po podziale komórki potomne mają taką samą ilość DNA, jak komórka macierzysta ($2c$).

Ryc. V.1.3. Zmiany ilości materiału genetycznego w dzielącej się mitotycznie komórce diploidalnej.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

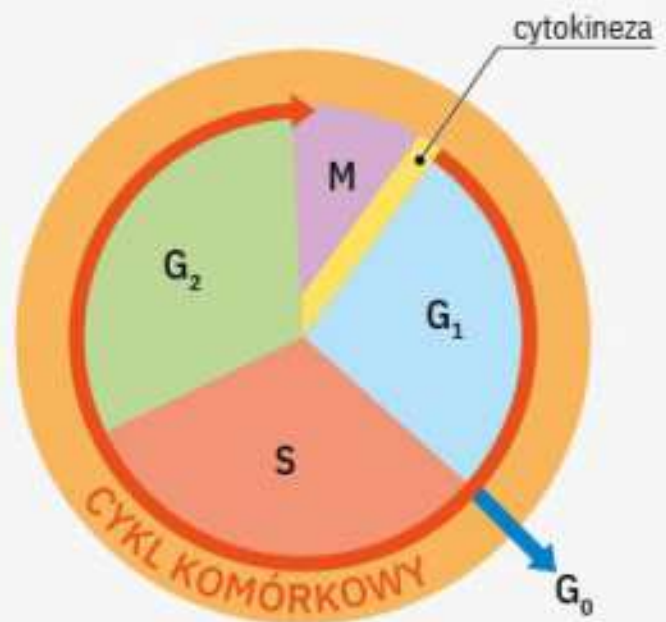
1. Uzasadnij, że interfaza jest niezbędnym etapem cyklu komórkowego.
2. Porównaj w tabeli narysowanej w zeszycie etapy interfazy z uwzględnieniem ilości chromosomów w każdym z nich.
3. Wskaż, jakie zmiany może przechodzić komórka bezpośrednio po podziale.
4. Wykaż, że rozmnażanie płciowe i bezpłciowe się różnią.
5. Każda komórka powstaje w wyniku podziału istniejącej już komórki macierzystej.

Okres od początku jednego podziału komórki do początku następnego podziału nazywamy cyklem komórkowym. W cyklu życiowym komórki wyróżniamy dwa podstawowe etapy: podział komórki i procesy jej wzrostu i różnicowania się. Okres między dwoma kolejnymi podziałami nazywamy interfazą. Interfaza jest najdłuższą fazą i kończy się z chwilą śmierci komórki lub w momencie rozpoczęcia następnego podziału.

Na rysunku przedstawiono cykl życiowy komórki z zaznaczonymi etapami interfazy.

5.1. Wskaż fazę, która stanowi podstawowy warunek do rozpoczęcia podziału komórkowego. Omów zmiany, które występują w tej fazie.

5.2. Wyjaśnij, jakie znaczenie w cyklu komórkowym ma faza G_1 i G_2 .



6. Część komórek po przejściu fazy G_1 interfazy cyklu komórkowego traci zdolność do dzielenia się i może w tej fazie funkcjonować od kilku do kilkunastu miesięcy lub znacznie dłużej, aż do uzyskania całkowitego zróżnicowania do pełnienia określonej funkcji. Niektóre komórki mogą ponownie wrócić do podziałów – do fazy G_1 lub S.

Wyjaśnij, jakie znaczenie dla organizmu ma powrót komórek do zdolności podziałów.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 248 ▶ Wyróżniamy dwa podstawowe **rodzaje podziałów w komórkach** eukariotycznych: mitozę i mejozę – komórki prokariotyczne dzielą się w wyniku podziału bezpośredniego.
- s. 248 ▶ **Cykl komórkowy obejmuje dwie fazy:** fazę wzrostu komórki – interfazę i procesy podziału komórki – fazę M.
- s. 248 ▶ **Interfaza** obejmuje trzy etapy: G_1 , S, G_2 . Podczas fazy S następuje podwojenie materiału genetycznego, czyli replikacja DNA. Czasami komórka traci zdolność do dalszych podziałów i przechodzi z fazy G_1 do fazy G_0 .
- s. 249 ▶ **Faza M** składa się z podziału jądra komórkowego (kariokinezy) i podziału cytoplazmy (cytokinezy).

2. Mitoza

NA TEJ LEKCJI:

- przeanalizujesz przebieg mitozy;
- poznasz znaczenie mitozy.

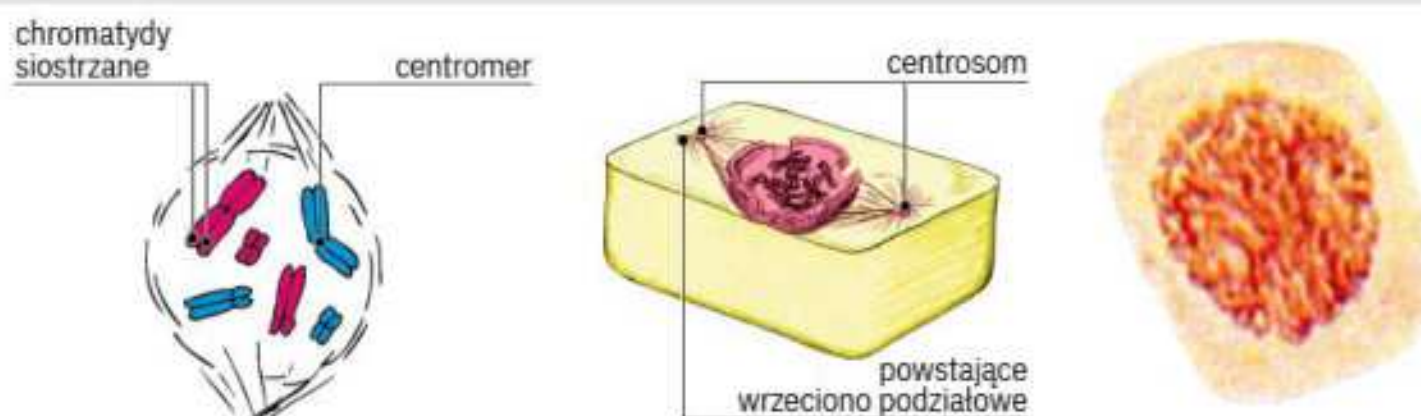
Mitoza jest częścią cyklu komórkowego, podczas którego **powstają dwie nowe komórki** o takim samym materiale genetycznym, jak komórka macierzysta. Mitoza zachodzi w komórkach somatycznych zwierząt (wszystkich komórkach ciała z wyjątkiem komórek płciowych) oraz w komórkach somatycznych i generatywnych roślin – komórki biorące udział w rozmnażaniu płciowym (w przeciwieństwie do komórki somatycznej – wegetatywnej). Termin odnosi się zarówno do pierwotnych komórek płciowych, jak i gamet. U roślin nasiennych komórka generatywna powstaje w ziarnie pyłku. Ulega ona podziałowi mitotycznemu, po którym powstają dwa jądra plemnikowe (gamety męskie), które biorą udział w procesie zapłodnienia. W jego przebiegu wyróżnia się następujące po sobie **fazy**: profazę, metafazę, anafazę i telofazę. Fazy te zachodzą płynnie i dzięki temu proces ma charakter ciągły.

◀ efekt podziału mitotycznego

◀ fazy mitozy

Przebieg mitozy przedstawiono dla komórki macierzystej, w której występowało $2n = 6$ chromosomów.

■ Profaza

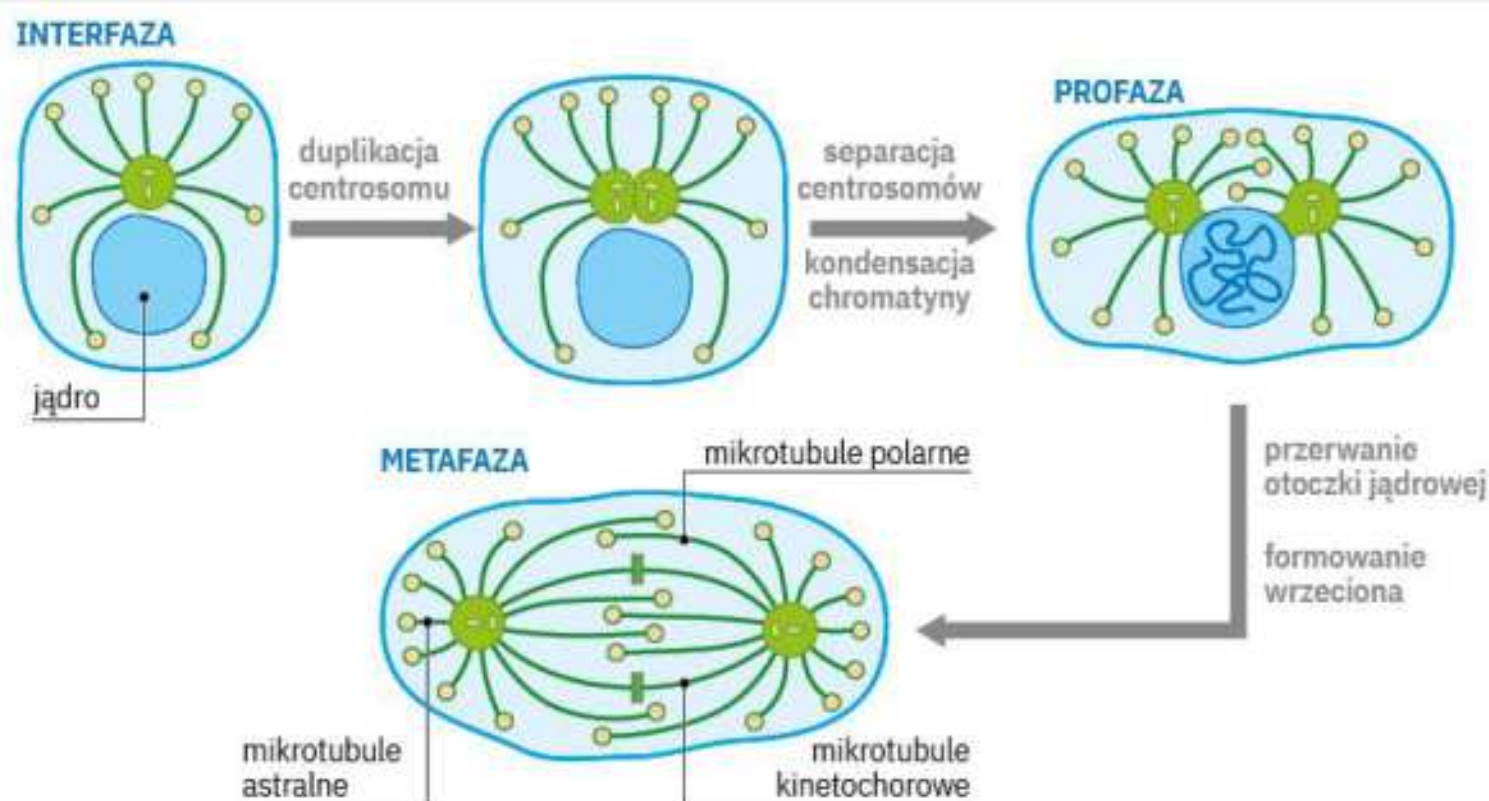


Ryc. V.2.1. Profaza.

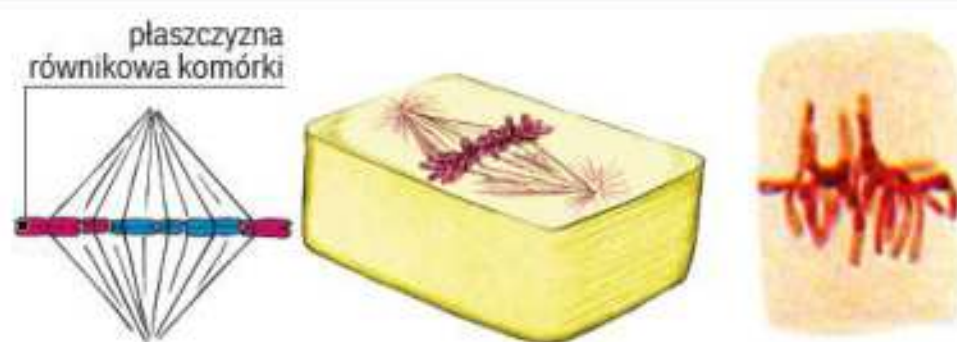
Podczas profazy (**ryc. V.2.1.**) następuje zanikanie otoczki jądrowej i jąderka. Długie nici chromatyny ulegają kondensacji (zagęszczeniu) i spiralizacji (skręceniu). Prowadzi to do uformowania się chromosomów. Każdy chromosom jest zbudowany z dwóch chromatyd (zwanych chromatydami siostrzanymi), a każda z nich ma jedną z dwóch powstałych po syntezie cząsteczek DNA. Chromatidy są połączone centromerem (przewężeniem pierwotnym).

Następnie chromosomy ulegają skróceniu, a tym samym grubieją. W komórkach eukariotycznych następuje formowanie się wrzeciona podziałowego. Sposób jego powstania jest różny dla komórek roślinnych i zwierzęcych. Miejscem powstania

wrzeciona u zwierząt jest centrosom, rejon komórki znajdujący się w pobliżu jądra komórkowego, składający się z dwóch centrioli (**ryc. V.2.2.**). Podczas interfazy (faza G_2) centrosom dzieli się na dwa, a tym samym podwaja się również liczba dwóch centrioli do czterech. W trakcie profazy centrosomy zaczynają wędrować do biegunów komórki, a między nimi odkładają się mikrotubule (z rejonu centrioli), które tworzą wrzeciono podziałowe (tzw. wrzeciono kariokinetyczne) ułatwiające wędrówkę chromosomów podczas dalszych etapów podziału komórkowego. Pod koniec profazy centrosomy znajdują się już na dwóch przeciwległych biegunach komórki i są otoczone krótkimi, rozchodzącymi się promieniami mikrotubulami tworzącymi astrosferę (**ryc. V.2.2.**).



Ryc. V.2.2. Schemat formowania się wrzeciona podziałowego. Wrzeciono podziałowe zbudowane jest z centrosomów, mikrotubul wrzeciona: kinetochorowych i polarnych oraz mikrotubul tworzących astrosferę. Mikrotubule kinetochorowe łączą bieguny komórki z kinetochorem chromosomu (strukturą położoną w centromerze, zbudowaną z białka i fragmentu DNA chromosomowego) podczas metafazy. Mikrotubule polarne (inaczej biegunowe) rozciągają się od biegunów komórki do płaszczyzny równikowej wrzeciona kariokinetycznego, w której zachodzą na siebie. Dzięki promieniście rozmieszczonym wokół biegunów komórki mikrotubulom astralnym nowo powstała komórka potomna ma parę centrioli (z wyjątkiem komórek roślinnych).



Ryc. V.2.3. Metafaza.

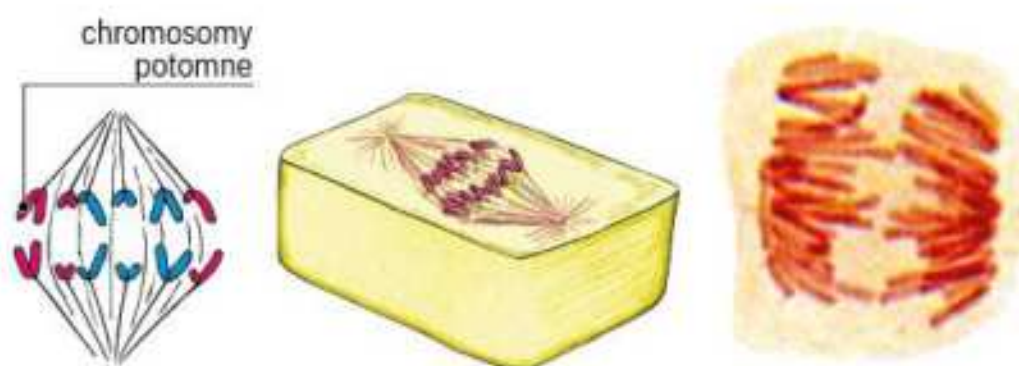
■ Metafaza

Metafaza jest najdłuższą fazą mitozy i trwa około 20 minut. Podczas metafazy chromosomy łączą się z mikrotubulami wrzeciona podziałowego za pomocą kinetochorów umieszczonych w przewężeniu pierwotnym (centromerze)

(**ryc. V.2.3.**). Każda z chromatyd siostrzanych ma właściwy dla siebie kinetochor. Kinetochory chromatyd siostrzanych łączą się z mikrotubulami dwóch centrosomów komórki leżących na dwóch przeciwległych biegunach. W wyniku ciągłego skracania się i wydłużania mikrotubul chromosomy stale wędrują, aż do ustawienia się w płaszczyźnie równikowej komórki, tworząc tzw. płytkę metafazalną. Podczas metafazy chromosomy osiągają największy poziom zagęszczenia – są najgrubsze i najkrótsze. Pozwala to na obserwacje wybarwionych chromosomów metafazowych pod mikroskopem optycznym.

■ **Anafaza**

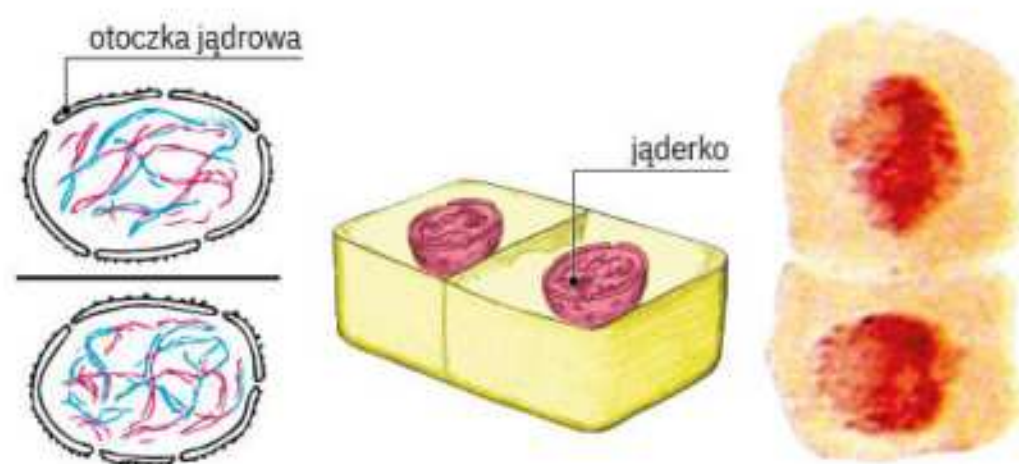
Anafaza, najkrótsza faza mitozy (trwa przeciętnie około kilku minut), rozpoczyna się od rozkładu białek łączących chromatydy siostrzane w chromosomie (**ryc. V.2.4.**). W wyniku tego procesu pękają centromery i chromatydy siostrzane zaczynają się od siebie oddzielać. Mikrotubule kinetochorowe wrzeciona podziałowego skracają się i w efekcie przyciągają chromatydy siostrzane do przeciwległych biegunów komórki. Wędrujące chromatydy stają się chromosomami potomnymi. Podczas późnej anafazy chromosomy potomne gromadzą się wokół dwóch biegunów komórki i tworzą dwa jednakowe zestawy chromosomów. Jednocześnie następuje wydłużanie się mikrotubul niekinetochorowych, co wydłuża całą komórkę.



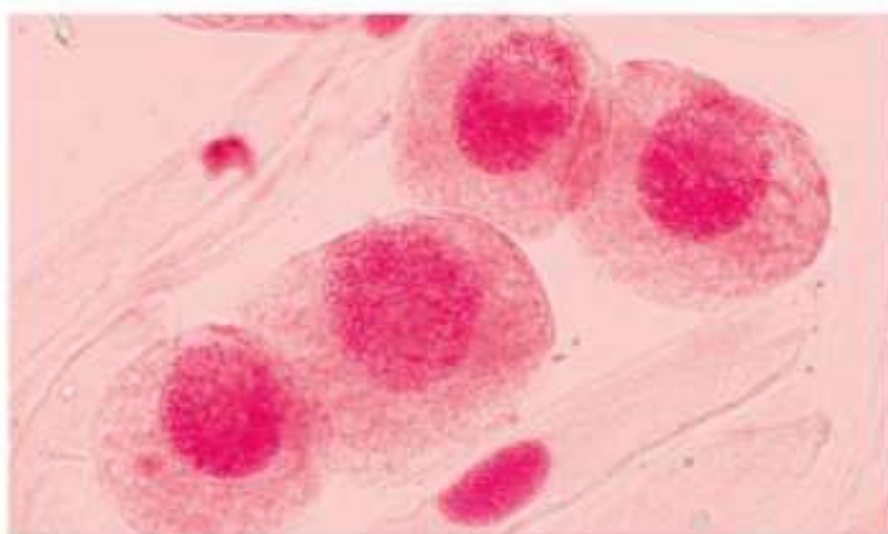
Ryc. V.2.4. Anafaza.

■ **Telofaza**

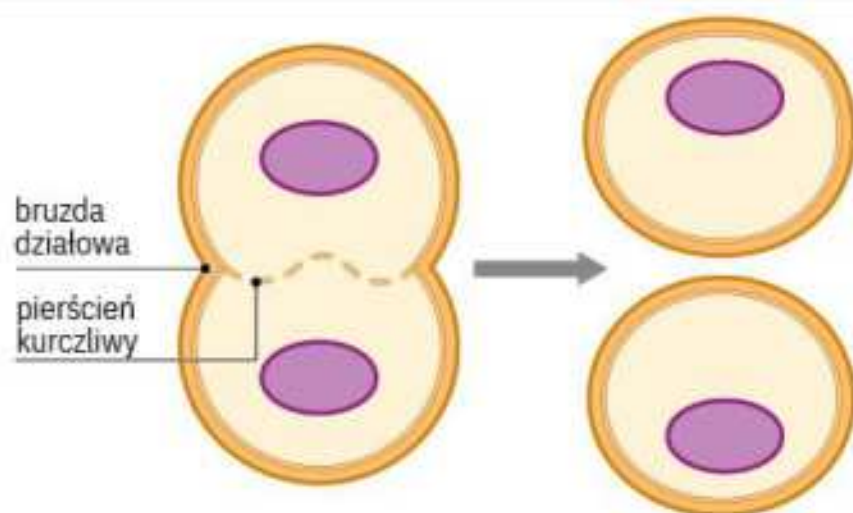
Podczas telofazy na biegunach komórki wokół zespołu chromosomów potomnych tworzą się nowe otoczki jądrowe (**ryc. V.2.5.**). Powstają one z fragmentów pierwotnej otoczki jądrowej komórki macierzystej oraz z błon wewnątrzkomórkowych. Chromosomy potomne ulegają despiralizacji (rozkręceniu) i dekondensacji (mniejszemu zagęszczeniu), przyjmując postać włókien chromatynowych. Podczas telofazy zanika wrzeciono podziałowe i zostają odtworzone jąderka. W momencie powstania dwóch jąder potomnych następuje zakończenie mitozy.



Ryc. V.2.5. Telofaza.



Ryc. V.2.6. Cytokineza (mikrofotografia).



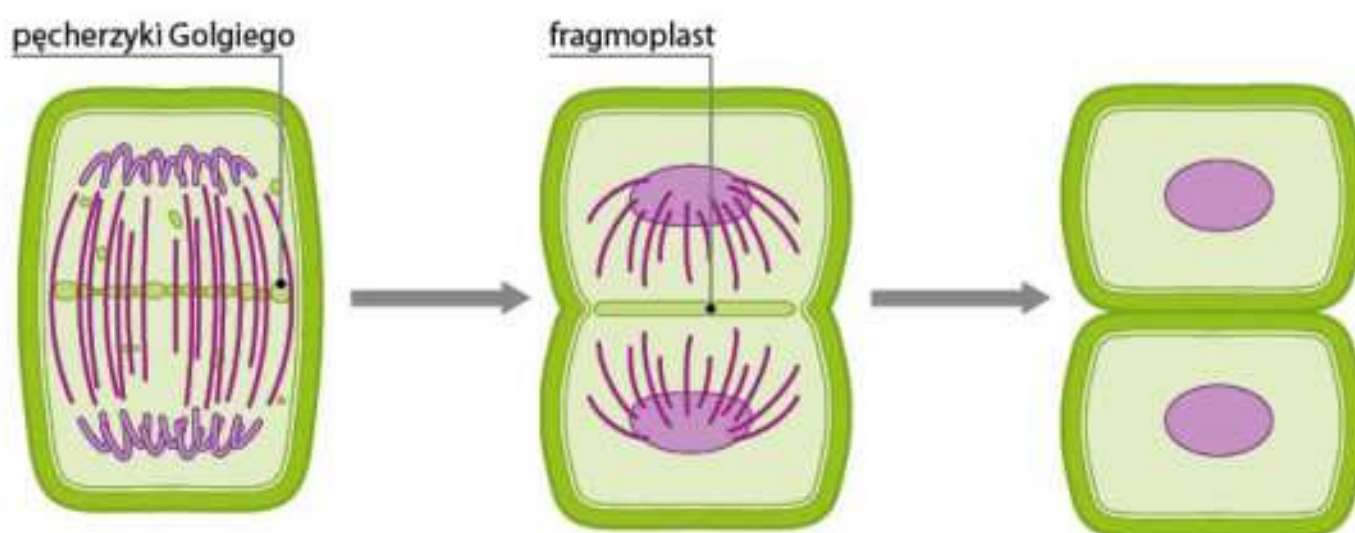
Ryc. V.2.7. Schemat przebiegu cytokinezy w komórce zwierzęcej.

Podział cytoplazmy oraz organelli i struktur w niej rozmieszczonych, czyli cytokineza, następuje już podczas anafazy lub późnej telofazy. Przebieg tego procesu jest różny w komórkach roślinnych i zwierzęcych.

W komórkach zwierzęcych w poprzek płaszczyzny równikowej wrzeczona podziałowego (w płytce metafazowej) powstaje pierścień kurczliwy, zbudowany z mikrofilamentów aktyny połączonych z cząsteczkami miozyny (**ryc. V.2.7.**).

W wyniku skurczu pierścienia podziałowego następuje pogłębiające się rozdzielanie cytoplazmy i utworzenie bruzdy podziałowej. Bruzda podziałowa stopniowo się pogłębia i ostatecznie prowadzi do całkowitego rozdzielania cytoplazmy pomiędzy dwie komórki potomne.

W komórkach roślinnych nie powstaje bruzda podziałowa i proces cytokinezy zachodzi w odmienny sposób ze względu na obecność ściany komórkowej (**ryc. V.2.8.**).



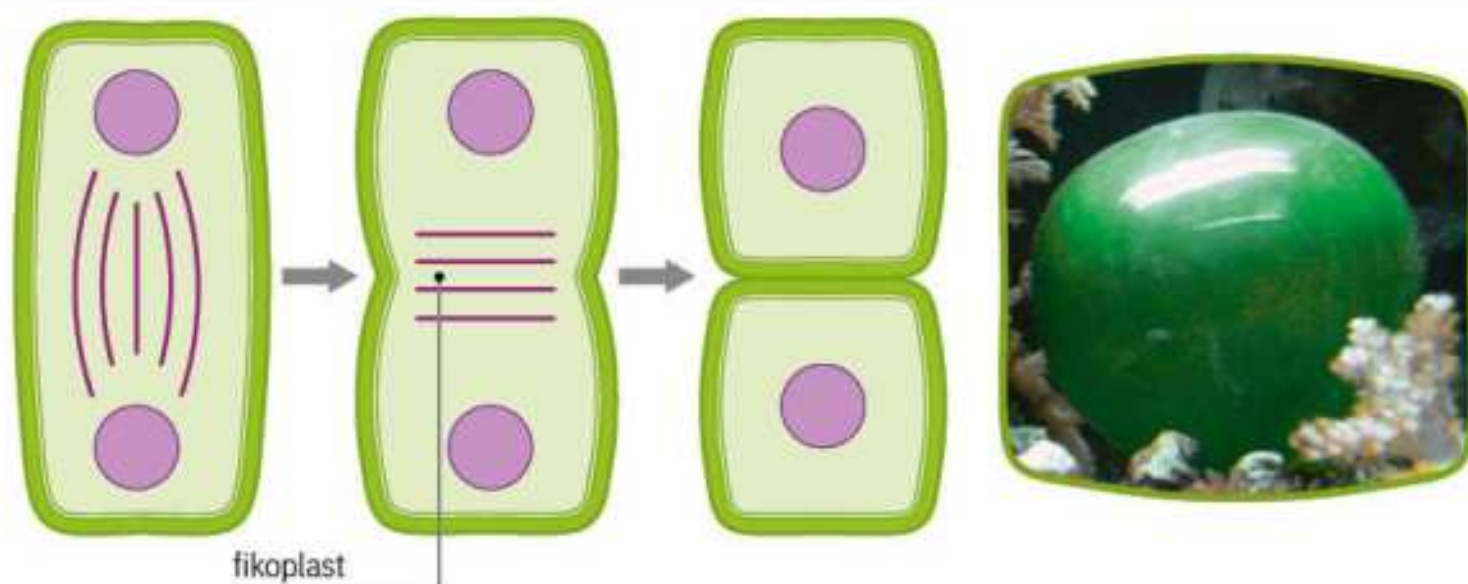
Ryc. V.2.8. Schemat przebiegu cytokinezy w komórce roślinnej.

Cytoplazma nie rozdziela się w wyniku działania pierścienia kurczliwego, ale na skutek powstania ściany komórkowej wewnątrz komórki. W płaszczyźnie równiko-

wej wrzeciona podziałowego tworzy się fragmoplast. Struktura ta jest zbudowana z mikrotubul biegunowych wrzeciona podziałowego. W płaszczyźnie równikowej fragmoplastu gromadzą się pęcherzyki transportujące z aparatu Golgiego substancje do budowy ściany komórkowej. Pęcherzyki te łączą się z kolejnymi, tworząc strukturę w kształcie dysku, która stale się powiększa, aż do momentu, kiedy dotrze do błony komórkowej i pierwotnej ściany komórkowej. Wówczas komórka zostaje rozdzielona na dwie części.

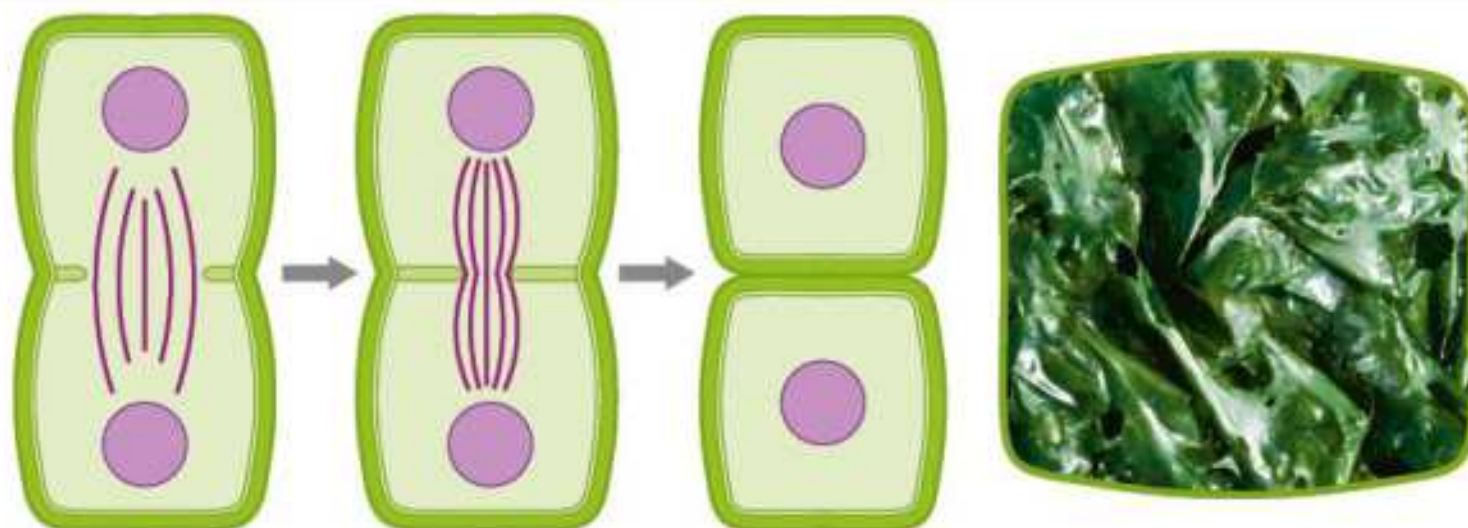
Zróżnicowanie cytokinezy obserwuje się u zielenic. Wyróżniono u nich trzy typy cytokinezy: cytokineza u zielenic

1. U zielenic właściwych w miejscu wrzeciona kariokinetycznego, które zanika, w płaszczyźnie równikowej powstaje struktura zbudowana z mikrotubul – tzw. fikoplast. Między mikrotubulami fikoplastu tworzy się ściana komórkowa.



Ryc. V.2.9. Przebieg cytokinezy u zielenic właściwych.

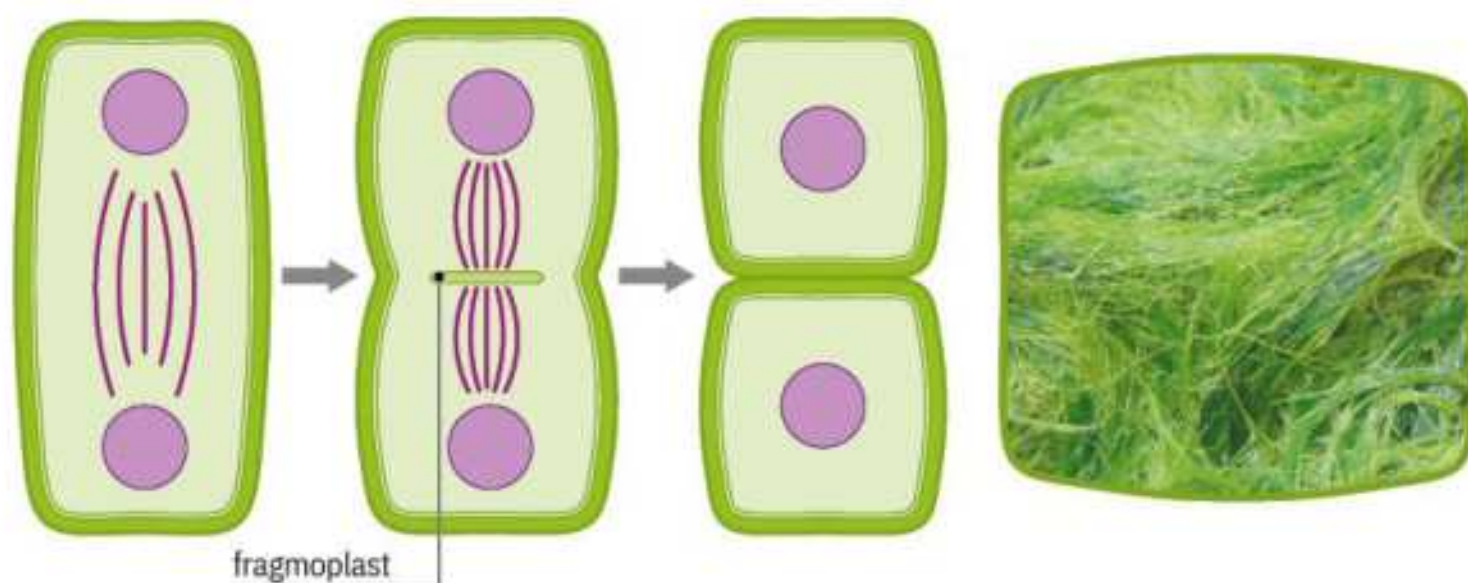
2. U zielenic watkowych wrzeciono kariokinetyczne pozostaje, a nowa ściana komórkowa powstaje w wyniku odkładania się od ścian bocznych w kierunku środka komórki.



Ryc. V.2.10. Przebieg cytokinezy u zielenic watkowych.



3. U zielenic ramienicowych wrzeciono kariokinetyczne przekształca się we **fragmoplast**, do którego mikrotubul zostaje prostopadle dobudowana ściana komórkowa.



Ryc. V.2.11. Przebieg cytokinezy u zielenic ramienicowych.

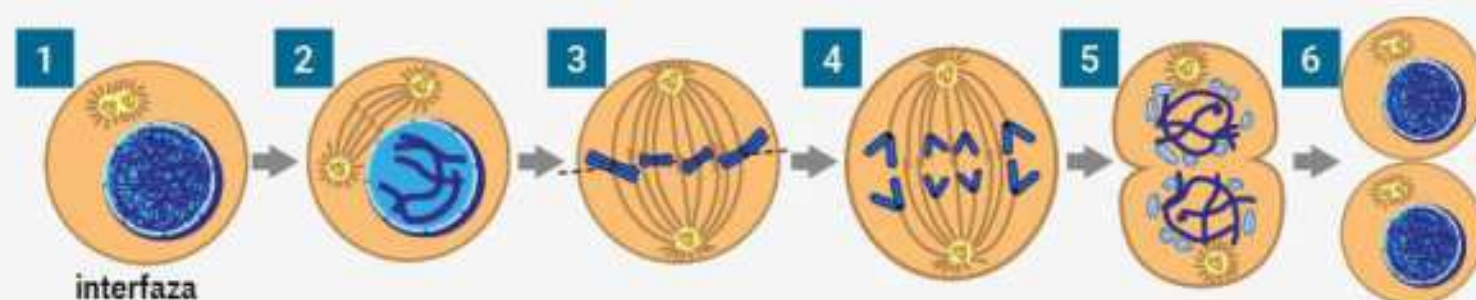
Cytokineza charakterystyczna dla zielenic ramienicowych z wykształceniem **fragmoplastu** prawdopodobnie dała początek cytokinezie roślin lądowych.

Komórki potomne powstałe w wyniku mitozy mają identyczny materiał genetyczny, jak komórka macierzysta. Zwiększenie liczby takich samych komórek umożliwia wzrost i rozwój organizmu. Dzięki mitozie jest możliwa regeneracja komórek uszkodzonych i zużytych, np. komórek nabłonka. Mitoza pozwala także na odbudowę tkanek czy całych organów, np. odrzuconego w mechanizmie autotomii ogona u jaszczurek. Mitoza umożliwia również rozmnażanie bezpłciowe wielu gatunków roślin i zwierząt, które tworzą zespoły identycznych genetycznie organizmów, czyli klony.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Wytlumacz, w jaki sposób zmienia się ilość DNA podczas interfazy i omów znaczenie tego procesu dla mitozy. Odpowiedź zapisz w zeszycie.
2. Uzasadnij w zeszycie potrzebę podwajania materiału genetycznego podczas interfazy przed rozpoczęciem mitozy.
3. Wyjaśnij w zeszycie terminy: *komórka haploidalna*, *komórka diploidalna*.
4. W diploidalnej komórce zwierzęcej znajduje się 10 chromosomów. Oblicz w zeszycie:
 - a) ile chromosomów powinno powstać po zakończeniu mitozy;
 - b) ile chromatyd ułoży się w płaszczyźnie równikowej wrzeciona podziałowego.

5. Rysunek przedstawia poszczególne etapy podziału mitotycznego.



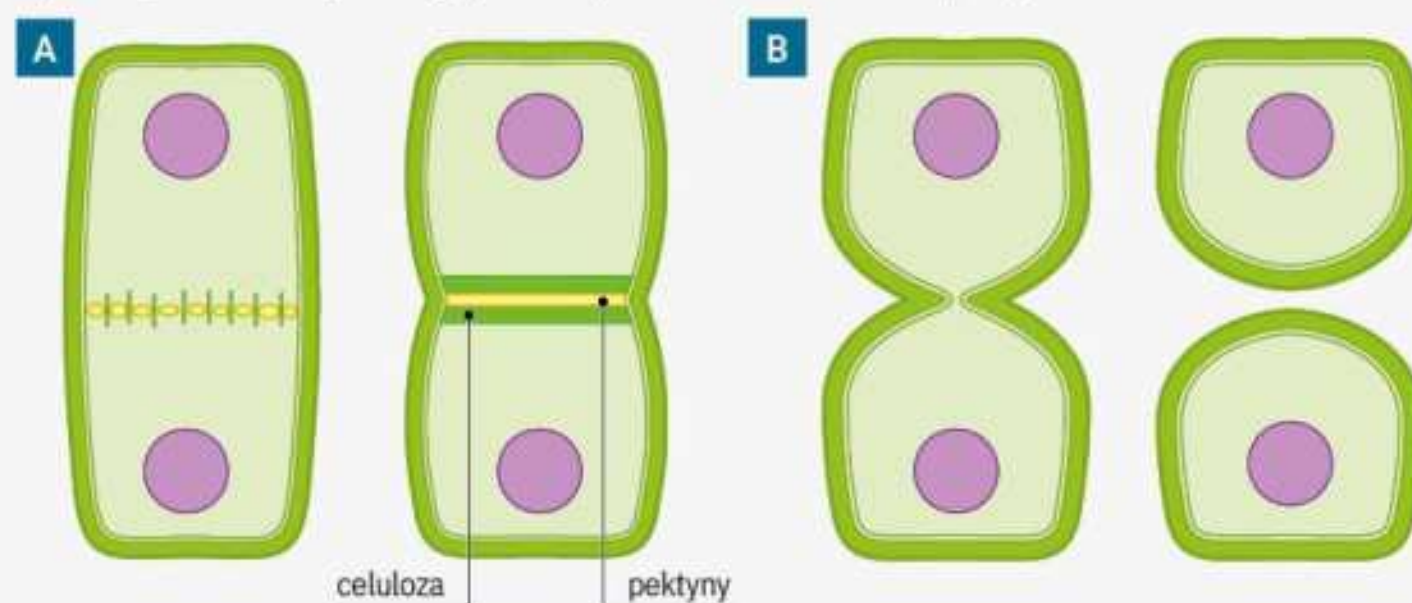
interfaza

5.1. Wskaż rysunek przedstawiający fazę, w której powstaje wrzeciono podziałowe. Omów krótko jego funkcje.

5.2. Wskaż rysunek przedstawiający cytokinę. Wyjaśnij znaczenie tego procesu.

6. Cytokineza jest procesem, podczas którego następuje rozdzielenie cytoplazmy na dwie części. Rozpoczyna się już w anafazie. Jej przebieg jest różny w komórkach roślinnych i zwierzęcych.

Rysunek przedstawia przebieg cytokinezy w komórkach eukariotycznych.



6.1. Wskaż schemat przedstawiający cytokinę w komórkach zwierzęcych.

6.2. Wyjaśnij różnicę w przebiegu cytokinezy w komórkach roślinnych i zwierzęcych.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- W przebiegu podziału mitotycznego wyróżniamy następujące **fazy**: profazę, metafazę, anafazę i telofazę. ◀ s. 251
- W wyniku podziału mitotycznego z jednej komórki macierzystej powstają dwie komórki potomne o takiej samej liczbie chromosomów, co komórka macierzysta. Podział ten prowadzi do wzrostu organizmu i zwiększenia liczby komórek. ◀ s. 251
- **Cytokineza** zachodzi w odmienny sposób w komórkach roślin i zwierząt. W komórkach zwierząt cytoplazma dzieli się przez stopniowe przewężenie, a w komórkach roślin – za pomocą struktury zwanej fragmoplastem. ◀ s. 254
- U zielenic cytokineza zachodzi na trzy różne sposoby, co dało początek cytokinezie u roślin lądowych. ◀ s. 255

3. Inne sposoby podziału jądra komórkowego

NA TEJ LEKCJI:

- dowiesz się, jak przebiega amitoza;
- poznasz program śmierci komórki;
- poznasz niekontrolowane podziały komórkowe.

amitoza ► ■ **Amitoza**

Amitoza jest bezpośrednim podziałem jądra komórkowego bez wyodrębniania chromosomów i replikacji (syntezy) DNA. Podział ten zachodzi dość rzadko. Jądro komórkowe dzieli się przez przewężenie, dając dwie części, często o niejednakowej ilości chromatyny. W podziale tym nie zanika otoczka jądrowa ani nie powstaje wrzeciono podziałowe. Często podziałowi amitotycznemu nie towarzyszy podział cytoplazmy, czyli cytokineza, co może prowadzić do powstania komórki dwujądrowej. Amitoza występuje w makronukleusie (drugim – obok małego mikronukleusa – jądrze o funkcjach wegetatywnych) u pantofelka, w bielmie roślin kwiatowych, a u zwierząt – w komórkach wątroby, mięśnia sercowego, szyszynki i w niektórych komórkach nerwowych. Amitoza jest także objawem starzenia się i degeneracji komórek, które tracą swoją zdolność do podziału mitotycznego.

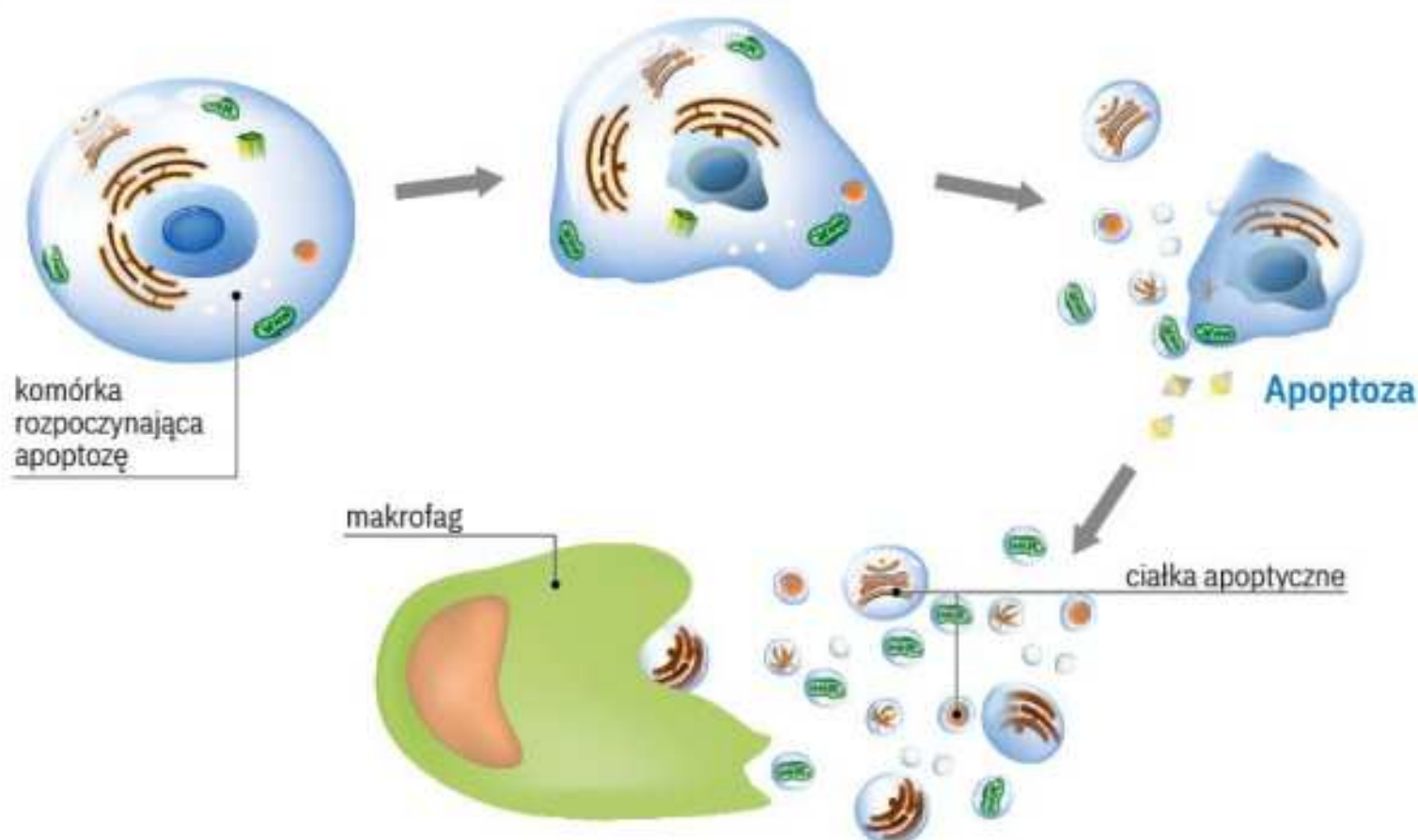
Rzadko występującym podziałem jest endomitoza, czyli podział chromosomów bez podziału jądra komórkowego i komórki. W wyniku endomitozy powstają komórki ze zwiększonym zespołem chromosomów. Endomitoza może prowadzić do powstania tzw. chromosomów olbrzymich (inaczej politenicznych), które występują w gruczołach ślinowych muszki owocowej *Drosophila melanogaster* (czytaj: drozofila melanogaster).

program śmierci komórki ► ■ **Program śmierci komórki**

Komórki różnią się zdolnością do podziałów. Komórki nerwowe i mięśniowe w momencie, gdy po podziałach powstała ich właściwa ilość, zaczynają się różnicować. Starzenie się takich komórek następuje wraz z wiekiem całego organizmu lub na skutek działania przypadkowych czynników. Podobny proces zachodzi w komórkach o nieznacznej zdolności do stałych podziałów i odtwarzania, takich jak komórki wątroby, nerek czy trzustki.

Komórki, które rozpoczynają proces różnicowania się, mają swój czas życia zapisany genetycznie. Śmierć tych komórek jest najczęściej wynikiem nieprawidłowości zachodzących podczas tego procesu, a nie wynika z ich wieku. Natomiast komórki macierzyste, które stale się dzielą, mogą być uszkodzone przez przypadkowe czynniki, co objawia się wydłużeniem podziału mitotycznego. Skutkiem tego jest zwolnienie tempa podziałów komórkowych i liczby nowych komórek.

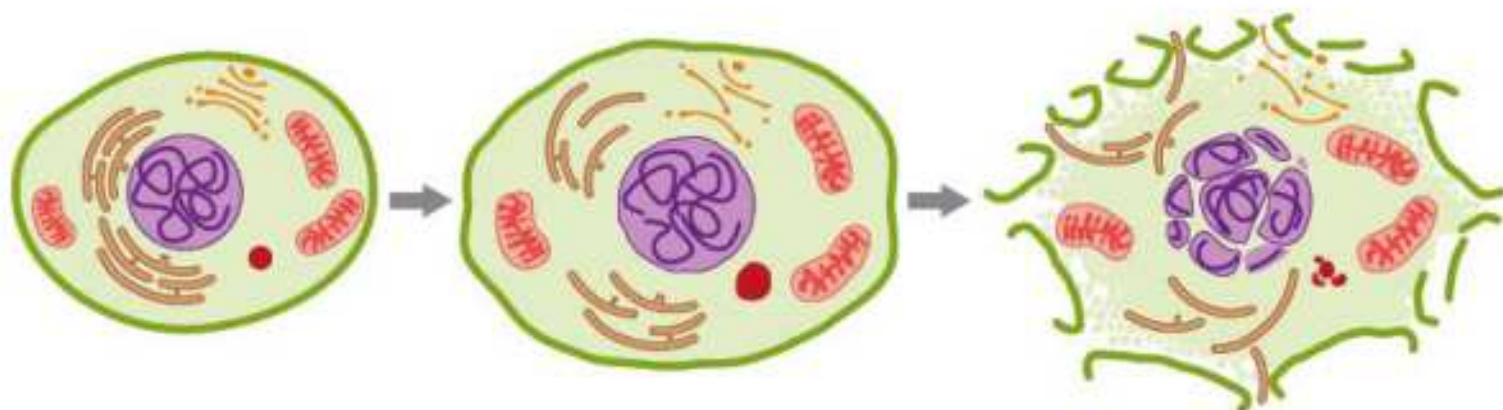
Liczba komórek w organizmie wielokomórkowym jest regulowana przez intensywność dwóch procesów: podziałów komórkowych i śmierci komórki. Komórki uszkodzone, zarażone (np. toksynami bakteryjnymi) czy stare, zużyte lub zbędne w organizmie są usuwane w procesie programowanej śmierci komórki zwanym **apoptozą** (program kontrolowanego samobójstwa, z gr. „opadanie liści z drzew”). Podczas tego procesu komórka traci wodę i kurczy się, a wewnątrzkomórkowe struktury nie zostają uwalniane poza komórkę. Nie powstaje stan zapalny jako odpowiedź organizmu (**ryc. V.3.1.**).



Ryc. V.3.1. Schemat procesu apoptozy. Następuje rozpad cytoszkieletu i zagęszczenie cytoplazmy. W wyniku rozpadu otoczki jądrowej DNA jądrowy zostaje rozcięty przez endonukleazy (enzymy rozkładające kwasy nukleinowe) na mniejsze fragmenty. Z błony komórkowej powstają pęcherzyki, tzw. ciała apoptyczne, w które zostają „zapakowane” niezmiennione organelle komórkowe i części chromatyny. Ciała apoptyczne zostają fagocytowane przez komórki żerne (makrofagi).

Apoptoza jest procesem niezbędnym dla prawidłowego rozwoju układu nerwowego i odpornościowego, a także dla właściwego wykształcenia dłoni i stóp u ludzi (również łap u innych ssaków). Brak apoptozy może prowadzić do powstania chorób nowotworowych. ◀ apoptoza

Do śmierci komórki prowadzi także **nekroza** (martwica, śmierć bierna). Zachodzi ona w miejscach uszkodzonych organizmu na skutek np. działania patogenów u roślin czy nieprawidłowego odżywiania tkanek przez krew u zwierząt. Podczas nekrozy następuje zaburzenie równowagi osmotycznej komórki. Komórka jednocześnie pobiera jony z zewnątrz (głównie wapnia i sodu) i wodę do środka (**ryc. V.3.2.**). ◀ nekroza



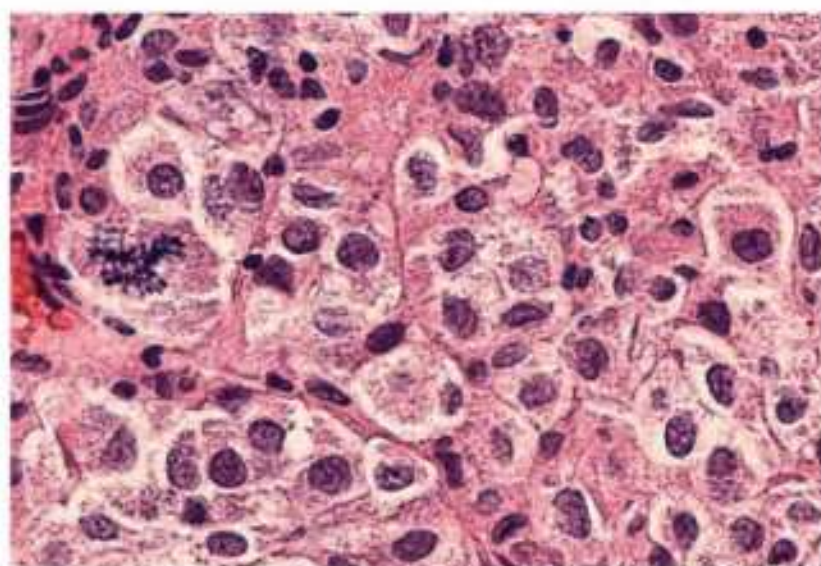
Ryc. V.3.2. Schemat procesu nekrozy. Komórka zwiększa swoją objętość na skutek pobierania dużej ilości wody. Wzrost stężenia jonów wapnia wewnątrz komórki hamuje syntezę ATP, a uruchamia działanie enzymów hydrolitycznych, trawiących organelle komórkowe. W końcowym etapie zostaje przerwana ciągłość błony komórkowej i zawartość komórki wypływa na zewnątrz.

Nekroza u roślin może prowadzić do śmierci całej rośliny lub jej niektórych organów, a także wywoływać przedwczesne zrzucanie liści.

Niekontrolowany podział komórki

komórki
nowotworowe

W organizmach eukariotycznych podziały komórkowe, różnicowanie się komórek i ich śmierć są regulowane przez system kontroli cyklu komórkowego. W skład systemu wchodzi tzw. punkty kontrolne zbudowane z kompleksów białkowych (kinaz białkowych i cyklin). Najważniejsze dwa punkty kontrolne regulują przejście z fazy G_1 do S i z fazy G_2 do M. Utrata kontroli nad cyklem prowadzi do niekontrolowanych podziałów komórkowych. Komórki nadmiernie zwiększają swoją liczbę, nie ulegają apoptozie lub nekrozie, a w konsekwencji może dojść do powstania **komórek nowotworowych** – transformacji nowotworowych. Czynniki, które to powodują, są m.in. mutacje białek regulatorowych wywołane działaniem związków chemicznych (czynniki chemiczne), promieniowaniem jonizującym (czynniki fizyczne) czy wirusami onkogennymi (czynniki biologiczne). Układ odpornościowy rozpoznaje



Ryc. V.3.3. Komórka nowotworu skóry – czerniaka pod mikroskopem elektronowym.

komórki, które przekształcają się w komórki nowotworowe, jako obce i niszczy je. Jeśli komórka nie zostanie rozpoznana przez układ odpornościowy, może dalej się dzielić i utworzyć guz nowotworowy w prawidłowo funkcjonującej tkance. Tak powstaje nowotwór łagodny. Natomiast jeśli komórki nowotworowe dostają się do naczyń krwionośnych i limfatycznych, mogą wędrować do poszczególnych części ciała, tworząc nowe guzy nowotworowe. Prowadzi to do powstania tzw. przerzutów, co jest cechą charakterystyczną nowotworu złośliwego (ryc. V.3.3.).

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Porównaj zaprogramowaną śmierć komórki na drodze apoptozy i nekrozy.
2. Przedstaw konsekwencje utraty kontroli nad zachodzeniem apoptozy w komórkach nowotworowych.
3. Na podstawie dostępnych źródeł informacji wyjaśnij w zeszycie znaczenie nekrozy w programowanej śmierci komórki.
4. Podczas doświadczenia szczurom podawano lek fenobarbital, związek organiczny o działaniu nasennym i uspakajającym u ludzi, a także zatrzymujący produkcję hormonu tyreotropowego i zmniejszający napięcie mięśni gładkich. Fenobarbital u szczurów stymuluje podziały komórkowe wątroby, co w efekcie powoduje powiększenie wątroby. Po przerwaniu podawania tego leku zaobserwowano znaczną śmiertelność komórek wątroby i powrót organu do wyjściowej wielkości. Podaj, jaki proces komórkowy spowodował znaczną śmiertelność komórek wątroby. Wyjaśnij w zeszycie znaczenie tego procesu dla prawidłowego funkcjonowania organizmu.
5. W komórkach eukariotycznych podziały komórkowe, różnicowanie się komórek i ich śmierć są regulowane przez system kontroli cyklu komórkowego. Utrata kontroli nad cyklem komórkowym może prowadzić do niekontrolowanych podziałów komórkowych.

Oceń prawdziwość stwierdzeń odnoszących się do niekontrolowanych podziałów komórkowych. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, lub F, jeśli jest fałszywe. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

Stwierdzenie	P/F
1. Utrata kontroli nad cyklem komórkowym powoduje, że komórki nie ulegają apoptozie lub nekrozie.	...
2. Utrata kontroli nad cyklem komórkowym nie prowadzi do transformacji nowotworowych.	...
3. Transformacje nowotworowe są wynikiem mutacji kompleksów białkowych punktów kontrolnych cyklu komórkowego.	...

6. Mitochondrium jest strukturą występującą prawie we wszystkich komórkach. Najważniejszą funkcją mitochondrium jest wytwarzanie ATP w procesie oddychania komórkowego oraz regulacja metabolizmu komórki. Liczba tych struktur jest zmienna w komórce i zależy od intensywności wykorzystania energii. Mitochondria dzielą się przez podział bezpośredni, czyli amitozę już istniejącej organelli.

Rysunek przedstawia podział mitochondrium.



Na podstawie rysunku i własnej wiedzy podaj w zeszycie różnice między mitozą a podziałem bezpośrednim.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- Zaprogramowana śmierć komórki to **apoptoza**, podczas której składniki komórki są rozkładane bez niszczenia komórek sąsiednich. ◀ s. 259
- Śmierć komórki następuje również podczas **nekrozy** (martwicy), która wiąże się z wylewaniem zawartości komórki na zewnątrz i niszczeniem komórek sąsiednich. ◀ s. 259
- Utrata kontroli nad cyklem komórkowym prowadzi do powstania **komórek nowotworowych**. ◀ s. 260

4. Mejoza

NA TEJ LEKCJI:

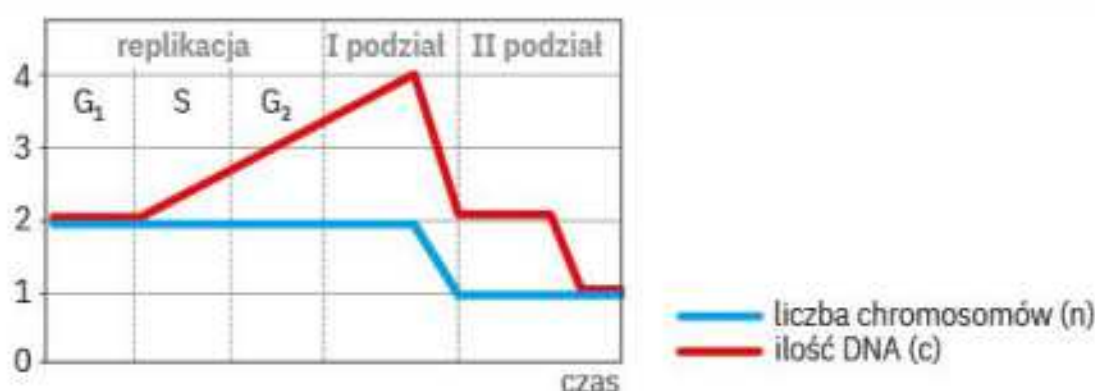
- przeanalizujesz przebieg mejozy;
- poznasz znaczenie mejozy;
- dowiesz się, jakie znaczenie ma proces *crossing-over* dla zachowania zmienności genetycznej.

Mejoza jest podziałem jądra komórkowego, który **prowadzi do redukcji liczby chromosomów do połowy**. W wyniku tego podziału z jednej diploidalnej ($2n$) komórki macierzystej powstają cztery haploidalne ($1n$) komórki potomne.

Czas trwania mejozy zależy od ilości DNA w jądrze komórkowym. W jądrach komórek poliploidalnych (zwielokrotniona liczba n chromosomów, np. $4n$) mejoza trwa znacznie krócej w porównaniu z komórkami diploidalnymi.

W komórkach zwierzęcych czas trwania mejozy jest znacznie dłuższy niż w komórkach roślinnych i często może zatrzymać się w określonej fazie, np. w profazie I na kilka dni, tygodni, miesięcy czy nawet kilkanaście lat (np. podczas gametogenezy u człowieka i innych ssaków).

przebieg mejozy ► **Mejoza składa się z dwóch następujących po sobie podziałów** określanych jako **pierwszy podział mejotyczny (I)** i **drugi podział mejotyczny (II)**. Każdy z podziałów składa się z takich samych faz jak mitozę: profazy I, metafazy I, anafazy I i telofazy I w pierwszym podziale oraz profazy II, metafazy II, anafazy II, telofazy II w drugim podziale. Pierwszy podział mejotyczny jest poprzedzony interfazą, która składa się z dwóch faz: fazy G_1 i S. Ich przebieg jest podobny do interfazy mitozy.



Ryc. V.4.1. Zmiany ilości materiału genetycznego w dzielącej się mejotycznie komórce diploidalnej. W fazie G_1 ilość DNA w komórce diploidalnej ($2n$ liczba chromosomów) wynosi $2c$. Podczas fazy S następuje podwojenie (replikacja) DNA i w efekcie jego ilość wzrasta z $2c$ do $4c$, a liczba chromosomów się nie zmienia. Po pierwszym podziale mejotycznym ilość DNA redukuje się z $4c$ do $2c$. Ilość chromosomów zmienia się z $2n$ do $1n$, ponieważ para chromosomów homologicznych rozdziela się i po jednym chromosomie wędruje do komórek potomnych. Po drugim podziale mejotycznym zmienia się tylko ilość DNA – zmniejsza się z $2c$ do $1c$. Liczba chromosomów się nie zmienia, ponieważ w komórkach potomnych chromatydy stają się chromosomami.

Komórka bezpośrednio z fazy S, czyli replikacji DNA, przechodzi do profazy pierwszego podziału meiotycznego. Nie występuje faza G_2 charakterystyczna dla mitozy (ryc. V.4.1.).

Pierwszy podział meiotyczny – rozdzielanie chromosomów homologicznych

Przebieg mejozy przedstawiono dla komórki macierzystej, w której występuje $2n = 6$ chromosomów.

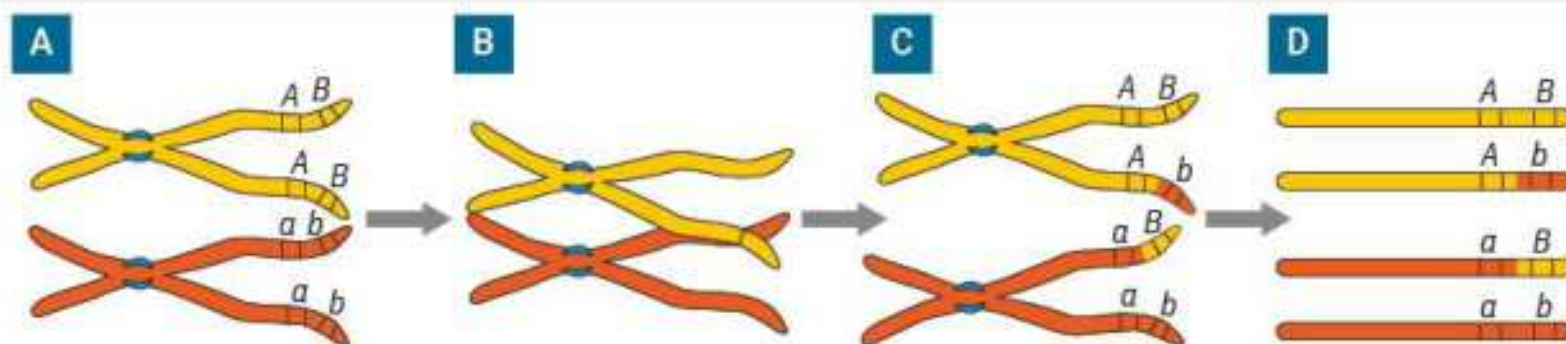
■ Profaza I

◀ profaza pierwszego podziału



Ryc. V.4.2. Profaza I.

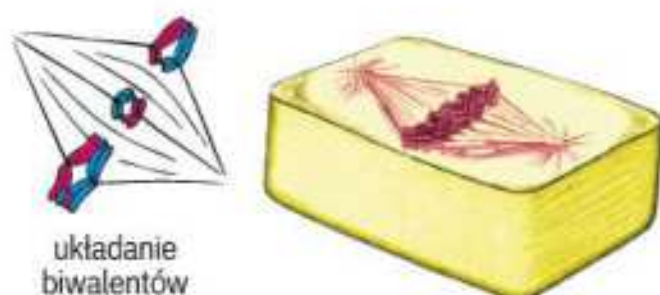
Profaza I jest najdłuższą i najbardziej złożoną fazą mejozy (ryc. V.4.2.). Z chromatydy wyodrębniają się chromosomy w postaci długich i cienkich nici. Każdy z chromosomów składa się z dwóch chromatyd. Następnie chromosomy grubieją i skracają się. Chromosomy homologiczne układają się blisko siebie i łączą się w pary, tworząc tzw. biwalenty. Każdy biwalent jest zbudowany z dwóch chromosomów, a każdy z nich ma dwie chromatydy – czyli biwalent jest złożony z czterech chromatyd (określany jako tetrada). Następnie w biwalentach dochodzi do wymiany odcinków między wewnętrznymi chromatydami chromosomów homologicznych, (zjawisko *crossing-over*, ryc. V.4.3.). Dzięki **crossing-over** powstają chromosomy o nowym składzie genetycznym. Proces ten prowadzi do wymieszania się (rekombinacji) materiału genetycznego w chromosomach homologicznych, z których jeden pochodzi od matki, a drugi – od ojca.



Ryc. V.4.3. Schemat przebiegu zjawiska **crossing-over**: (A) dwa chromosomy homologiczne, każdy zbudowany z dwóch chromatyd połączonych centromerem (przewężeniem pierwotnym), (B) krzyżowanie się chromatyd chromosomów homologicznych, (C) wymiana odcinków między chromosomami homologicznymi, (D) chromosomy po *crossing-over* składają się z chromatyd nierekombinacyjnych i rekombinacyjnych.

Po zejściu tego procesu chromosomy homologiczne oddzielają się od siebie w parach i są połączone tylko chiasmami, czyli miejscami po skrzyżowaniu chromatyd podczas *crossing-over*. Następnie chromosomy ulegają dalszej spiralizacji, a w tym czasie zanika otoczka jądrowa i jąderko oraz zaczyna kształtować się wrzeciono podziałowe. Chiazmy pod koniec profazy przesuwają się w kierunku końców chromosomów aż do całkowitego zaniku.

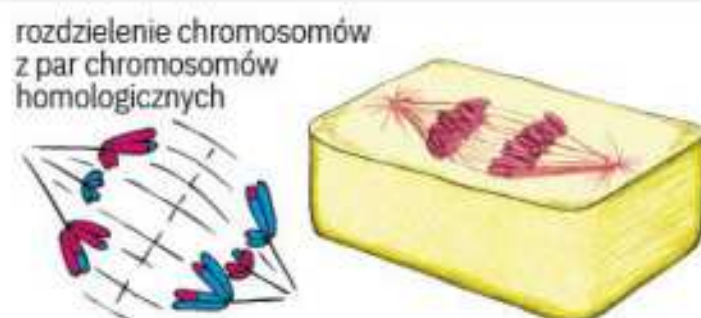
■ **Metafaza I**



Ryc. V.4.4. Metafaza I.

Podczas metafazy I centromery każdego z chromosomów w parze łączą się z włóknami wrzeciona kariokinetycznego. Podobnie jak podczas metafazy mitozy, w wyniku ciągłego skracania się i wydłużania mikrotubul chromosomy stale wędrują, aż do ustawienia się w płaszczyźnie równikowej komórki, tworząc tzw. płytkę metafazalną (inaczej płaszczyznę równikową). W płaszczyźnie równikowej wrzeciona pod koniec metafazy I znajdują się pary chromosomów homologicznych (**ryc. V.4.4.**).

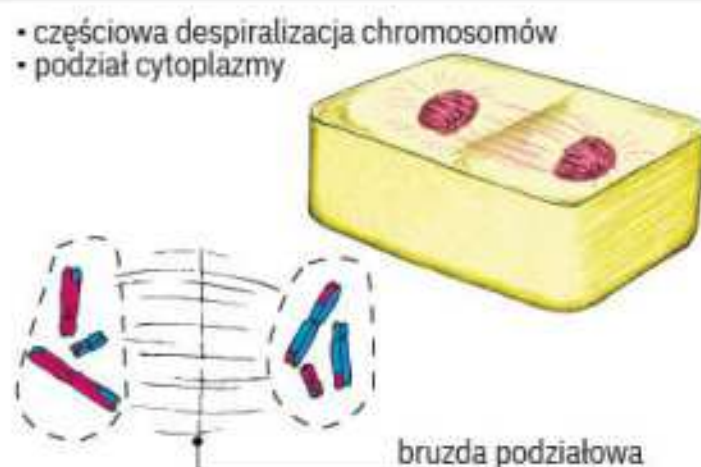
■ **Anafaza I**



Ryc. V.4.5. Anafaza I.

W anafazie I z płaszczyzny równikowej do przeciwnych biegunów komórki losowo rozchodzą się chromosomy z pary chromosomów homologicznych. Jeden chromosom z pary wędruje do jednego bieguna komórki, a drugi – do drugiego bieguna. Każdy chromosom nadal jest zbudowany z dwóch chromatyd (**ryc. V.4.5.**).

■ **Telofaza I**



Ryc. V.4.6. Telofaza I.

Podczas telofazy I następuje skupienie chromosomów wokół dwóch biegunów komórki. Dochodzi do częściowej despiralizacji chromosomów, odtworzenia otoczki jądrowej i jąderka oraz rozdzielenia cytoplazmy – cytokinezy. Powstają dwie komórki potomne (**ryc. V.4.6.**).

Drugi podział mejotyczny – powtórzenie mitozy

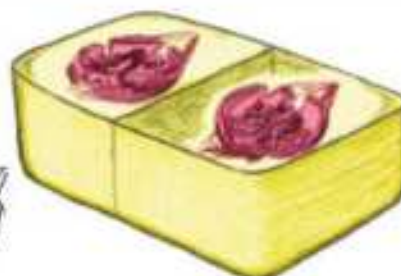
Drugi podział mejotyczny nie jest poprzedzony interfazą ani syntezą kwasu DNA. Najczęściej następuje po I mejozie lub jest poprzedzony krótką przerwą i przypomina mitozę. W każdej z dwóch powstałych po pierwszym podziale mejotycznym komórek następuje rozchodzenie się do przeciwnych biegunów komórki chromatyd, które następnie stają się chromosomami potomnymi. Podczas drugiego podziału zmniejsza się ilość DNA do $1c$, a liczba chromosomów się nie zmienia.

W wyniku tego zjawiska po cytokinezie powstają cztery komórki potomne o pojedynczym zespole chromosomów $1n$. ♦ efekt mejozy

■ Profaza II

Profaza II jest bardzo krótka i polega na ponownym grubieniu (kondensacji) chromosomów. Podczas tej fazy ponownie zanika otoczka jądrowa i jąderko oraz zaczyna się tworzyć wrzeciono podziałowe (ryc. V.4.7.).

formowanie się chromosomów

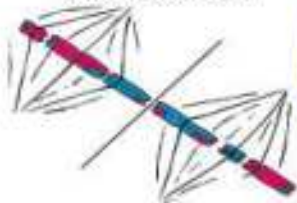


Ryc. V.4.7. Profaza II.

■ Metafaza II

Podczas metafazy II chromosomy układają się w płaszczyźnie równikowej i do ich centromerów przyłączają się włókna wrzeciona podziałowego (mikrotubule) (ryc. V.4.8.).

układanie chromosomów

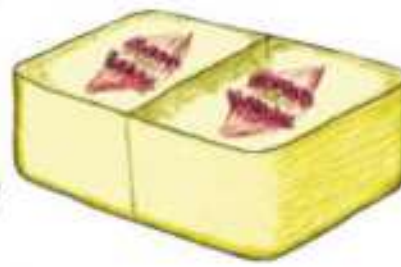
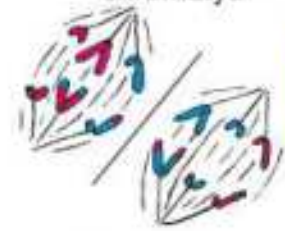


Ryc. V.4.8. Metafaza II.

■ Anafaza II

Podczas tej fazy następuje rozdzielenie do przeciwnych biegunów komórki chromatyd, z których powstają chromosomy potomne (ryc. V.4.9.).

wędrowka grup chromatyd

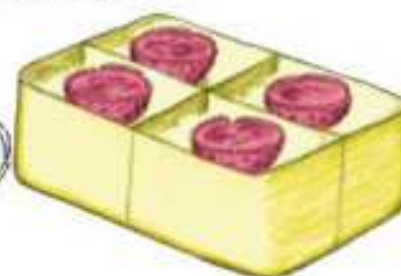
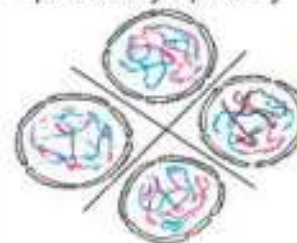


Ryc. V.4.9. Anafaza II.

■ Telofaza II

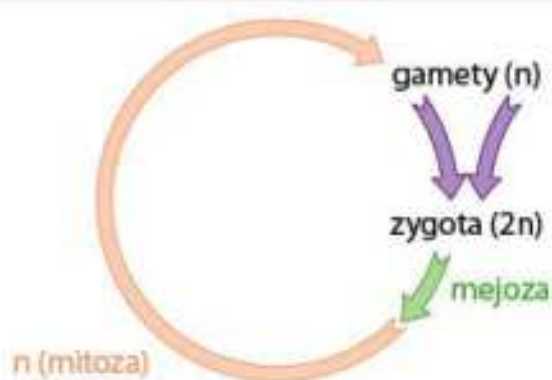
W telofazie II wokół chromosomów potomnych zostaje odtworzona otoczka jądrowa, a następnie pojawia się jąderko (ryc. V.4.10.). Chromosomy ulegają despiralizacji (rozkręceniu i odtworzeniu chromatyny), a powstałe komórki przechodzą podział cytoplazmy – cytokinezę.

• despiralizacja chromosomów
• podział cytoplazmy

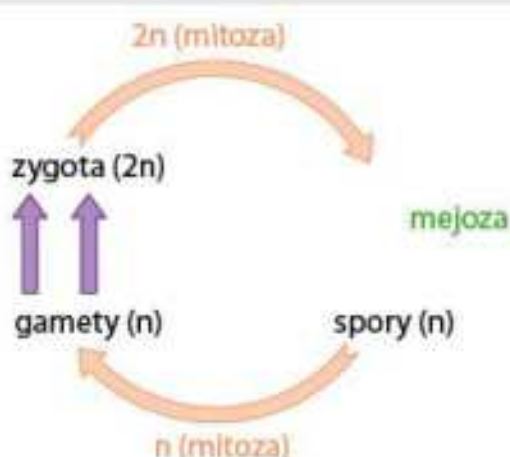


Ryc. V.4.10. Telofaza II.

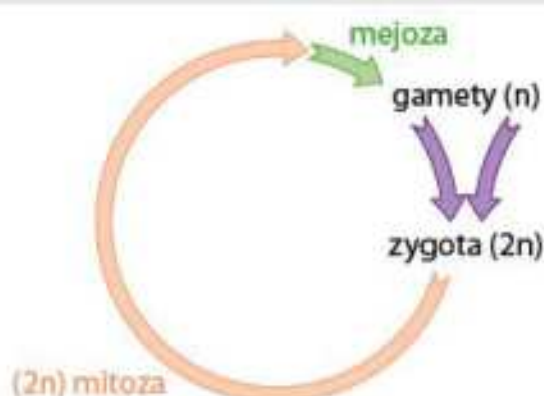
W zależności od momentu cyklu życiowego, w którym zachodzi mejoza, wyróżnia-
 typy mejozy ▶ my następujące **typy mejozy**:



Ryc. V.4.11. Mejoza pozapłodnieniowa.



Ryc. V.4.12. Mejoza pośrednia.



Ryc. V.4.13. Mejoza przedzapłodnieniowa.

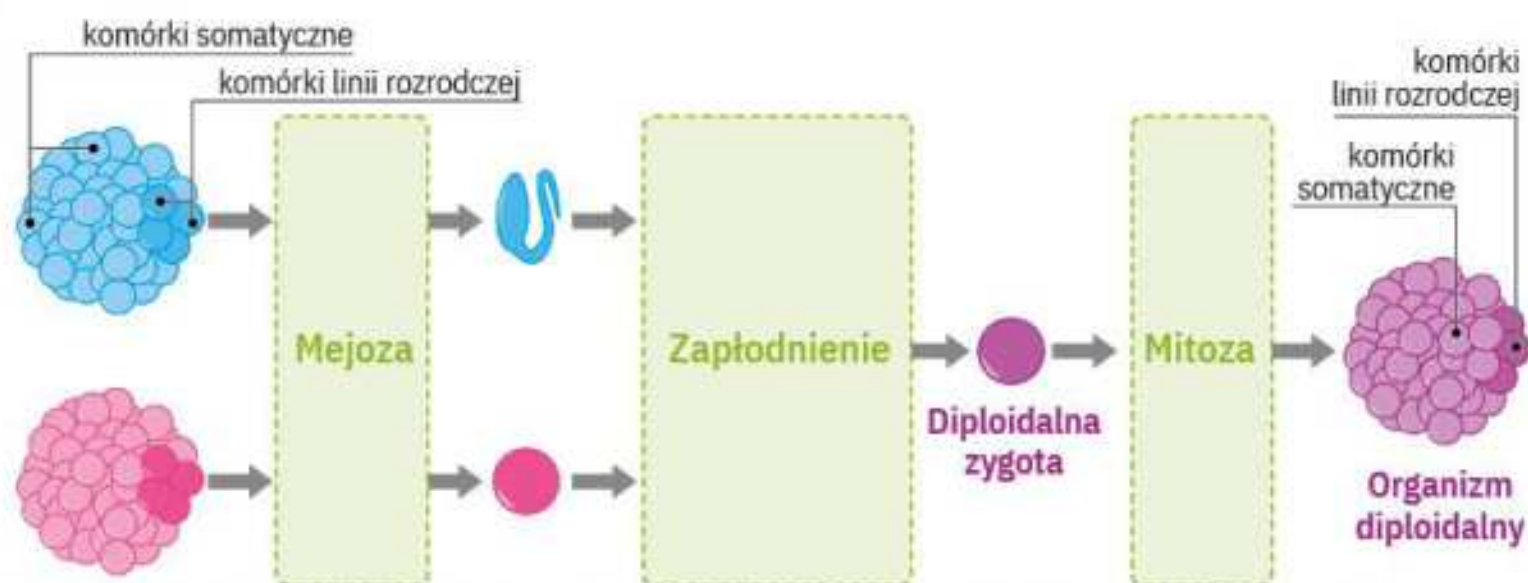
1. **Pozapłodnieniowa (postgamiczna)** – zachodzi po procesie zapłodnienia, kiedy diploidalna zygota dzieli się mejotycznie i prowadzi do powstania haploidalnych komórek, z których powstaje organizm o liczbie chromosomów $1n$. Występuje u bardzo prostych organizmów eukariotycznych, np. u skrzętnicy (ryc. V.4.11.).

2. **Pośrednia** – występuje u organizmów z przemianą pokoleń; w sporoficie prowadzi do powstania haploidalnych zarodników (spor), z których rozwija się haploidalny gametofit. Na gametoficie w procesie mitozy powstają haploidalne gamety, które łączą się podczas zapłodnienia i w ten sposób tworzą diploidalny sporofit. Ten typ mejozy występuje u większości roślin z przemianą pokoleń (ryc. V.4.12.).

3. **Przedzapłodnieniowa (pregamiczna)** – zachodzi przed procesem zapłodnienia i prowadzi do powstania haploidalnych gamet; gamety łącząc się, tworzą diploidalną zygotę (występuje u większości zwierząt, w tym u człowieka oraz u nielicznych roślin), która w wyniku podziałów mitotycznych rozwija się w diploidalny organizm (ryc. V.4.13.).

znaczenie mejozy ▶ Znaczenie mejozy

Podział mejotyczny zachodzi u wszystkich organizmów rozmnażających się płciowo. U zwierząt mejoza umożliwia tworzenie haploidalnych komórek rozrodczych – gamet, które po połączeniu się podczas procesu zapłodnienia tworzą diploidalną zygotę (po jednym zespole chromosomów od każdego z rodziców). Zygota, dzieląc się mitotycznie, rozwija się w nowy organizm (ryc. V.4.14.). O tym, który chromosom trafi do jądra, decyduje przypadek. Losowy zestaw chromosomów warunkuje różnorodność organizmów żywych. Natomiast u roślin i grzybów podczas mejozy często powstają haploidalne zarodniki (spory), z których rozwija się pokolenie zwane sporofitem.



Ryc. V.4.14. Nowy organizm jest mozaiką cech pochodzących od każdego z rodziców, co daje szansę na przystosowanie i przetrwanie w nieprzewidywalnych warunkach środowiska.

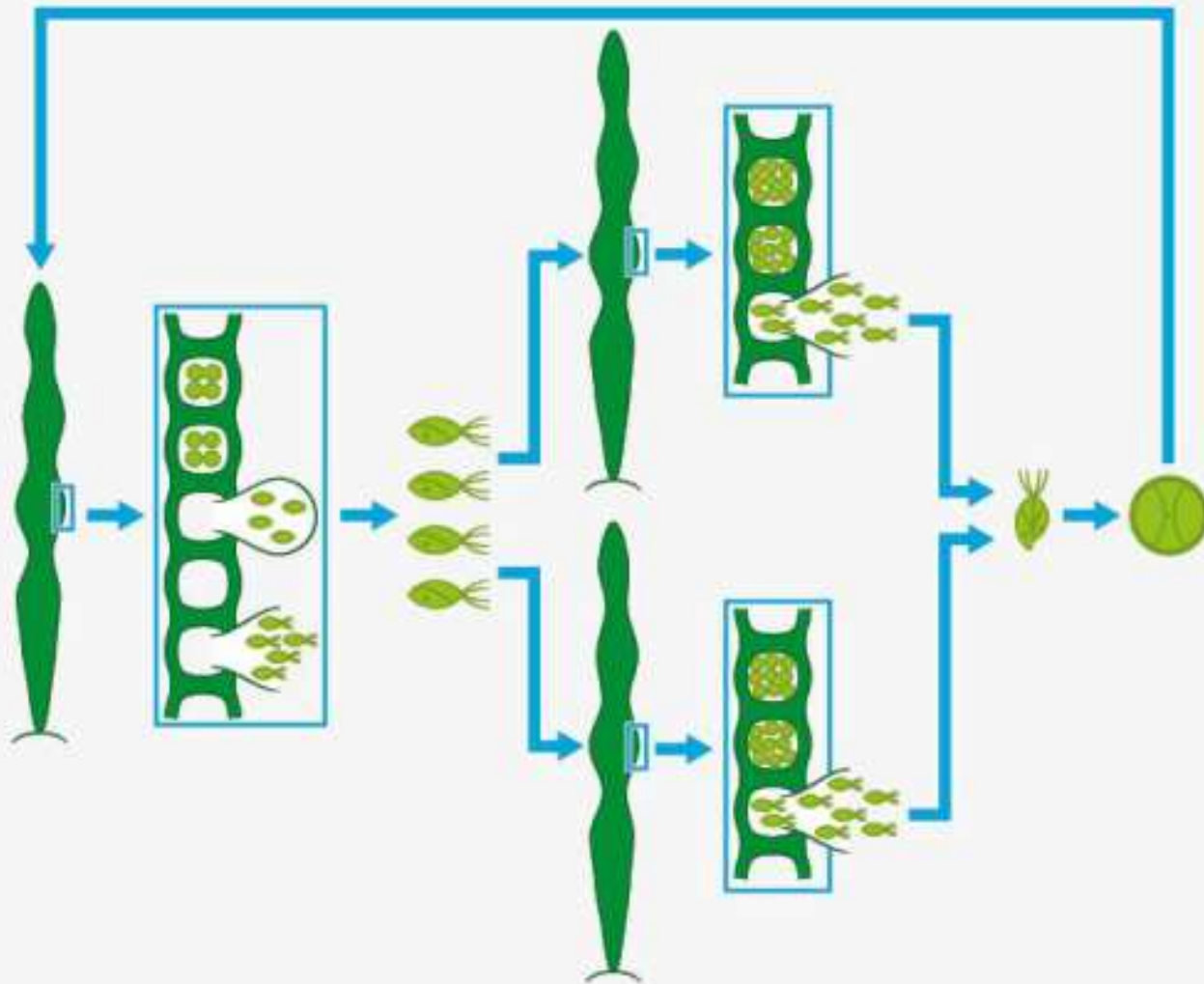
Istotne znaczenie ma również zjawisko *crossing-over* zachodzące w profazie pierwszego podziału meiotycznego. Proces ten razem z losowym rozchodzeniem się chromosomów do komórek potomnych warunkuje zmienność organizmów.

ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Porównaj przebieg metafazy mitozy i metafazy pierwszego podziału meiotycznego.
2. Wyjaśnij znaczenie interfazy dla przebiegu podziału meiotycznego i powstania czterech haploidalnych komórek potomnych.
3. Wskaż różnice w budowie chromosomów w metafazie i anafazie mejozy.
4. Wytlumacz znaczenie zjawiska *crossing-over* dla zachowania różnorodności biologicznej.
5. Porównaj anafazę mitozy z anafazą I podziału meiotycznego.
6. Oceń znaczenie podziału mitotycznego i meiotycznego dla organizmów eukariotycznych.
7. W diploidalnej komórce zwierzęcej znajduje się 10 chromosomów. Oblicz w zeszycie:
 - a) ile tetrad powinno powstać podczas pierwszego podziału meiotycznego,
 - b) ile chromosomów będzie zawierała pojedyncza gameta,
 - c) ile chromatyd ułoży się w płaszczyźnie równikowej wrzeczona podczas drugiego podziału meiotycznego w pojedynczej komórce.
8. Przedstaw na rysunku w zeszycie różnice w przebiegu anafazy pierwszego i drugiego podziału meiotycznego dla komórki, w której $2n = 6$.
9. Rozmnażanie płciowe zachodzi u organizmów diploidalnych, które podczas mejozy tworzą haploidalne gamety. Każda z gamet zawiera przemieszaną losowo informację genetyczną.
 - 9.1. Wymień procesy zachodzące podczas mejozy, które decydują o zmienności genetycznej potomstwa powstałego w wyniku rozmnażania płciowego.
 - 9.2. Wyjaśnij, jakie korzyści osiągają organizmy rozmnażające się płciowo.



10. Na rysunku przedstawiono cykl rozwojowy organizmu.



10.1. Omów znaczenie mejozy w cyklu rozwojowym.

10.2. Określ, jaki typ mejozy zachodzi w przedstawionym cyklu rozwojowym. Odpowiedź uzasadnij.

10.3. Wymień różnice w funkcjach komórek rozrodczych i somatycznych.

PODSUMOWANIE LEKCJI

- s. 262 ▶ • **Podział mejotyczny składa się z pierwszego podziału mejotycznego (I mejoza) oraz drugiego podziału mejotycznego (II mejoza).** W obu podziałach występują takie same fazy: profaza, anafaza, metafaza i telofaza.
- s. 263 ▶ • **Profaza pierwszego podziału mejotycznego** różni się od profazy mitozy i profazy drugiego podziału mejotycznego. Podczas tej fazy powstają pary chromosomów homologicznych, tzw. biwalenty, w których zachodzi wymiana odcinków chromatyd, czyli zjawisko *crossing-over*. *Crossing-over* decyduje o zmienności genetycznej organizmów.
- s. 265 ▶ • W czasie pierwszego podziału mejotycznego z diploidalnej komórki macierzystej ($2n$) **powstają dwie haploidalne komórki potomne ($1n$).** Drugi podział mejotyczny przypomina mitozę i w jego efekcie powstają **cztery komórki potomne o zredukowanej liczbie chromosomów.**
- s. 266 ▶ • Mejoza prowadzi do powstania **gamet u zwierząt i zarodników u roślin i grzybów.**
- s. 266 ▶ • W zależności od etapu cyklu rozwojowego, w którym zachodzi mejoza, wyróżniamy **mejozę postgamiczną (pozapłodnieniową), pośrednią i pregamiczną (przedzapłodnieniową).**

PODSUMOWANIE PRZED SPRAWDZIANEM

Cykl życiowy komórki

◀ s. 248

Interfaza			Mitoza				
			Kariokineza – podział jądra				Cytokineza – podział cytoplazmy
faza G_1	faza S	faza G_2	profaza	metafaza	anafaza	telofaza	

Mejoza

◀ s. 262

Interfaza		Mejoza									
		Pierwszy podział meiotyczny – rozdzielanie chromosomów homologicznych					Drugi podział meiotyczny – powtórzenie mitozy				
		Kariokineza – podział jądra				Cytokineza – podział cytoplazmy	Kariokineza – podział jądra				Cytokineza – podział cytoplazmy
faza G_1	faza S	profaza I	metafaza I	anafaza I	telofaza I		profaza II	metafaza II	anafaza II	telofaza II	

Porównanie procesu mitozy i mejozy

◀ s. 251

Cecha	Mitoza	Mejoza
Rodzaj komórek dzielących się	komórki somatyczne (budujące ciało) u zwierząt i roślin, komórki generatywne u roślin	komórki macierzyste gamet i komórki macierzyste zarodników
Liczba podziałów komórkowych	1	2
Etapy interfazy	G_1 , S, G_2	G_1 , S
Liczba komórek powstających w wyniku podziałów	2	4
Zjawisko <i>crossing-over</i>	nie zachodzi	zachodzi
Liczba chromosomów przed podziałem	$2n$	$2n$
Liczba chromosomów w komórkach potomnych	taka sama, jak w komórkach macierzystych: $2n$ lub $1n$	zredukowana do połowy w stosunku do komórki macierzystej: $1n$
Długość profazy	krótka	długa
Metafaza	W płaszczyźnie równikowej wrzeczona ustawiają się całe chromosomy zbudowane z dwóch chromatyd.	W metafazie I w płaszczyźnie równikowej wrzeczona ustawiają się pary chromosomów homologicznych (biwalenty), a w metafazie II – pojedyncze chromosomy zbudowane z dwóch chromatyd.

Cecha	Mitoza	Mejoza
Anafaza	Do przeciwległych biegunów komórki wędrują chromatydy, które stają się chromosomami potomnymi.	W anafazie I do przeciwległych biegunów komórki wędrują chromosomy homologiczne z pary. W anafazie II do przeciwległych biegunów wędrują chromatydy.
Znaczenie podziału	• powoduje zwiększenie liczby identycznych genetycznie komórek • umożliwia regenerację tkanek • pozwala na wzrost i rozwój organizmu • umożliwia rozmnażanie bezpłciowe	• poprzedza powstanie gamet u zwierząt oraz zarodników roślin i grzybów • zapewnia stałą liczbę chromosomów w kolejnych pokoleniach organizmów rozmnażających się płciowo • dzięki niezależnej segregacji chromosomów homologicznych i <i>crossing-over</i> zapewnia różnorodność genetyczną organizmów rozmnażających się płciowo

s. 258 ► Różnice między apoptozą i nekrozą

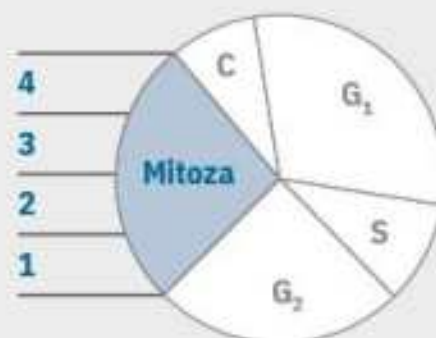
Cecha	Apoptoza	Nekroza
Rodzaj procesu	aktywny, wymagający dostarczenia ATP	bierny, hamowana synteza ATP
Miejsce zachodzenia	pojedyncza komórka w warunkach fizjologicznych i patologicznych	szereg komórek w miejscu zapalnym (warunki patologiczne)
Kształt komórki	komórka obkurczona	komórka spęczniała
Ogniska zapalne w otoczeniu komórki	brak	występują
Organelle komórkowe	zachowane	rozpad
Zmiany w jądrze komórkowym	kondensacja chromatyny, rozpad jądra na fragmenty	brak kondensacji chromatyny, rozkład jądra
Ciągłość błony komórkowej	nienaruszona do wytworzenia ciałek apoptycznych	rozerwana
Końcowy etap procesu	wytworzenie ciałek apoptycznych i fagocytoza przez komórki żerne	pęknięcie, rozpad i wylewanie się zawartości komórki na zewnątrz
Znaczenie	regulacja liczby komórek w organizmie	jest niebezpieczna dla organizmu ze względu na wydzielanie substancji toksycznych w ogniskach zapalnych

BLOK ĆWICZENIOWY

1. (0–3 pkt)

Zamieszczony rysunek przedstawia przebieg cyklu komórkowego. Na podstawie rysunku i wiedzy własnej wykonaj następujące polecenia w zeszycie.

- Wymień etapy cyklu komórkowego.
- Wskaż fazę, w której następuje replikacja DNA.
- Nazwij etapy mitozy, które zostały zaznaczone cyframi.



2. (0–1 pkt)

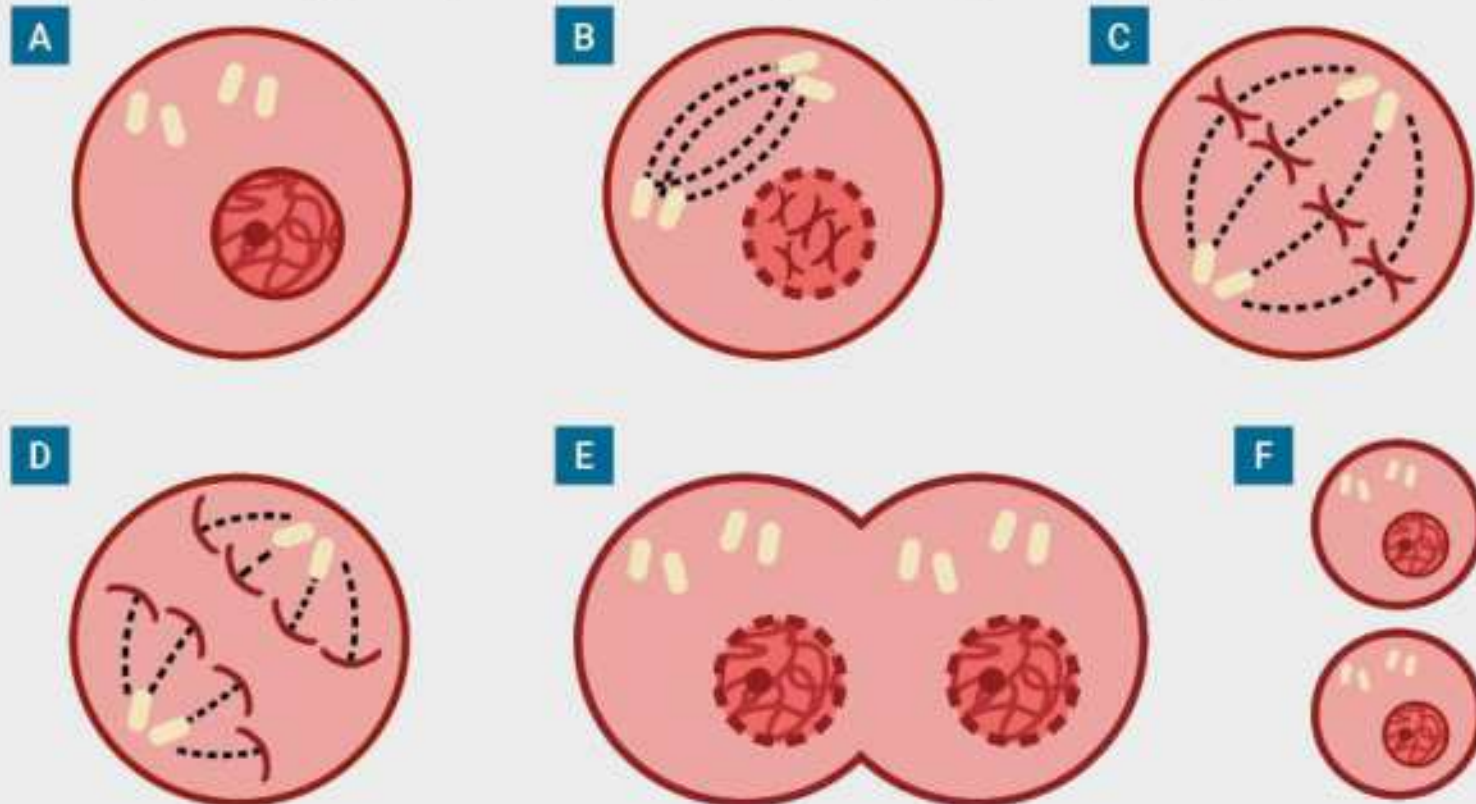
Rysunek przedstawia zmiany ilości materiału genetycznego w dzielącej się mitotycznie komórce diploidalnej.

Wyjaśnij na podstawie rysunku, dlaczego komórki potomne po podziale mitotycznym mają taką samą ilość DNA, co komórka macierzysta (2c). Odpowiedź zapisz w zeszycie.



3. (0–3 pkt)

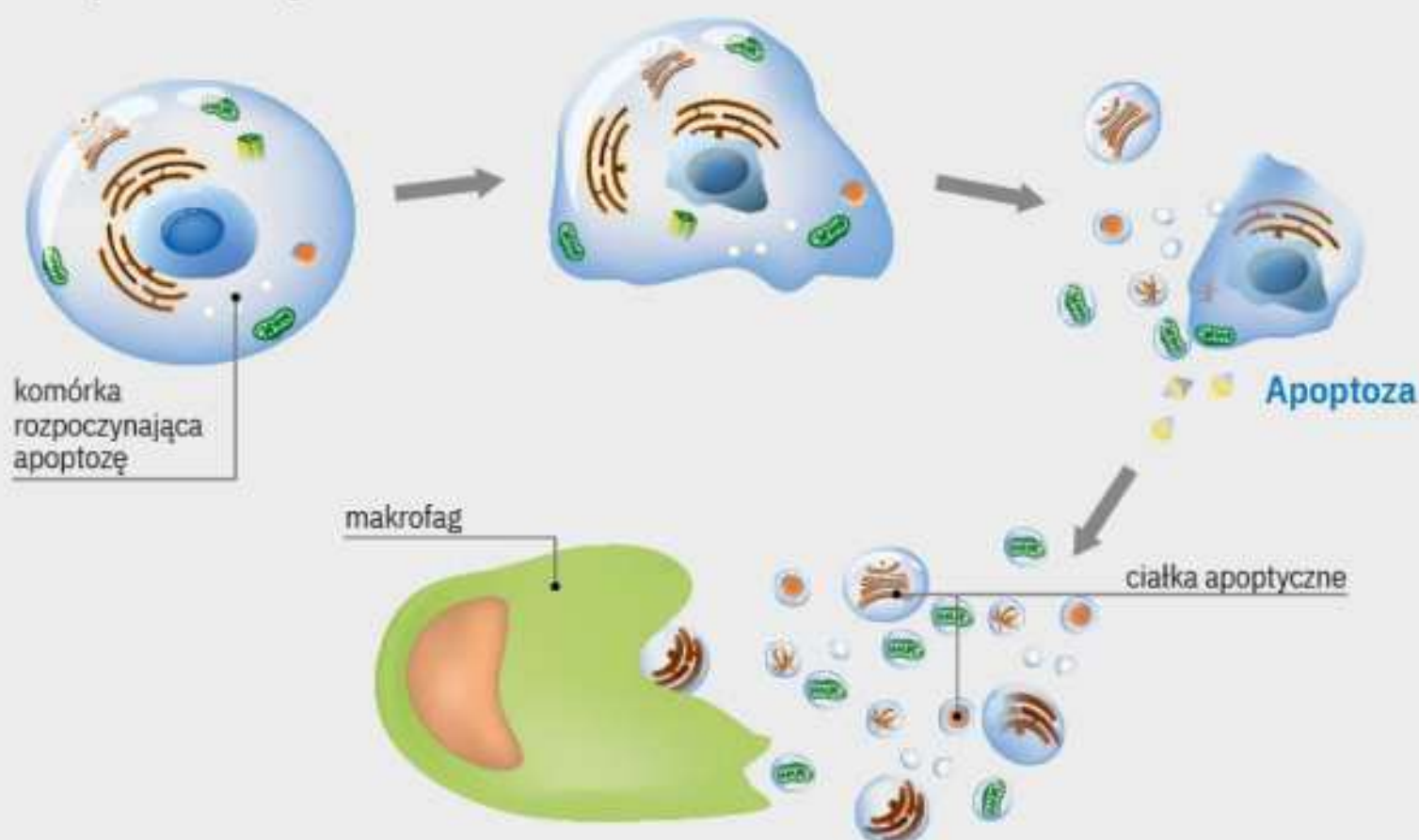
Rysunki przedstawiają jeden z podziałów komórkowych. Wykonaj polecenia w zeszycie.



- Nazwij przedstawiony podział komórkowy.
- Wskaż rysunki przedstawiające profazę. Odpowiedź uzasadnij.
- Wskaż rysunek przedstawiający anafazę. Odpowiedź uzasadnij.

4. (0–1 pkt)

Rysunek przedstawia proces apoptozy, czyli programowanej śmierci komórki. Zniszczone, zużyte komórki są usuwane z organizmu.



Na podstawie rysunku i wiedzy własnej wyjaśnij w zeszycie, dlaczego podczas tego procesu usuwana komórka nie wywołuje stanu zapalnego w przeciwieństwie do nekrozy (martwicy).

5. (0–1 pkt)

Rysunek przedstawia zmiany ilości materiału genetycznego w dzielącej się mejotycznie komórce diploidalnej.



Wyjaśnij na podstawie rysunku, dlaczego pierwszy podział mejozy jest nazywany podziałem redukcyjnym. Odpowiedź zapisz w zeszycie.

Słowniczek trudniejszych pojęć

Absorbcja – pochłanianie przez barwniki (m.in. chlorofil) światła słonecznego w trakcie fotosyntezy.

Adhezja – przyleganie, zjawisko łączenia się powierzchniowych warstw dwóch ciał fizycznych, pozwala zwierzętom na poruszanie się po gładkich powierzchniach, a roślinom na transport wody naczyniami lub cewkami.

Aktyna – białko proste, które wraz z białkiem miozyną buduje miofibrylle komórek i włókien mięśniowych. Wchodzi także w skład cytoszkieletu komórki, w którym odpowiada m.in. za ruch i zmianę kształtu komórek.

Apoptoza – programowana śmierć komórki w organizmie wielokomórkowym, dzięki której organizm pozbywa się zużytych i uszkodzonych komórek.

Asocjacja – wiązanie się pojedynczych cząsteczek związków chemicznych w zespoły cząsteczkowe; występuje m.in. w wodzie.

Autotrofy – organizmy samożywne, które produkują związki organiczne (węglowodany, tłuszcze, białka) z prostych związków nieorganicznych węgla, azotu i wody, wykorzystując do tego energię słoneczną (fotoautotrofy) lub chemiczną (chemoautotrofy).

Badanie przesiewowe – rodzaj badania przeprowadzanego wśród osób nieposiadających objawów choroby w celu jej wykrycia i wczesnego leczenia.

Białka histonowe – białka o charakterze zasadowym, występujące w jądrze komórkowym, w połączeniu z DNA tworzą nukleosomy.

Biogaz – gaz palny, produkt fermentacji metanowej związków pochodzenia organicznego (np. ścieków, odpadów komunalnych i rolno-spożywczych oraz biomasy). Biogaz składa się głównie z metanu i dwutlenku węgla. Gazy te w czasie spalania lub utlenienia wydzielają energię wykorzystywaną jako paliwo.

Bioinformatyka – interdyscyplinarna dziedzina

nauki wykorzystująca metody i narzędzia informatyczne do rozwiązywania problemów nauk przyrodniczych (m.in. modelowania procesów metabolicznych).

Bufor – roztwór zachowujący stałe stężenie jonów wodorowych (stałe pH) po dodaniu niewielkich ilości kwasu lub zasady.

Chityna – wielocukier złożony (polisacharyd) zbudowany z węgla, wodoru, tlenu i azotu budujący ścianę komórkową większości grzybów i pancerzyki stawonogów.

Ciśnienie osmotyczne – siła nacisku wywieranego na roztwór w celu powstrzymania przepływu rozpuszczalnika przez półprzepuszczalną membranę, która rozdziela roztwory o różnym stężeniu. W komórce jest wywołane różnicą stężeń związków lub jonów po obu stronach błony i dążeniem układu do ich wyrównania.

Cykl metaboliczny – cykliczny ciąg następujących po sobie reakcji enzymatycznych, w których produkt jednej reakcji jest substratem kolejnej; przebiega z odtworzeniem związku chemicznego wyjściowego dla tych przemian.

Cytochrom – białko zawierające żelazo, które jest składnikiem łańcucha transportu elektronów w mitochondriach i chloroplastach komórek eukariotycznych.

Cytoszkielet – dynamiczna struktura komórki eukariotycznej zbudowana z mikrotubul, filamentów pośrednich i mikrofilamentów nadająca komórce wytrzymałość, zapewniająca wewnątrzkomórkowy transport oraz pozwalająca na ruch całej komórki.

Cytozol – roztwór koloidowy wypełniający wnętrze komórki, w którym znajdują się organelle komórkowe. Zachodzą w nim reakcje biochemiczne i transport między komórką a jej otoczeniem.

Dalton – jednostka masy atomowej w przybliżeniu równa masie atomu wodoru, definiowana jako 1/12 masy atomu węgla ^{12}C .

Denitryfikacja – rozkład azotanów (NO_3^-) do azotu gazowego (N_2) przez niektóre bakterie glebowe (bakterie denitryfikacyjne).

Deplazmoliza – pobieranie wody przez komórkę przeniesioną z roztworu hipertonicznego do roztworu hipotonicznego.

Dichlorodifenylotrichloroetan (DDT) – środek owadobójczy z grupy chlorowanych węglowodorów.

Dyfrakcja – ugięcie światła wokół krawędzi przeszkody, związana jest z lokalną niejednorodnością ośrodka, w którym te fale się rozchodzą.

Dyfuzja – proces samorzutnego rozprzestrzeniania się cząsteczek lub jonów w wyniku ich chaotycznych zderzeń, zachodzi zgodnie z gradientem stężeń od większego stężenia substancji do stężenia mniejszego.

Egzocytoza – proces usuwania substancji z komórki do przestrzeni pozakomórkowej (np. hormonów, enzymów, produktów przemiany materii).

Elektron – cząsteczka elementarna, składnik atomu, który znajduje się poza jądrem i ma ładunek ujemny.

Endocytoza – pobieranie przez komórkę substancji z jej otoczenia, transport ten zachodzi na drodze: pinocytozy – wchłaniania płynów z rozpuszczonymi w nich substancjami, fagocytozy – pobierania większych cząsteczek, lub endocytozy receptorowej.

Endosymbioza – typ współżycia między dwoma gatunkami, w którym jeden organizm żyje wewnątrz organizmu drugiego. Taki rodzaj symbiozy przynosi każdemu z gatunków korzyści.

Enzymy hydrolityczne – hydrolazy, klasa enzymów rozkładająca wiązania chemiczne złożonych związków do związków prostszych z przyłączeniem wody; do hydrolaz należą enzymy trawienne.

Ferredoksyna – białko zawierające grupę żelazo-siarkową, występujące w stromie chloroplastów i będące składnikiem fotosyntetycznego łańcucha transportu elektronów.

Fibrylarne białka – białka proste o strukturze włóknistej stanowiące podstawowy materiał budulcowy i podporowy organów zwierzęcych.

Filamenty pośrednie – włókniste składniki cytoskieletu komórki o średnicy ok. 10 nm, pośrednie między filamentami grubymi a cienkimi.

Fluorescencja – zjawisko emitowania światła przez wzbudzony atom lub cząsteczkę.

Foton – kwant lub porcja energii promieniowania elektromagnetycznego.

Frakcjonowanie komórek – technika służąca do oddzielania składników komórek przez poddanie ich działaniu siły odśrodkowej (odwirowaniu).

Gametofit – pokolenie haploidalne występujące w cyklu rozwojowym roślin i niektórych protistów.

Genofor – podstawowa struktura zawierająca bakteryjny materiał genetyczny, w postaci kolistego, dwuniciowego DNA.

Glikolipidy – grupa organicznych związków chemicznych zaliczanych do lipidów złożonych składających się oprócz alkoholu i kwasów tłuszczowych z reszt cukrowych (najczęściej galaktozy lub glukozy); są składnikiem budulcowym błon biologicznych.

Glikoproteiny – grupa organicznych związków chemicznych zaliczanych do białek złożonych składających się oprócz łańcuchów polipeptydowych z reszt cukrowych, są składnikami błon biologicznych, budują cytoskielet, enzymy i hormony.

Gradient stężeń – różnica w stężeniu substancji między dwoma miejscami, np. po obu stronach błony komórkowej.

Gruboszowate – rodzina roślin występujących przeważnie na siedliskach ubogich w wodę i obejmująca ok. 1500 gatunków (głównie w krajach ciepłych, szczególnie w Afryce).

Helisa podwójna – podstawowy element struktury przestrzennej cząsteczki DNA. Składa się z dwóch łańcuchów polinukleotydowych, które biegną w przeciwnych kierunkach i owijają się wokół wspólnej osi.

Helisa alfa – struktura drugorzędowa białka stabilizowana przez wiązania wodorowe; ma kształt cylindra utworzonego przez prawoskrętnie skręconą sprężynę.

Heparyna – polisacharyd zapobiegający krzepnięciu krwi w naczyniach krwionośnych; jest stosowany jako lek przeciwzakrzepowy.

Heterotrofy – organizmy cudzożywne, które nie mają zdolności samodzielnego wytwarzania substancji pokarmowych, korzystają z substancji organicznych organizmów roślinnych lub zwierzęcych.

Hialuronowy kwas – polisacharyd będący składnikiem skóry właściwej oraz mazi stawowej, nadaje im odpowiednią sprężystość i lepkość oraz pełni funkcje odżywcze.

Hipoteza – wstępna odpowiedź na zadane pytanie będące problemem badawczym; próba naukowego wyjaśnienia natury danego zjawiska lub procesu.

Homeostaza – równowaga środowiska wewnętrznego organizmu oraz zdolność organizmu do utrzymania tej równowagi.

Hormon – związek organiczny produkowany w określonej części ciała organizmu wielokomórkowego i transportowany do innej jego części, gdzie wpływa na jej funkcjonowanie.

Hydrofilowy – łatwo łączący się z wodą, z którą ma większe powinowactwo niż cząsteczki wody z sobą.

Hydrofobowy – trudno łączący się z wodą, z którą ma mniejsze powinowactwo niż cząsteczki wody wzajemnie ze sobą.

Hydroliza – reakcja, w której z udziałem wody następuje rozerwanie wiązania kowalencyjnego w związku chemicznym.

Interferencja fal – zjawisko nakładania się dwóch lub więcej fal.

Izomer – jeden z wielu związków posiadających taki sam wzór sumaryczny, ale różną strukturę i różne właściwości.

Jon – atom lub grupa atomów, która utraciła lub zyskała jeden lub więcej elektronów i zyskała w ten

sposób ładunek (dodatni lub ujemny).

Kataliza – zwiększanie szybkości reakcji przez związek chemiczny, który nie ulega zmianom.

Kohezja – spójność, zjawisko wzajemnego przyciągania się cząsteczek tej samej substancji, co umożliwia transport wody nieprzerwanym słupem w cewkach lub naczyniach roślin.

Kompartamenty – przedziały komórkowe; wydzielone, odrębne obszary w komórkach eukariotycznych, tworzone przez siateczkę śródplazmatyczną i organelle otoczone błoną; umożliwiają zachodzenie różnych procesów, często przeciwstawnych.

Komplementarność zasad – sposób parowania (łączenia) się zasad w sąsiednich niciach DNA lub DNA i RNA; cytozyna łączy się z guaniną, adenina w RNA łączy się z uracylem, a w DNA z tyminą.

Konfokalna mikroskopia – odmiana mikroskopii świetlnej o powiększonym kontraście i rozdzielczości; za jej pomocą uzyskuje się obrazy trójwymiarowe.

Konformacja – przestrzenny układ atomów w związku chemicznym, który może podlegać zmianom w wyniku obrotu atomów wokół pojedynczych wiązań chemicznych bez ich zrywania.

Kultura bakteryjna – bakterie wyhodowane na podłożach mikrobiologicznych (pożywkach) mające określone zastosowanie.

Kutykula – woskowa powłoka na łodydze i liściach zapobiegająca nadmiernej utracie wody przez rośliny.

Kwasica mleczanowa – stan chorobowy wywołany przez nagromadzenie się kwasu mlekowego w organizmie.

Kwasy nukleinowe – makrocząsteczki zbudowane z nukleotydów, których rolą jest przechowywanie i przenoszenie informacji genetycznej w komórce. Kwasami nukleinowymi są RNA i DNA.

Limfocyty – komórki układu odpornościowego człowieka należące do krwinek białych – leukocytów – odpowiedzialne za odpowiedź immunologiczną organizmu, czyli rozpoznawanie i zwalczanie chorobotwórczych bakterii i wirusów.

Lipoproteina – kompleks białkowo-lipidowy służący do transportu lipidów we krwi. Lipoproteiny o małej gęstości (LDL) dostarczają cholesterol do wielu komórek ciała, a lipoproteiny o dużej gęstości (HDL) przenoszą cholesterol do wątroby.

Makrofagi – jeden z typów krwinek białych – leukocytów – powstających w czerwonym szpiku kostnym, o dużych rozmiarach, nawet powyżej 20 μm . Uczestniczą w odporności organizmu przez zdolność do fagocytozy m.in. bakterii, wirusów, pierwotniaków, grzybów, fragmentów zniszczonych komórek czy komórek nowotworowych.

Marker molekularny – związek chemiczny, którego obecność lub zmiany stężenia (wzrost, spadek) w analizowanej próbce tkanki wskazuje na pewien stan układu, np. chorobę.

Merystatyczne tkanki – tkanki roślinne zachowujące charakter zarodkowy przez cały okres życia rośliny; umożliwiają wzrost roślin na długość i grubość.

Metabolizm – zbiór wszystkich reakcji chemicznych i przemian energii zachodzących w komórce.

Mezofil – tkanka mięsista liścia pomiędzy górną i dolną epidermą; zachodzi w niej fotosynteza.

Miażdżyca – postępująca choroba polegająca na odkładaniu się lipidów w wewnętrznej ścianie tętnic, co prowadzi do zaburzeń układu sercowo-naczyniowego.

Mikroorganizmy – organizmy, które są widoczne pod mikroskopem. Do mikroorganizmów zaliczamy: bakterie, archeony, protisty i niektóre grzyby.

Mol – liczba gramów substancji odpowiadająca liczbie atomowej lub cząsteczkowej; jeden mol substancji zawiera $6,02 \times 10^{23}$ jednostek, czyli atomów lub cząsteczek (liczba Avogadra).

Monoklonalne przeciwciała – identyczne przeciwciała wytwarzane przez komórki klonu, które powstały z jednej wyjściowej komórki.

Mostek disiarczkowy – wiązanie kowalencyjne utworzone w wyniku utlenienia dwóch grup tiolowych; w białkach mostek dwusiarczkowy łączy dwie cysteiny i powstaje w wyniku utlenienia reszt

tiolowych cysteiny.

Mukopolisacharydy – polisacharydy zbudowane z powtarzających się jednostek disacharydowych (połączenie aminocukru i pochodnej glukozy) oraz grupy siarczanowej. Są m.in. składnikiem chrząstki u zwierząt.

Mureina – substancja cukrowo-peptydowa (peptydoglikan) będąca głównym składnikiem ściany komórkowej bakterii.

Nadtlenek wodoru – nieorganiczny związek chemiczny, utleniacz; powstaje w komórkach oraz jest produkowany syntetycznie; 3-procentowy roztwór nadtlenku wodoru to woda utleniona.

Natywna struktura – struktura białka, w jakiej występuje ono i funkcjonuje w organizmie; naruszenie tej struktury prowadzi do utraty zdolności spełniania naturalnej funkcji białka.

Nefelometria – metoda analizy instrumentalnej służąca do ustalania stężenia roztworów koloidalnych.

Nitryfikacja – proces przekształcania amoniaku (NH_3) w azotan (NO_3^-) przez bakterie glebowe (nitryfikacyjne).

Nukleoid – obszar cytoplazmy komórki prokariotycznej – bakterii, w którym znajduje się genofor.

Oksydoreduktazy – klasa enzymów przeprowadzających reakcje utleniania i redukcji (reakcje redoks).

Oligosacharydy – węglowodany zbudowane z 2–12 reszt cukrów prostych.

Optimum – zakres warunków (np. temperatury, pH) najbardziej sprzyjających czemuś (np. aktywności enzymów).

Osmoza – szczególny rodzaj dyfuzji prostej polegający na przenikaniu rozpuszczalnika przez błonę półprzepuszczalną zgodnie z gradientem stężeń w celu ich wyrównania.

Perystaltyka – rytmiczne fale skurczów i rozkurczów w ścianach moczowodów i jelit. Powodują przesuwanie treści zgromadzonej w tych narządach.

pH – ujemny logarytm stężenia jonów wodoru w roztworze (wyrażany w molach na litr), w roztworach obojętnych $\text{pH} = 7$, w kwaśnych $\text{pH} < 7$, w zasadowych $\text{pH} > 7$.

Pierwiastki biogenne – pierwiastki wchodzące w skład wszystkich związków organicznych (węglowodanów, tłuszczów, białek i kwasów nukleinowych) budujących organizmy żywe (węgiel, wodór, tlen, azot, siarka, fosfor).

Plastochinon – cykliczny, nienasycony organiczny związek chemiczny występujący w chloroplastach komórek roślinnych; przenosi elektrony w fazie jasnej fotosyntezy.

Plastocyjanina – białko zawierające miedź, które uczestniczy w transporcie elektronów w trakcie jasnej fazy fotosyntezy.

Plazmidy – koliste cząsteczki DNA występujące w cytoplazmie komórki prokariotycznej – bakterii i w komórkach grzybów – drożdży. Mają zdolność do samodzielnej syntezy (replikacji) DNA. Znajdują się w nich geny odporności na niekorzystny wpływ środowiska, np. na antybiotyki czy produkcję toksyn.

Plazmoliza – zjawisko w komórkach otoczonych ścianą komórkową, w którym cytoplazma kurczy się, a błona komórkowa odkleja się od ściany komórkowej; zachodzi, gdy komórki tracą wodę (znajdują się w środowisku hipertonicznym).

Podpuszczka – enzym trawienny, który znajduje się w dużych ilościach w śluzówce żołądka cielęcego; wykorzystywana w mleczarstwie do produkcji serów.

Polarna cząsteczka – cząsteczka biegunowa utworzona z atomów o różnej elektroujemności (rozdzielenie ładunku dodatniego i ujemnego).

Protisty – królestwo organizmów eukariotycznych, głównie jednokomórkowych lub prostych wielokomórkowych, przeważnie wodnych.

Przeciwciało – białko (immunoglobulina) wydzielane przez komórki odpornościowe (limfocyty B), które wiąże się do określonego antygenu.

Przeciwciała – swoiste białka, które rozpoznają specyficzne antygeny i wiążą się z nimi; są wytwa-

rzane przez komórki plazmatyczne.

Rekombinacja genetyczna – wymiana materiału genetycznego, w wyniku której powstają nowe kombinacje genów.

Rurki sitowe – żywe komórki wchodzące w skład tkanki przewodzącej – tyka (floemu) roślin okrytonasiennych o poprzecznych ścianach komórkowych zaopatrzonych w pola sitowe, przewodzące asymilaty z liści do wszystkich organów rośliny.

Rybozym – cząsteczka RNA, która działa jak enzym, katalizując reakcje podczas powstawania RNA.

Sarin – silnie toksyczny fosforoorganiczny związek chemiczny stosowany jako bojowy środek trujący, powodujący paraliż i drgawki. Wnika do organizmu poprzez drogi oddechowe i skórę. Dawka śmiertelna to kilkanaście miligramów.

Sekwencja – kolejność ułożenia czterech rodzajów nukleotydów (ACGT w DNA lub ACGU w RNA).

Sekwencjonowanie DNA – ustalanie kolejności (sekwencji) nukleotydów w DNA; przeprowadzane zazwyczaj za pomocą zautomatyzowanych urządzeń (sekwencjatorów).

Somatyczne komórki – wszystkie komórki organizmu z wyjątkiem komórek płciowych.

Stereoizomery – izomery przestrzenne; związki chemiczne, w których atomy połączone są w tej samej kolejności, ale w innym ułożeniu przestrzennym.

Substrat – reagent, składnik wyjściowy w reakcji chemicznej.

Symulacja – odtwarzanie właściwości danego zjawiska, procesu, który występuje w naturze, lecz jest trudny do zbadania czy powtórzenia.

Toksyny bakteryjne – substancje chemiczne wydzielane do środowiska przez żywe bakterie lub po rozpadzie komórki bakteryjnej; są podstawą chorobotwórczości bakterii, gdy dostaną się do żywych organizmów, powodują wiele niebezpiecznych chorób.

Transgeniczny organizm – roślina, zwierzę lub mikroorganizm mający w swoim materiale genetycznym (genomie) obcy (pochodzący z innego organizmu, DNA).

Translacja – synteza białka w komórce polegająca na przetłumaczeniu czteroliterowego alfabetu kwasów nukleinowych na język aminokwasów budujących białko.

Transpiracja – parowanie wody z rośliny przez zewnętrzne powierzchnie (liści i łodyg).

Tubula – włóknista rurkowata sztywna struktura z białka tubuliny; pełni funkcję cytoszkieletu, nadając komórce kształt; bierze udział w transporcie wewnątrzkomórkowym oraz w podziale komórkowym.

Turgor – stan jędrności komórki roślinnej; ciśnienie hydrostatyczne powstające w komórce roślinnej, gdy ciśnienie osmotyczne w jej wnętrzu jest wyższe niż na zewnątrz.

Tylakoidy – otoczone błoną pęcherzyki w chloroplastach zawierające składniki, które umożliwiają pochłanianie światła i syntezę ATP w procesie fotosyntezy.

Tubulina – białko zaliczane do grupy białek globularnych (glikoproteina) budujące mikrotubule uczestniczące w transporcie substancji w komórce, ruchach różnych struktur komórkowych oraz utrzymaniu kształtu komórki.

Wiązanie chemiczne – połączenie między dwoma atomami będące wynikiem współdzielenia elektronów zewnętrznej powłoki lub przyciągania przeciwnych ładunków.

Wiązanie kowalencyjne – typ silnego wiązania chemicznego, w którym dwa atomy dzielą się jedną lub wieloma parami elektronów walencyjnych.

Wiązanie kowalencyjne spolaryzowane – wiązanie kowalencyjne między atomami, które różni się elektroujemnością; uwspólniane elektrony są przyciągane silniej przez bardziej elektroujemny atom, co sprawia, że jest on obdarzony ładunkiem ujemnym, a drugi ładunkiem dodatnim.

Wiązanie wodorowe – typ słabego wiązania, tworzy się, kiedy atom wodoru związany kowalencyjnie z dowolnym atomem elektroujemnym jest równocześnie przyciągany przez inny atom elektroujemny.

Zarodnik – komórka służąca do rozmnażania bezpłciowego u niektórych protistów, grzybów i roślin.

Indeks

A

adenozynotrifosforan 174
adhezja 38
agar 53
aktywatory 185
albuminy 72
aldoza 46
alkaloidy 153
aminocukier 53
aminokwasy 72
amitoza 258
anabolizm 173
anafaza 253
antyport 118
aparat Golgiego 137
apoptoza 259
asymetria błony 110
autoradiografia 18
autotrofy 218

B

białka 70
 globularne 71
 integralne 109
 kanałowe 117
 nośnikowe 117
 powierzchniowe 109
błona biologiczna 108
błonnik pokarmowy 52

C

celuloza 52
centrum aktywne 180
chemosynteza 238
chityna 53
chlorofil 220
chloroplasty 146, 219
cholesterol 64
chromatografia 66
chromosom 89, 126
crossing-over 263
cykl
 Corich 213
 komórkowy 248
 Krebsa 199
 metaboliczny 173
cytokineza 254
cytologia 100

cytoplazma 130
cytoszkiele 130
cytozol 133
cząsteczki
 polarne 36

D

denaturacja 81
desmosomy 157
disacharydy 48
dwuwarstwa lipidowa 63
dyfuzja
 prosta 114
 wspomagana 116

E

endosymbioza 148
elektroforeza 81
endocytoza 119
energia aktywacji 180
enzymy 179
ergosterol 65
euchromatyny 125

F

FAD 177
fagocytoza 119
faza
 ciemna 228
 jasna 225
 M 249
fermentacja 207
 alkoholowa 208
 metanowa 208
 mlekowa 207
fibrynogen 72
filamenty pośrednie 133
fitosterole 65
fosfolipidy 63
fosforylacja 176
fotooddychanie 229
fotorespiracja 139
fotosynteza 217
fotosystem 225
fragmoplast 256
frakcjonowanie komórek 17
fruktoza 48

G

galaktoza 48
glikogen 51
glikogenoliza 212
glikokaliks 110
glikoliza 197
glikozydy 153
glioksysomy 139
glukoneogeneza 212
glukoza 46, 47
gradient protonowy 200

H

histony 88

I

inhibitory 184
interfaza 248
izomer 42

J

jąderko 126
jądro komórkowe 124
jamki 156

K

kariokineza 248
kariolimfa 126
kariotyp 127
karotenoidy 66, 220
karoteny 220
katabolizm 173
ketoza 46
koagulacja 81
koenzym 181
kofaktor 181
kohezja 38
kolagen 71
koloid 38
komórka eukariotyczna 104
komórka prokariotyczna 103
komplementarność zasad 88
konformacja 79
kooperatywność 189
ksantofile 220
kwasy
 nukleinowe 85
 tłuszczowe 59

L

laktaza 49
laktoza 49
lipidy 58
liposom 64
lizosom 138
łańcuch oddechowy 200

M

makrocząsteczka 43
makroelementy 25
maltoza 50
mejoza 262
metabolizm 172
metafaza 252
mikroelementy 28
mikrofilamenty 132
mikroskop
 elektronowy 15
 fluorescencyjny 15
 kontrastowo-fazowy 15
 optyczny 14
 skaningowy 15
 światłowy 13
 transmisyjny 15
mikrotubule 130
mitochondrium 144
mitoza 251
monomer 43
mureina 103

N

nekroza 259
nukleotyd 85

O

obserwacja
 in vitro 18
 in vivo 18
oddychanie beztlenowe 207
oddychanie komórkowe 196
oddziaływania hydrofobowe 34
organizm modelowy 10
organizmy
 beztlenowe 206
 tlenowe 206
osmoza 114

P

paradoks tlenowy 203
peroksysom 139
pierwiastek
 biogeny 25
 chemiczny 25
pinocytoza 119
pirymidyny 85
plastydy 145
plazmodesmy 156
płynność błony 109
podwójna helisa 87
połączenia szczelinowe 158
połączenia zamykające 157
polimer 43
polisacharydy 50
pompa sodowo-potasowa 118
pory jądrowe 125
półdesmosomy 158
próba
 badawcza 10
 kontrolna 10
profaza 251
proteasom 141
puryny 85

R

reakcja pomostowa 198
redoks 176
rośliny CAM 229
roztwór
 hipertoniczny 115
 hipotoniczny 115
 izotoniczny 115
Rubisco 228
rybosomy 140
ryboza 47
rybozym 190
rzędowość białek 77

S

sacharoza 48
siateczka
 gładka 136
 śródplazmatyczna 136
 szorstka 136
skrobia 50
sok jądrowy 124
sole mineralne 40

specyficzność enzymów 182
spektrofotometria 224
stała Michaelisa 186
steroidy 64
stroma 147
struktura
 czwartorzędowa 80
 drugorzędowa 79
 pierwszorzędowa 78
 trzeciorzędowa 79
szlak metaboliczny 173
ściana komórkowa 154

T

telofaza 253
tłuszcze właściwe 59
tonoplast 152
transport
 aktywny 117
 bierny 114
 makrocząsteczek 119
trypsynogen 187
tylakoidy 147

U

ultraelementy 30
uniport 117
uwodornienie 61

W

wakuole 152
węglowodany 45
wiązanie
 chemiczne 31
 jonowe 33
 kwalencyjne 32
 peptydowe 76
 wodorowe 34
wirowanie
 różnicowe 17
 w gradiencie gęstości 17
woda 36
wodniczki 153
woski 62

Z

zasady
 azotowe 85
związek
 chemiczny 24