



## RuBisCO – dwa oblicza enzymu

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Grafika interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



RuBisCO jest stosunkowo wolno działającym enzymem. W ciągu jednej sekundy przyłącza tylko trzy cząsteczki substratu, dlatego w komórkach roślin obecna jest duża ilość tego enzymu.

Źródło: Pixabay, domena publiczna.

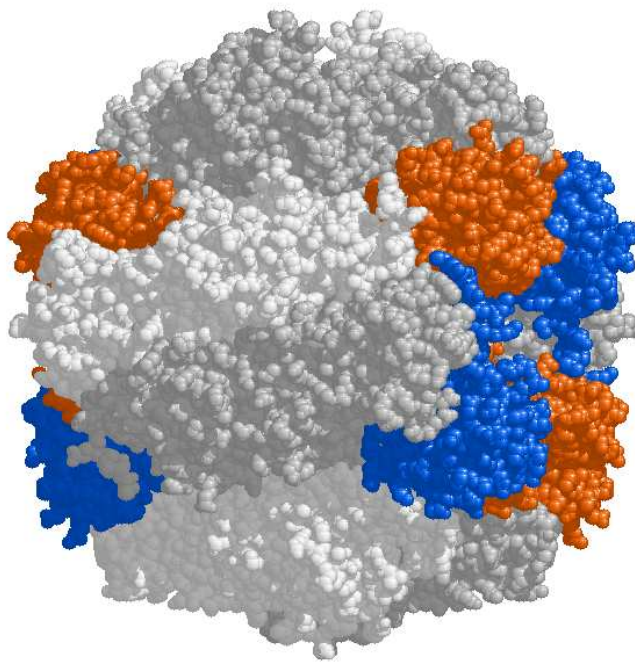
Enzym RuBisCO jest najprawdopodobniej najliczniej występującym białkiem na Ziemi. W komórkach roślin stanowi około 50% wszystkich białek obecnych w chloroplastach. RuBisCO uczestniczy w fazie ciemnej fotosyntezy, w której katalizuje reakcję przyłączania dwutlenku węgla do rybulozo-1,5-bisfosforanu. Aktywność katalityczna enzymu ulega zmianie pod wpływem warunków środowiska. Skąd stwierdzenie o dwóch obliczach enzymu?

### **Twoje cele**

- Opiszysz budowę enzymu RuBisCO.
- Przedstawisz proces aktywacji enzymu RuBisCO.
- Scharakteryzujesz reakcję karboksylacji i oksygenacji rybulozo-1,5-bisfosforanu przy udziale RuBisCO.
- Wykażesz związek między warunkami środowiska a aktywnością katalityczną RuBisCO.

## Enzym RuBisCO

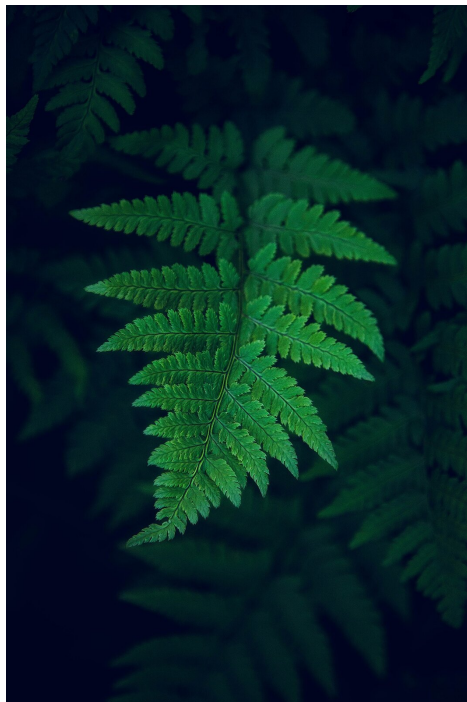
RuBisCO to [enzym](#) obecny w komórkach większości organizmów [autotroficznych](#): archeonów, bakterii zielonych i purpurowych, sinic, protistów roślinopodobnych oraz roślin. Częsteczka enzymu składa się z dwóch rodzajów podjednostek: większych i mniejszych. Podjednostki większe tworzą zasadniczą część cząsteczki enzymu, tzw. rdzeń i odpowiadają za funkcje katalityczne. Są kodowane przez geny chloroplastowe. Na biegunach cylindrycznego rdzenia znajdują się dwa pierścienie utworzone z podjednostek mniejszych, których obecność wpływa na aktywność katalityczną enzymu. Podjednostki mniejsze są kodowane przez geny jądrowe.



Struktura enzymu RuBisCO. Podjednostki duże w kolorze szarym, podjednostki małe w kolorach niebieskim i pomarańczowym.

Źródło: Wikimedia Commons, domena publiczna.

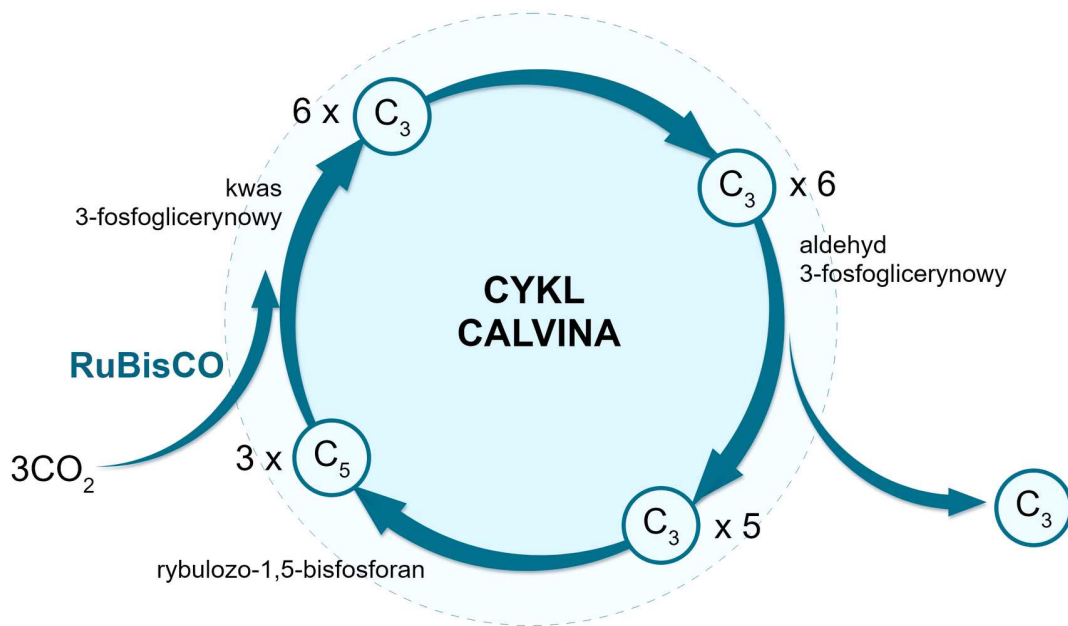
## Karboksylacja przy udziale RuBisCO



Karboksylacja jest prowadzona w liściach wszystkich roślin fotosyntetyzujących.

Źródło: Pixabay, domena publiczna.

RuBisCO katalizuje reakcję **karboksylacji** rybulozo-1,5-bisfosforanu (RuBP). Karboksylacja polega na przyłączeniu cząsteczki  $\text{CO}_2$  do RuBP po wcześniejszej aktywacji enzymu. Aktywacja RuBisCO polega na przyłączeniu cząsteczki  $\text{CO}_2$  i jonu  $\text{Mg}^{2+}$  do lizyny – aminokwasu obecnego w centrum aktywnym enzymu. Przyłączona cząsteczka dwutlenku węgla nie jest substratem, a jedynie związkiem aktywującym, decydującym o prawidłowym umieszczeniu jonu  $\text{Mg}^{2+}$  w centrum aktywnym enzymu. Jon magnezu jest właściwym **kofaktorem** RuBisCO. Dopiero wówczas aktywny katalitycznie enzym przyłącza do **centrum aktywnego**:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i RuBP. Produktem pośrednim reakcji karboksylacji jest nietrwały związek sześciowęglowy, który natychmiast rozpada się na dwie cząsteczki związku trójwęglowego – kwasu 3-fosfoglicerynowego (PGA). Reakcja karboksylacji zachodzi w czasie pierwszej reakcji fazy ciemnej fotosyntezy, zwanej **cyklem Calvina**. W dalszym etapie tego cyklu PGA zostaje zredukowany do aldehydu 3-fosfoglicerynowego (PGAL), który częściowo jest przekształcany do **heksoz** będących źródłem energii, jak i służy do odtwarzania RuBP.

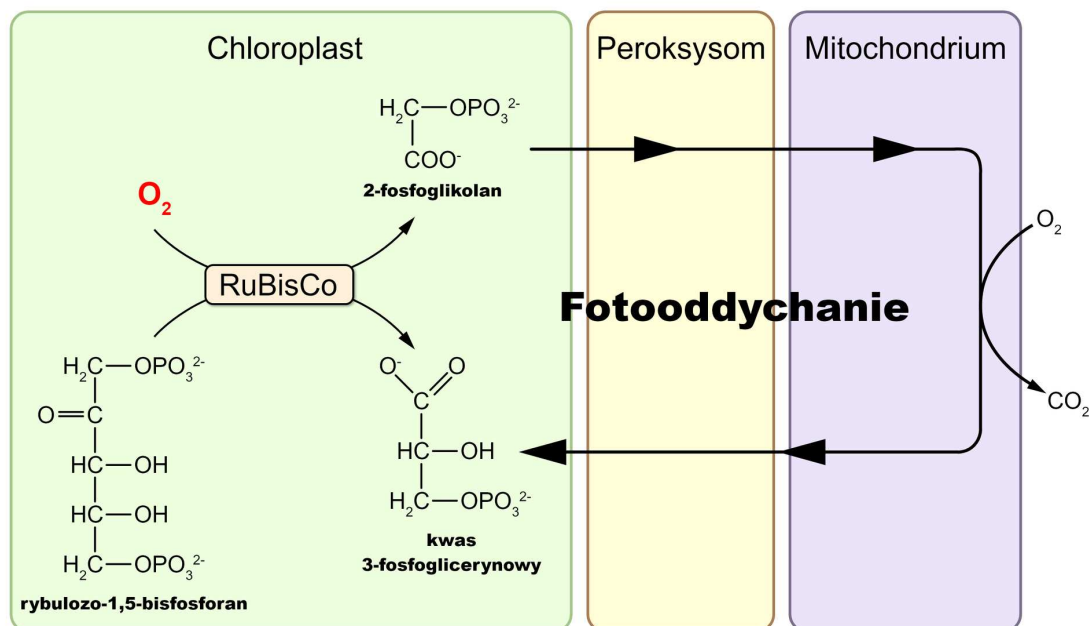


Uproszczony przebieg cyklu Calvina. C z liczbą w indeksie dolnym oznacza substrat o danej liczbie atomów węgla. Liczba ze znakiem mnożenia oznacza ilość cząsteczek tego substratu biorących udział w pojedynczym cyklu – udział w powstaniu jednej cząsteczki triozy jako zysku netto.

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

## Oksygenacja przy udziale RuBisCO

RuBisCO katalizuje również reakcję **oksygenacji** rybulozo-1,5-bisfosforanu (RuBP). Oksygenacja polega na przyłączeniu cząsteczki  $O_2$  do RuBP. Produktami reakcji oksygenacji są: jedna cząsteczka kwasu 3-fosfoglicerynowego (PGA) i jedna cząsteczka 2-fosfoglikolanu (PG). PGA ulega dalszym przekształceniom w cyklu Calvina, jednak wydajność fotosyntezy jest mniejsza. Natomiast 2-fosfoglikolan, jako związek dwuwęglowy, ulega przekształceniom w czasie złożonych reakcji **fotooddechania** w peroksysomach i mitochondriach.



Uogólniony przebieg fotooddychania.

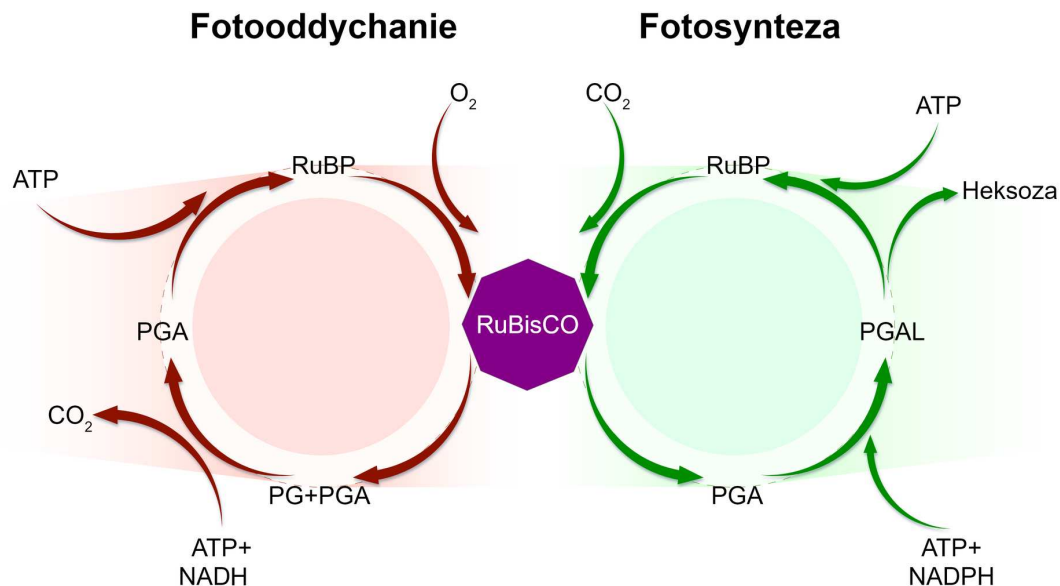
Źródło: Na podstawie Wikimedia Commons, Yikrazuul, Englishsquare.pl sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

## Wpływ warunków środowiska na aktywność katalityczną RuBisCO

W sprzyjających warunkach środowiska, przy odpowiednim natężeniu światła i umiarkowanej temperaturze aparaty szparkowe roślin są otwarte. Umożliwia to usuwanie pary wodnej z przestrzeni powietrznych w roślinie i pobieranie  $CO_2$  z otoczenia, pozwalając zachować wysoki stosunek  $CO_2$  do  $O_2$ . Duża zawartość dwutlenku węgla w tkankach liścia sprawia, że karboksylacja RuBP prowadzona przez RuBisCO przeważa nad jego oksygenacją przez ten enzym (w optymalnych warunkach dla roślin  $C_3$  stosunek wiązania przez RuBisCO  $CO_2$  do  $O_2$  wynosi 4:1). W niesprzyjających warunkach środowiska, przy zbyt dużym natężeniu światła i wysokiej temperaturze aparaty szparkowe roślin są zamknięte. Nie zachodzi wówczas wymiana gazowa, co uniemożliwia pobieranie  $CO_2$  z otoczenia i w tkankach liścia pojawia się niski stosunek  $CO_2$  do  $O_2$ . Duża zawartość tlenu w tkankach liścia sprawia, że RuBisCO przeprowadza intensywniej reakcję oksygenacji RuBP.

## Właściwości RuBisCO

Enzym RuBisCO wykazuje powinowactwo zarówno do dwutlenku węgla, jak i do tlenu. Szczególne właściwości RuBisCO znajdują odzwierciedlenie w nazewnictwie enzymu – ostatnie dwie litery pochodzą od angielskich słów *Carboxylase* (karboksylaza) i *Oxygenase* (oksygenaza), przedrostek natomiast wywodzi się z substratu *Ribulose Biphosphate* (rybulozo-1,5-bisfosforan).



Dwa oblicza enzymu RuBisCO.

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

## Słownik

### centrum aktywne

inaczej miejsce aktywne; część enzymu bezpośrednio zaangażowana w przebieg reakcji chemicznej; zawiera grupy funkcyjne kilku aminokwasów łączące się z substratem lub substratami za pomocą słabych wiązań niekowalencyjnych

### karboksylacja

rodzaj reakcji chemicznej polegającej na przyłączeniu dwutlenku węgla do innego związku chemicznego w wyniku czego powstaje kwas karboksylowy

### oksygenacja

rodzaj reakcji chemicznej polegającej na przyłączeniu tlenu do innego związku chemicznego

### autotrofizm

inaczej samożywność; zdolność organizmu do syntezy złożonych związków organicznych z prostych związków nieorganicznych przy udziale energii świetlnej (fotosynteza) lub energii chemicznej (chemosynteza)

### **cykl Calvina**

inaczej cykl Calvina-Bensona; cykl biochemiczny zachodzący w stromie chloroplastów w komórkach roślin; faza ciemna fotosyntezy – niezależna od światła, ale wykorzystująca produkty fazy jasnej fotosyntezy: ATP i NADPH; dzieli się na trzy etapy: karboksylacji, redukcji i regeneracji; polega na przekształceniu dwutlenku węgla w glukozę

### **enzym**

biokatalizator; zazwyczaj białko (rzadziej cząsteczka RNA) zdolne do obniżenia energii aktywacji powodując przyspieszenie przebiegu reakcji chemicznej

### **fotooddychanie**

proces zachodzący w obecności światła, polegający na pobieraniu tlenu ( $O_2$ ) i wydzielaniu dwutlenku węgla ( $CO_2$ ) przez komórki fotosyntetyzujących roślin

### **heksoza**

cukier prosty (monosacharyd) zbudowany z 6 atomów węgla, np. glukoza

### **kofaktor**

część niebiałkowa enzymu, łącząca się z częścią białkową za pomocą wiązań niekowalencyjnych lub kowalencyjnych; składnik nadający aktywność katalityczną

## Dwa oblicza enzymu RuBisCo

Dwufunkcyjność enzymu RuBisCO.

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

### Polecenie 1

Wykaż dwufunkcyjność enzymu RuBisCO.

### Polecenie 2

Określ znaczenie enzymu RuBisCO w procesie fotooddychania. Podaj, w jaki sposób aktywność RuBisCO może przyczynić się do obniżenia wydajności fotosyntezy.

# Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

## Ćwiczenie 1



Zaznacz błędne stwierdzenie dotyczące enzymu RuBisCO.

- ☐ Inna nazwa tego związku to dekarboksylaza rybulozo-1,5-bisfosforanu.
- ☐ RuBisCO stanowi nawet 50% wszystkich rozpuszczalnych białek w liściach roślin fotosyntetyzujących.
- ☐ RuBisCO ma właściwości enzymatyczne.
- ☐ RuBisCO odgrywa szczególnie ważną rolę w cyklu Calvina.

## Ćwiczenie 2



Zaznacz nazwy reakcji biochemicznych, które katalizuje enzym RuBisCO.

- ☐ Dekarboksylacja
- ☐ Hydratacja
- ☐ Oksygenacja
- ☐ Karboksylacja
- ☐ Deaminacja

### Ćwiczenie 3



Uzupełnij poniższe zdania w taki sposób, aby przedstawiały prawdziwe informacje na temat enzymu RuBisCO.

RuBisCO to białko, które do prawidłowego funkcjonowania wymaga . Proces ten wymaga obecności jonów , które pełnią w tym przypadku rolę . Dzięki temu procesowi enzym RuBisCO zdolny jest do katalizowania reakcji przyłączenia cząsteczki  do  w miejscu aktywnym.

rybulozo-1,3-bisfosforanu

defosforylacji

CO<sub>2</sub>

magnezu

inhibitora

wapnia

aktywacji

rybulozo-1,5-bisfosforanu

kofaktora

H<sub>2</sub>

### Ćwiczenie 4



Przyporządkuj podanym pojęciom odpowiadające im definicje.

Karboksylacja

Związek organiczny, będący pierwotnym produktem fotosyntezy.

Oksygenacja

Reakcja chemiczna, polegająca na przyłączeniu tlenu.

Kofaktor

Reakcja chemiczna, polegająca na przyłączeniu dwutlenku węgla.

Aldehyd 3-fosfoglicerynowy

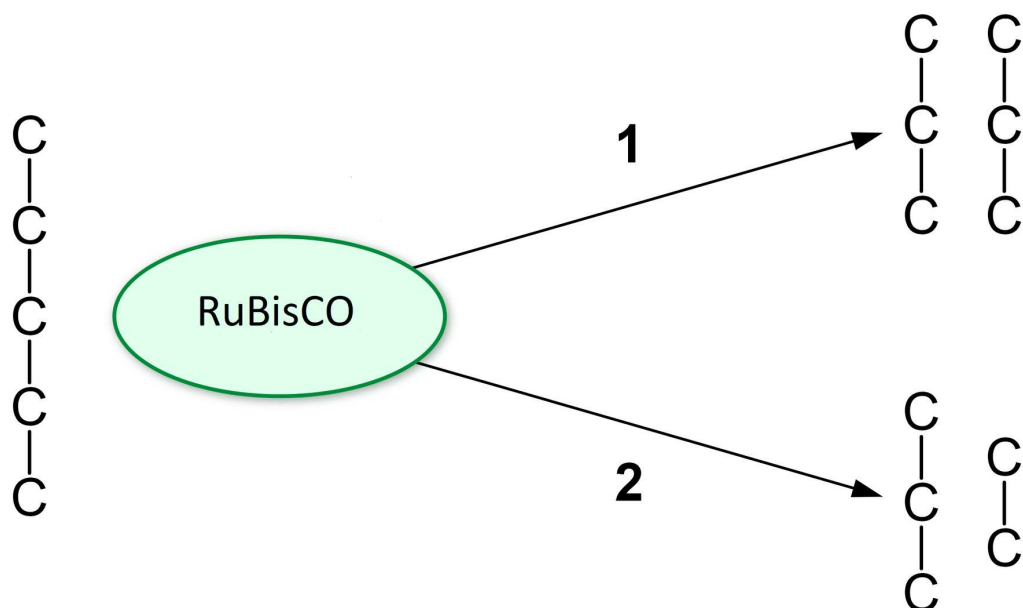
Niebiałkowy składnik niezbędny do katalitycznej aktywności wielu enzymów.

## Ćwiczenie 5



Oceń, czy poniższe stwierdzenia dotyczące reakcji metabolicznych zachodzących w komórkach roślin są prawdziwe. Zaznacz "Prawda" jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo "Fałsz" - jeśli jest fałszywe.

|                                                                               | Prawda                | Fałsz                 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fotooddychanie zapoczątkowywane jest w stromie chloroplastów.                 | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Fosfoglikolan jest produktem reakcji karboksylacji z udziałem enzymu RuBisCO. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Karboksylacja zachodzi w liściach wszystkich roślin fotosyntetyzujących.      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |



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

Na schemacie przedstawiono dwie reakcje, w których uczestniczy enzym RuBisCO. Na podstawie powstających produktów przyporządkuj nazwy rodzajów reakcji chemicznych do odpowiednich cyfr 1 lub 2.

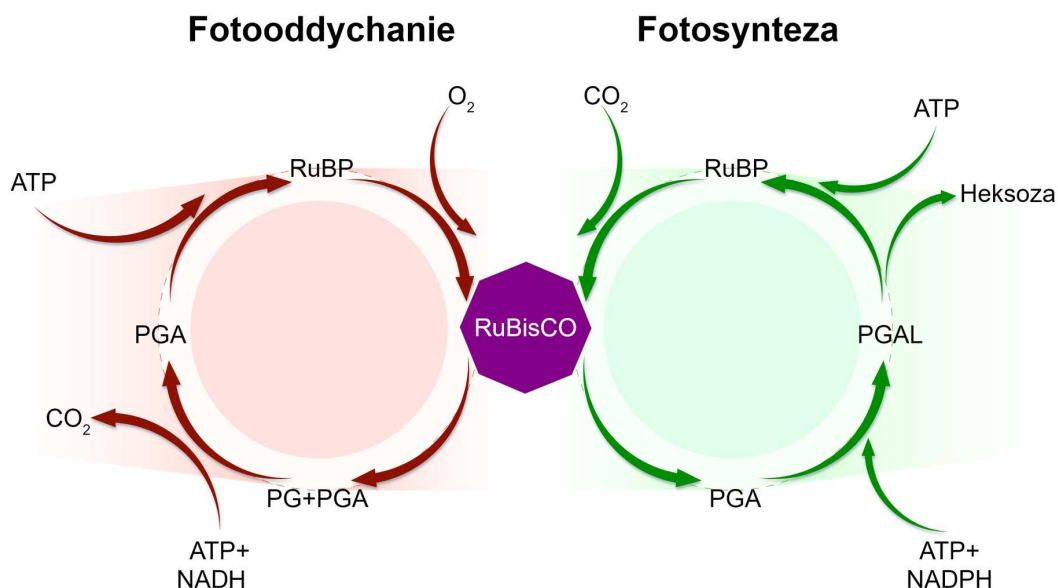
1

Karboksylacja

2

Oksygenacja

## Ćwiczenie 7



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

Wyjaśnij, dlaczego oksigenacja rybulozo-1,5-bisfosforanu wiąże się z niższą wydajnością fotosyntezy niż karboksylacja tego związku. W odpowiedzi odnieś się do informacji widocznych na schemacie.

## Ćwiczenie 8



Podczas gorących i suchych dni rośliny zamykają swoje aparaty szparkowe, co chroni je przed utratą wody w drodze parowania. Dochodzi do spadku stężenia dwutlenku węgla w komórkach roślinnych, wzrasta natomiast stężenie tlenu.

Wskaż, w jaki sposób roślina może w przedstawionych warunkach syntetyzować kwas 3-fosfoglicerynowy.

# Dla nauczyciela

---

**Autor:** Anna Juwan

**Przedmiot:** Biologia

**Temat:** RuBisCO – dwa oblicza enzymu

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

**Podstawa programowa:**

Zakres rozszerzony

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

III. Energia i metabolizm.

4. Fotosynteza. Uczeń:

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

**Kształtowane kompetencje kluczowe:**

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

**Cele operacyjne (językiem ucznia):**

- Opiszysz budowę enzymu RuBisCO.
- Przedstawisz proces aktywacji enzymu RuBisCO.
- Scharakteryzujesz reakcję karboksylacji i oksigenacji rybulozo-1,5-bisfosforanu przy udziale RuBisCO.
- Wykażesz związek między warunkami środowiska a aktywnością katalityczną RuBisCO.

**Strategie nauczania:**

- konstruktywizm;
- konektywizm.

**Metody i techniki nauczania:**

- z użyciem komputera;
- rozmowa kierowana;
- ćwiczenia interaktywne;

- analiza grafiki interaktywnej;
- gra dydaktyczna;
- mapa pojęć.

### **Formy pracy:**

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

### **Środki dydaktyczne:**

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

### **Przed lekcją:**

1. **Przygotowanie do zajęć.** Nauczyciel loguje się na platformie i udostępnia uczniom e-materiał „RuBisCO – dwa oblicza enzymu”. Prosi uczestników zajęć o rozwiązanie ćwiczenia nr 1 z sekcji „Sprawdź się” na podstawie treści w sekcji „Przeczytaj”.

### **Przebieg lekcji**

#### **Faza wstępna:**

1. Nauczyciel wyświetla zawartość sekcji „Wprowadzenie”. Uczniowie wspólnie z nauczycielem omawiają cele lekcji i określają kryteria sukcesu.
2. **Wprowadzenie do tematu.** Nauczyciel wyświetla grafikę interaktywną zawartą w e-materiale, przedstawiającą dwufunkcyjność enzymu RuBisCO, i wspólnie z uczniami dokonuje jej analizy. Prowadzący prosi wybranego ucznia o przeczytanie pytania znajdującego się we wprowadzeniu: „Skąd stwierdzenie o dwóch obliczach enzymu?” i rozpoczęcie rozmowy na podstawie grafiki interaktywnej oraz przeczytanego przed lekcją tekstu.

#### **Faza realizacyjna:**

1. **Praca z tekstem.** Uczniowie indywidualnie zapisują pięć najważniejszych ich zdaniem kwestii poruszanych w tekście, z którym zapoznali się przed lekcją. Następnie w parach porównują swoje wybory. Nauczyciel prosi wybrane pary o podsumowanie swojej pracy.
2. Nauczyciel wprowadza uczniów w treść polecenia nr 2 („Określ znaczenie enzymu RuBisCO w procesie fotooddychania”). Uczniowie opracowują je w parach, a następnie porównują swoje rozwiązanie z innym zespołem.

**3. Utrwalenie wiedzy i umiejętności.** Nauczyciel dzieli klasę na 4-osobowe grupy.

Uczniowie rozwiązują ćwiczenia interaktywne od 2 do 6 z sekcji „Sprawdź się”, od najłatwiejszego do najtrudniejszego. Grupa, która poprawnie rozwiąże zadania jako pierwsza, wygrywa.

**Faza podsumowująca:**

1. Klasa wspólnie wykonuje mapę pojęć podsumowującą zajęcia.
2. Nauczyciel wyświetla treści zawarte w sekcji „Wprowadzenie” i na ich podstawie dokonuje podsumowania najważniejszych informacji przedstawionych na lekcji. Wyjaśnia także wątpliwości uczniów.

**Praca domowa:**

1. Wykonaj ćwiczenia nr 7 i 8 z sekcji „Sprawdź się”.

**Materiały pomocnicze:**

- Neil A. Campbell i in., „Biologia Campbella”, tłum. K. Stobrawa i in., Rebis, Poznań 2019.
- „Encyklopedia szkolna. Biologia”, red. Marta Stęplewska, Robert Mitoraj, Wydawnictwo Zielona Sowa, Kraków 2006.

**Dodatkowe wskazówki metodyczne:**

- Nauczyciel może wykorzystać medium zamieszczone w sekcji „Grafika interaktywna” do podsumowania lekcji.