

Joanna Lilpop



LEKCJA DOŚWIADCZALNA

PRZEWODNIKI SZKOŁY EDUKACJI



SZKOŁA
EDUKACJI

POLSKO-AMERYKAŃSKIEJ FUNDACJI
WOLNOŚCI I UNIwersYTETU
WARSZAWSKIEGO

Joanna Lilpop



LEKCJA DOŚWIADCZALNA

PRZEWODNIKI SZKOŁY EDUKACJI

SPIS TREŚCI

LEKcja BIOLOGII METODĄ BADAWCZĄ	5
Doświadczenie, eksperyment, obserwacja	8
Z jakich umiejętności składa się rozumowanie naukowe	9
Organizacja pracy – jak zacząć pracę z młodymi badaczami	14
Dobre praktyki podczas pracy doświadczalnej z uczniami	16
Organizacja końca lekcji z młodymi badaczami	22
O eksperymentach proponowanych w poradniku Literatura	23
	24
BADANIE INTENSYWNOŚCI FOTOSYNTETY W ROŚLINACH	25
Planowanie i prowadzenie doświadczeń badających intensywność fotosyntezy	28
Jakich błędów unikać, obserwując fotosyntezę?	33
Jakie doświadczenie przeprowadzisz?	34
Procedura 1. Obserwacja wydzielania tlenu przez rośliny wodne	35
Procedura 2. Obserwacja fotosyntezy za pomocą krążków z liści	40
Procedura 3. Badanie fotosyntezy w wirtualnym laboratorium	43
Zadania pogłębiające rozumienie	45
BADANIE OBECNOŚCI SKROBI W LIŚCIACH	54
Procedura. Badanie obecności skrobi w liściach	56
Wytłumaczenie obserwowanego zjawiska	57
Dobre praktyki	57
Źródła dodatkowych materiałów:	60
OBSERWACJA BARWNIKÓW ROŚLINNYCH	61
Procedura. Obserwacja barwników roślinnych	64
Wytłumaczenie obserwowanego zjawiska	66
Dobre praktyki	68
Jakich błędów unikać, prowadząc to doświadczenie	69
Bezpieczeństwo	70
Zadania pogłębiające rozumienie	70
Źródła dodatkowych materiałów	72

LEKCJA BIOLOGII METODĄ BADAWCZĄ

OPRACOWANIE: JOANNA LILPOP

W PORADNIKU NA TEMAT METODY BADAWCZEJ NA LEKCJACH BIOLOGII ZNAJDZIESZ:

- Teoretyczne podstawy dydaktyki opartej o dociekanie naukowe;
- Wyjaśnienia terminów: doświadczenie, eksperyment, obserwacja;
- Opis umiejętności, z jakich składa się rozumowanie naukowe i proponowane obszary rozwoju uczniowskiego, według których można projektować poszczególne lekcje, ćwiczenia i działy programu nauczania;
- Dobre praktyki organizacji lekcji badawczych z uczniami.

Przedmioty przyrodnicze w szkole pełnią szczególną rolę edukacyjną. Po pierwsze mają za zadanie zapoznać uczniów z głównymi pojęciami opisującymi świat przyrody, przedstawić procesy i zależności w nim występujące oraz doprowadzić do ich głębokiego zrozumienia. Po drugie, przedmioty przyrodnicze mają na celu przedstawienie metod naukowego poznania świata oraz narzędzi myślowych, które pozwalają samodzielnie eksplorować przyrodę. Na lekcjach przedmiotów przyrodniczych powinniśmy traktować uczniów jak naukowców. Każdy uczeń, poznający nowe dla niego zjawisko przyrodnicze, staje się badaczem i odkrywcą. Buduje swoje własne rozumienie świata, opierając się na swojej dotychczasowej wiedzy, zadając pytania i poszukując odpowiedzi poprzez czytanie literatury, obserwację i prowadzenie doświadczeń, słuchanie wyjaśnień definicji oraz wnioskowanie. Nawet najbardziej znane szkolne doświadczenie, w oczach nowego ucznia będzie dla niego zagadką, a wyniki zaprowadzą go do osobistego odkrycia praw przyrody. Osobiste obserwacje i odkrycia tworzą zbiór wiedzy o świecie stanowiący fundament umiejętności i wiadomości służący badaniu i rozumieniu świata w dorosłym życiu.

Z idei traktowania ucznia jako osoby uczącej się i odkrywającej świat na podobieństwo ludzi nauki, zrodziła się dydaktyka przedmiotów przyrodniczych oparta o dociekanie naukowe – *Inquiry Based Science Education (IBSE)*. Dociekanie naukowe to intencjonalny proces polegający na obserwacji wynikającej z ciekawości, na dostrzeganiu i formułowaniu problemu, poszukiwaniu infor-

macji, stawianiu hipotez, planowaniu badań sprawdzających hipotezy, eksperymentowaniu i modelowaniu, a następnie krytycznej analizie, wnioskowaniu, formułowaniu argumentów i dyskusji. Stanowi spójny cykl działań służących poszukiwaniu odpowiedzi na intrygujące pytanie i testowaniu różnych rozwiązań. Jest naturalnym sposobem poznawania otaczającego świata zarówno przez dziecko jak i dorosłego naukowca. Nauczanie przez dociekanie naukowe ma swoje źródła także w teorii pedagogicznego konstruktywizmu zakładającej, że w umyśle osoby uczącej się zachodzi proces nadawania znaczenia doświadczeniu, łączenia nowej wiedzy z tą wcześniej posiadaną, konstruowania nowych pojęć w oparciu o interakcje z otoczeniem (Maciejowska, 2018).

Pojęcie rozumowania w naukach przyrodniczych (ang. *Science Literacy*) zostało zdefiniowane i wprowadzone na światową skalę do dydaktyk przedmiotowych w programie międzynarodowej oceny umiejętności uczniów PISA. Określa ono zdolność do rozumienia, analizowania i stosowania informacji naukowych. Składają się na nie trzy obszary:

- wiedza o treściach nauki, czyli znajomość faktów, pojęć i teorii naukowych opisujących ożywiony i nieożywiony świat przyrody;
- wiedza o procedurach badawczych, czyli znajomość kroków metody naukowej i umiejętność ich zastosowania do badania rzeczywistości przyrodniczej i rozwiązywania problemów;
- wiedza o poznaniu naukowym, czyli świadomość, skąd biorą się wyniki badań naukowych, rozumienie ich logicznych podstaw, umiejętność weryfikacji dowodów naukowych i ocena wiarygodności źródeł. (Federowicz, 2017).

Podstawa programowa przedmiotu biologia wskazuje następujące cele kształcenia związane z rozwijaniem kompetencji obszaru *Science Literacy*:

Rozwijanie myślenia naukowego; doskonalenie umiejętności planowania i przeprowadzania obserwacji i doświadczeń oraz wnioskowania w oparciu o wyniki badań. Uczeń:

- 1) określa problem badawczy, formułuje hipotezy, planuje i przeprowadza oraz dokumentuje obserwacje i proste doświadczenia biologiczne;
- 2) określa warunki doświadczenia, rozróżnia próbę kontrolną i badawczą;
- 3) w oparciu o proste analizy statystyczne opracowuje, analizuje i interpretuje wyniki badań;
- 4) ocenia poprawność zastosowanych procedur badawczych oraz formułuje wnioski;
- 5) przeprowadza celowe obserwacje mikroskopowe i makroskopowe.

Podstawa programowa przedmiotu biologia wskazuje następujące cele kształcenia związane z rozwijaniem kompetencji obszaru *Science Literacy*:

Rozwijanie myślenia naukowego; doskonalenie umiejętności planowania i przeprowadzania obserwacji i doświadczeń oraz wnioskowania w oparciu o wyniki badań. Uczeń:

- 1) określa problem badawczy, formułuje hipotezy, planuje i przeprowadza oraz dokumentuje obserwacje i proste doświadczenia biologiczne;
- 2) określa warunki doświadczenia, rozróżnia próbę kontrolną i badawczą;
- 3) w oparciu o proste analizy statystyczne opracowuje, analizuje i interpretuje wyniki badań;
- 4) ocenia poprawność zastosowanych procedur badawczych oraz formułuje wnioski;
- 5) przeprowadza celowe obserwacje mikroskopowe i makroskopowe.

Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych. Uczeń:

- 1) wykorzystuje różnorodne źródła i metody pozyskiwania informacji;
- 2) odczytuje, analizuje, interpretuje i przetwarza informacje tekstowe, graficzne, liczbowe;
- 3) odróżnia wiedzę potoczną od uzyskanej metodami naukowymi;
- 4) odróżnia fakty od opinii;
- 5) objaśnia i komentuje informacje, posługując się terminologią biologiczną;
- 6) odnosi się krytycznie do informacji pozyskanych z różnych źródeł, w tym internetowych.

Rozumowanie i zastosowanie nabytej wiedzy do rozwiązywania problemów biologicznych. Uczeń:

- 1) interpretuje informacje i wyjaśnia związki przyczynowo-skutkowe między procesami i zjawiskami, formułuje wnioski;
- 2) przedstawia opinie i argumenty związane z omawianymi zagadnieniami biologicznymi;
- 3) wyjaśnia zależności między organizmami oraz między organizmem a środowiskiem;
- 4) wykazuje, że różnorodność organizmów jest wynikiem procesów ewolucyjnych.

ROZPORZĄDZENIE MINISTRA EDUKACJI NARODOWEJ z dnia 30 stycznia 2018 r. w sprawie podstawy programowej kształcenia ogólnego dla liceum ogólnokształcącego, technikum oraz branżowej szkoły II stopnia

Złożona umiejętność rozumowania naukowego, odpowiednio ćwiczona i kształtowana w szkole, jest niezbędnym elementem funkcjonowania nowoczesnego społeczeństwa, które umożliwia jednostkom zrozumienie, analizowanie i stosowanie informacji naukowych w codziennym życiu. To umiejętność, która nie tylko wspiera podejmowanie świadomych decyzji, ale także pozwala na aktywne uczestnictwo w społeczeństwie oraz przeciwdziałanie dezinformacji. Na tle zapisów polskich podstaw programowych wszystkich przedmiotów przyrodniczych, biologia wyróżnia się precyzyjnie określonymi przedmiotowymi celami kształcenia, w których strukturze odzwierciedlono spójny system *Science Literacy* - zarówno w punktach dotyczących stosowania metody naukowej, jak i pracy na materiałach źródłowych i sposobów rozwiązywania problemów biologicznych. Ten spójny system celów pojawia się na

lekcjach biologii w piątej klasie szkoły podstawowej i rozwijany jest aż do klas maturalnych, także (a może przede wszystkim) dla osób niewybierających rozszerzonego programu z biologii. Nauczyciele mają więc pełne prawo i obowiązek realizowania tych zapisów projektując programy kształcenia i poszczególne lekcje biologii mimo, że w podręcznikach cele te pojawiają się zaledwie wyrywkowo w ramach niewielkiego, pojedynczego rozdziału poświęconego strukturze metody naukowej.

Kiedy zatem prowadzić doświadczenia z uczniami? Najlepiej stopniowo, od najwcześniejszych lat edukacji oraz regularnie i jak najczęściej. Ograniczenia systemowe, takie jak mała liczba godzin lekcji biologii, rozbudowane treści nauczania do realizacji, skromne zaplecze czy liczne zespoły klasowe są oczywistymi czynnikami utrudniającymi omawiane podejście. Jednak nowoczesny system edukacji i wyzwania współczesności wymagają jego zmiany i przeformułowania priorytetów działań edukacyjnych. Dlatego w niniejszym poradniku staramy się kompleksowo omówić dobre praktyki związane z rozwijaniem rozumowania naukowego i prowadzeniem prostych doświadczeń zawartych w podstawie programowej.

Doświadczenie, eksperyment, obserwacja

Te trzy pojęcia występują w dydaktyce przedmiotów przyrodniczych naprzemiennie i stanowią wyzwanie związane z uporządkowaniem ich definicji i znaczenia. O ile naukowcy nie rozróżniają definicyjnie pojęcia doświadczenia od eksperymentu, wśród dydaktyków w Polsce trwa spór czy doświadczenie i eksperyment to to samo, czy też powinniśmy je rozróżniać. Środowisko dydaktyków chemii jest skłonne rozróżniać ich definicje, a w podstawie programowej z 2017 roku w przedmiocie przyroda pojawiło się wymaganie związane z ich rozróżnianiem. W starszych podręcznikach szkolnych do biologii nie rozróżnia się ich, traktując je jako synonimy i stosując wymiennie. Jest to zbieżne z nomenklaturą anglojęzyczną, gdzie „*experiment*” to po prostu działanie badawcze zgodne ze schematem metody naukowej. Niektóre nowsze podręczniki szkolne przedmiotów przyrodniczych starają się wprowadzić rozróżnienie pomiędzy tymi pojęciami, zgodnie z którymi:

„**Doświadczenia** wykonuje się z góry ustalonym wynikiem, ponieważ były one już wcześniej przez kogoś przeprowadzone i jest dostępna do nich instrukcja.

Eksperymenty podejmuje się w celu uzyskania nowych informacji na dany temat, np. zbadania niezbadanych wcześniej procesów. Są działaniami unikalnymi, ale mogą być powtarzane dla potwierdzenia wyników.” [Zintegrowana Platforma Edukacyjna, <https://zpe.gov.pl/a/poznawanie-swiata-organizmow/DPK7C1464> dostęp 06.2024]

Takie rozróżnienie nie jest jednak zgodne z podejściem nauczania przez dociekanie naukowe i zasadami konstruktywizmu. Zgodnie z nimi każde wykonane przez ucznia doświadczenie jest dla niego nowe i stanowi element budowania jego osobistej wiedzy o świecie i procesach przyrodniczych. Postulujemy zatem pozostanie przy synonimicznym użyciu obu pojęć i tak też będziemy je stosować w niniejszym poradniku.

Obserwacja przyrodnicza jest celowym, systematycznym i uważnym procesem zbierania danych o zjawisku lub organizmie. Obserwacja jest pojęciem złożonym, które można rozpatrywać na różnych poziomach znaczenia:

- może stanowić samodzielne narzędzie badawcze służące opisaniu i interpretowaniu danego zjawiska występującego w przyrodzie, szczególnie w przypadkach, gdy niemożliwe jest przeprowadzenie kontrolowanych doświadczeń. W biologii terenowej obserwacja często realizowana jest w warunkach środowiskowych, gdzie opisowi lub rozpoznaniu podlegają naturalnie występujące obiekty i procesy;
- może być punktem startowym jako wstęp do dalszych badań o charakterze eksperymentalnym;
- albo stanowić etap gromadzenia danych ilościowych i jakościowych w zaprojektowanym doświadczeniu kontrolowanym.

We wszystkich opisanych przypadkach, poprzez gromadzenie danych, obserwacja prowadzi do rozpoznania i interpretacji zjawisk, poznania ich przyczyn i konsekwencji lub identyfikacji współzależności i związków. Większość nauk przyrodniczych stosuje obserwacje do zbierania danych i wyprowadzania dowodów naukowych.

Z jakich umiejętności składa się rozumowanie naukowe

Schemat postępowania badawczego zwany metodą naukową jest złożony z kolejnych, stałych etapów, prowadząc badacza od pytania badawczego, do wyciągnięcia wniosków i budowania kolejnych pytań badawczych. Zdolność do podążania za kolejnymi etapami metody badawczej wiąże się ze stosowaniem różnorodnych umiejętności, które uczeń powinien posiadać, aby poradzić sobie z przejściem przez cały proces. Choć część etapów postępowania jest intuicyjna i wynika z naturalnego sposobu poznawania świata przez umysł człowieka – zadawanie pytań, formułowanie hipotez, testowanie ich za pomocą prób i błędów, to całość metodologii wymaga stopniowego wdrożenia młodych badaczy w pravidła postępowania naukowego oraz rutyny praktycznych obserwacji i działań laboratoryjnych.

Każdy z wymienionych w poniższej tabeli obszarów rozwoju powinien być kształtowany regularnie na lekcjach przedmiotów przyrodniczych. Każda lekcja powinna zapewniać taką strukturę, aby stawiać przed uczniami dopasowane do ich potrzeb i możliwości wyzwania. Szczególnie umiejętności z obszaru dociekania i czynności praktycznych stanowią bazę, której opanowanie ułatwi organizację lekcji badawczych oraz wspierać będzie samodzielność poznawczą uczniów.

Obszar rozwoju	Opis umiejętności, jej znaczenie
Umiejętności dociekania	
Ciekawość i wnikliwa obserwacja świata	Młodego badacza charakteryzują takie cechy jak uważność, ciekawość, dostrzeganie elementów otoczenia, na które inni nie zwracają uwagi, umiejętność zadawania pytań i dociekania, chęć poznania odpowiedzi. Projektowanie czasu na swobodną obserwację, podążanie za indywidualną ciekawością i dzielenie się spostrzeżeniami na forum grupy to narzędzia wspierające ten obszar rozwoju.
Zadawanie pytań i odwaga popełnienia błędu	To podstawowa naturalna umiejętność służąca dowiadywaniu się o otaczającym świecie drogą pytań, prób i błędów. W trakcie kształcenia szkolnego często zanika, dlatego podczas lekcji szczególnie wartościowe jest tworzenie momentów, gdy to uczniowie, a nie nauczyciel, zadają pytania. Nauczyciel wspiera rozwój uczniów, stwarzając przestrzeń na dociekanie, zadawanie pytań i popełnianie błędów.
Formułowanie pytania badawczego	Składowymi tej umiejętności są: świadomość, czym jest szerszy problem badawczy, a czym szczegółowe pytanie badawcze, znajomość cech prawidłowego pytania badawczego, rozumienie, jakie pytania da się zweryfikować naukowo i testować eksperymentalnie.
Formułowanie hipotez	Formułowanie prawdopodobnych odpowiedzi na pytanie badawcze to niezbędny krok do prawidłowego i precyzyjnego zaprojektowania układu badawczego. Umiejętność formułowania prawidłowej, testowalnej hipotezy, przewidywań i odróżnianie ich od pytań badawczych.
Poszukiwanie danych źródłowych	To zaawansowana umiejętność umożliwiająca teoretyczne poznawanie zjawisk i ich wytłumaczeń.
Umiejętności praktyczne warunkujące efektywną pracę badawczą	
Znajomość i stosowanie zasad BHP	Warunkiem bezpiecznej pracy badawczej jest wdrożenie uczniów w konsekwentne stosowanie się do zasad BHP oraz rytuałów ułatwiających przebieg lekcji badawczej, np. stosowanie odzieży ochronnej, skupienie na instrukcjach nauczyciela, organizacja przestrzeni roboczej czy nawyk sprzątania po skończonej pracy.
Umiejętność pracy w grupie	Jest podstawową uniwersalną kompetencją, którą należy kształtować systematycznie i świadomie, stopniowo powierzając uczniom coraz większą samodzielność w doborze i podziale zadań oraz odpowiedzialności za wspólną pracę. Ze względu na liczebność zespołów klasowych zwykle praca badawcza jest wykonywana w grupach. Proces ten wymaga tworzenia przez nauczyciela procedur ułatwiających uczniom równy podział pracy i odpowiedzialności. Przydatne są narzędzia uczniowskiej ewaluacji pozwalające zweryfikować, czy podjęte działania i sposób wykonania zadań był zgodny z kryteriami oraz jak w przyszłości radzić sobie z trudnościami.
Zarządzanie czasem	Stanowi element zarówno pracy grupowej, jak samodzielnego radzenia sobie z zadaniami. Rola nauczyciela polega na oszacowaniu czasu lekcji niezbędnego do wykonania działań badawczych, a także na stopniowym przekazywaniu uczniom zarządzania czasem, wydłużając okresy samodzielnej pracy.

Obszar rozwoju	Opis umiejętności, jej znaczenie
Organizacja stanowiska pracy	Organizacja przestrzeni wokół siebie, dobór niezbędnych materiałów i odczynników, dbałość o czystość i sprzęt oraz dziennik laboratoryjny. Porządkowanie stanowiska i organizacja czynności praktycznych.
Umiejętności manualne	Używanie narzędzi pomiarowych, obserwacyjnych, pipet, zręczność, manipulacja narzędziami, uważność, dokładność, umiejętność sprzątania. W obserwacjach przyrodniczych umiejętność schematycznego rysowania jest niezbędna przy dokumentacji obserwacji.
Postępowanie zgodnie z instrukcją	Młodszy uczniowie będą podążać za instrukcją ustną, modelowaną przez nauczyciela krok po kroku, starsi natomiast wdrażani są do samodzielnego wykonania pisemnej procedury. Postępowanie zgodnie z instrukcją, napisanej przystępnym językiem, wymaga umiejętności czytania ze zrozumieniem oraz nawyku wstępnego przeczytania całości, a następnie podążania za poszczególnymi etapami i przetwarzania informacji.
Przygotowanie roztworów i rozcieńczeń	Umiejętności charakterystyczne dla chemii są także niezbędne w prowadzeniu laboratoryjnych badań biologicznych.
Projektowanie układu badawczego	
Dobór i rozróżnianie zmiennej niezależnej i zależnej	Umiejętność zidentyfikowania zmiennej niezależnej oraz doboru zmiennej zależnej, odróżnianie ich od siebie.
Zmienne kontrolowane	Świadomość istnienia czynników stałych w doświadczeniu oraz czynników losowych mających wpływ na układ badawczy, identyfikacja czynników, które mogą wpływać na wynik doświadczenia.
Projektowanie prób kontrolnych	Znajomość definicji oraz znaczenia próby kontrolnej dla prawidłowego wnioskowania, rozróżnianie próby badawczej od kontrolnej, projektowanie kontroli pozytywnych i negatywnych.
Dobór procedury badawczej	Najczęściej należy on do zadań nauczyciela, jednak uczniowie osiągający wysoki stopień opanowania umiejętności badawczych są w stanie samodzielnie opracować sposób prowadzenia doświadczenia lub obserwacji.
Planowanie badania	Umiejętność samodzielnego zaprojektowania badania w rzeczywistości szkolnej ćwiczona jest rzadko, zwykle dotyczy uczniów szczególnie zainteresowanych przedmiotami przyrodniczymi i startujących w konkursach. Jednak w założeniach metodologii IBSE ten etap dociekań naukowych powinien być także dostępny dla każdego ucznia.
Prowadzenie badania	
Obserwacje jakościowe i ilościowe	Znajomość zmiennej zależnej, rozróżnianie danych ilościowych od jakościowych, uważność prowadzenia obserwacji, skrupulatność w zapisywaniu wyników.
Umiejętności dokumentowania wyników	Prawidłowy zapis danych i obserwacji, systematyczne notowanie, tworzenie tabel, dobranie odpowiedniego sposobu zapisu wyników, szkicowanie obserwowanych obiektów, robienie i opisywanie dokumentacji zdjęciowej, prowadzenie dziennika laboratoryjnego.
Odróżnianie wyników od wniosków	W rozumowaniu uczniów często pojawia się błąd polegający na myleniu obserwacji z wnioskami z doświadczenia, któremu warto poświęcić osobne ćwiczenia praktyczne i teoretyczne.

Obszar rozwoju	Opis umiejętności, jej znaczenie
Weryfikacja czy hipoteza jest potwierdzona	Stanowi odpowiedź na pytanie badawcze w oparciu o analizę zebranych danych.
Opracowanie wyników i wniosków	
Tworzenie wykresów	Dopasowanie typu wykresu prawidłowo odwzorowującego zebrane dane, odręczne rysowanie wykresów oraz za pomocą programów komputerowych.
Odczytywanie danych z wykresu	Podanie prawidłowych wartości dla wskazanych punktów, dostrzeganie wyników dalekich od normy, analiza ich znaczenia, rozumienie znaczenia miar tendencji środkowych
Interpretowanie danych na wykresie	Rozumienie znaczenia istotności różnic i odczytywanie tendencji oraz zależności.
Umiejętności matematyczne	Jest to grupa rozmaitych umiejętności właściwych dla rozumowania matematycznego, takich jak: • szacowanie, • umiejętność odczytu danych z pomiaru, • skala i jej przeliczanie, • znajomość jednostek i ich przeliczeń, • prosta analiza statystyczna: wyliczenie średniej, w starszych klasach rozumienie znaczenia miar tendencji środkowej i rozproszenia, • analiza wykresów, • rozróżnianie korelacji (przypadkowej zbieżności) od implikacji (zależności przyczynowo-skutkowej).
Formułowanie wniosków	Znajomość zasad sformułowania prawidłowego wniosku odnoszącego się precyzyjnie do pytania badawczego i hipotezy, dobieranie argumentów z danych i opisywanie wniosków na podstawie wyników, weryfikacja hipotez.
Wyjaśnianie zjawisk przyrodniczych	Uogólnianie, formułowanie definicji na podstawie obserwacji i wniosków z badania, budowanie szerszego obrazu rzeczywistości, świadomość ograniczeń metody i ograniczeń możliwości wnioskowania. Formułowanie przypuszczeń i zadawanie kolejnych pytań badawczych i poznawczych.
Ocena wiarygodności badania	
Ocena jakości i wiarygodności wyników	Świadomość znaczenia wielkości próby, analiza statystyczna, świadomość ograniczeń próbkowania i reprezentacji zjawiska na wybranym obiekcie badawczym, poszukiwanie anomalii i błędów w wykonanej procedurze.
Ocena rzetelności i uczciwości badania	Krytyczna i sceptyczna analiza wyników, weryfikacja poprawności i kompletności prób kontrolnych, poszukiwanie dodatkowych czynników, które mogły zaburzać wiarygodność wyników.
Umiejętność modelowania	Odwzorowanie rzeczywistości w postaci uproszczonej, tworzenie reprezentacji poznanego zjawiska, przewidywanie skutków działania czynników na proces; dostrzeganie prawidłowości i niezgodności modelu z rzeczywistością.
Dyskusja wyników	Poszukiwanie alternatywnych wyjaśnień zjawiska, porównywanie wyników własnych badań do danych literaturowych, argumentowanie, poszukiwanie uzasadnień i wyjaśnień naukowych.

Kształtowanie złożonych umiejętności badawczych na lekcjach przedmiotów przyrodniczych jest wyzwaniem koncepcyjnym i organizacyjnym. Gotowe programy nauczania dostępne na rynku nie proponują optymalnych rozwiązań dydaktycznych uwzględniających stopniowy rozwój umiejętności rozumowania, skupione są przede wszystkim na realizacji treści nauczania i pracy faktograficznej. Dlatego po stronie nauczyciela pozostaje decyzja o uznaniu kompetencji rozumowania naukowego za wartość uniwersalną, którą chce spójnie rozwijać w swoich klasach, aby proces ten przyniósł pożądaną efekt w kontekście zmieniających się warunków w szkole oraz pracy z klasą zróżnicowaną. W poradniku podpowiadamy różne możliwości pomagające w znalezieniu najlepszych metod dla siebie i swoich uczniów, pozwalających na osiągnięcie tego celu. Formalne warunki pozwalają na takie podejście – w podstawie programowej są jasno sformułowane cele kształcenia (wymagania ogólne) dla przedmiotu, określające myślenie naukowe, analizę źródeł, rozumowanie i rozwiązywanie problemów biologicznych jako priorytetowe efekty kształcenia. Nauczyciel ma wolność w wyborze, adaptacji lub tworzeniu własnego programu nauczania. Koncepcje planowania podejścia badawczego na lekcjach warto zacząć od przemyślenia wybranego działu oraz analizy rozkładu materiału, określić cele dla uczniów, kilka najważniejszych pojęć kluczowych i umiejętności, które wymagają stopniowego rozwijania. Poniżej przedstawiono kilka pytań i rozważań dotyczących procesu planowania, które pomogą w kształtowaniu autorskich koncepcji.

PYTANIA DO NAUCZYCIELA PRZED ZAPLANOWANIEM LEKCJI DOŚWIADCZALNEJ

- Który ważny cel edukacyjny chcę realizować podczas tej lekcji?
- Jaką umiejętność lub jakie umiejętności będą ćwiczyć uczniowie? Podpowiedź: może to być jedna drobna umiejętność, a nie kilka złożonych na raz.
- Co ważnego uczniowie zrozumieją, jak doprowadzę ich do głębokiego rozumienia zjawiska oraz po czym poznam, że już osiągnęli oczekiwany etap myślowy? Podpowiedź: wskaźnikami głębokiego rozumienia procesu są takie umiejętności, jak: określanie konsekwencji działania procesu, przewidywanie następstw braku jego działania, znajomość czynników wpływających na proces, rozpoznawanie właściwych mu związków przyczynowo – skutkowych.
- Jakie wiadomości opanują uczniowie podczas lekcji, które z nich zapamiętają na długo?
- Czy uczniowie są przygotowani do samodzielnej pracy doświadczalnej i jak mogę ich do niej dobrze przygotować?
- Ile czasu zajmie doświadczenie i jak ułożyć optymalny plan czasowy?
- Jak przedstawię instrukcje (drukowane, ustne, a może demonstracja) i ile swobody dam uczniom w poznawaniu procesu?
- W ilu grupach będą pracować uczniowie?

- Podpowiedź: każde rozwiązanie ma swoje wady i zalety. Praca indywidualna w prostym doświadczeniu wymaga dużo materiałów, ale umożliwia monitorowanie postępów każdego ucznia. Praca w grupach – nie więcej niż 3- osobowych – optymalizuje czas pracy i dostępność materiałów, ale wymaga wcześniejszego przygotowania uczniów do umiejętności pracy w grupie. Często więcej korzyści przyniesie pokaz nauczyciela, pozwalając na większe skupienie uczniów na obserwowanym procesie. Jednak pokaz nie może zawsze zastępować samodzielnej pracy uczniów, ponieważ nie pozwala na kształtowanie wszystkich umiejętności badawczych i manualnych.
- Jak przygotować salę, materiały i odczynniki, ile materiałów potrzebujemy? Podpowiedź: nie jest łatwo tego dokonać, ale nie jesteś sama/sam! Wyznaczeni, chętni uczniowie, częściowo „wtajemniczeni” w procedurę, mogą stać się pomocnikami i technikami przed lekcją oraz podczas zajęć.
- Co zrobić, gdy podczas lekcji plan przestaje się mieścić w czasie? Podpowiedź: warto zawnoczu zaplanować, w którym momencie da się awaryjnie przerwać doświadczenie. Na lekcji musi być czas na sprzątnięcie stanowisk przez uczniów. Podsumowanie doświadczenia – analiza, wnioskowanie i ewaluacja wyników to najważniejsze momenty edukacyjne pracy z doświadczeniem. Nie warto się podczas nich śpieszyć – lepiej tę część przenieść na następną lekcję.
- Po czym poznam czego uczniowie się nauczyli?
- Jak pomogę uczniom samodzielnie ocenić postępy ich pracy i rozwoju?

Organizacja pracy – jak zacząć pracę z młodymi badaczami

Lista obszarów rozwoju, składających się na holistyczną kompetencję rozumowania naukowego, może wydawać się zbyt obszerna do realizacji na lekcjach biologii. Jednak spis ten dotyczy obu etapów edukacyjnych i zakłada stopniowe narastanie kompetencji, spójnie z rozwojem poznawczym uczniów. Nie każdy uczeń osiągnie wszystkie z wymienionych wymagań, ale każdy powinien ćwiczyć poszczególne składowe i doskonalić swoje dociekanie naukowe. Nawiązanie współpracy i łączenie celów z innym nauczycielem w szkole na pewno będzie pomocne, a szukanie okazji do pracy projektowej na lekcjach techniki, plastyki czy WF pozwoli zyskać komfort czasowy i większą spójność działań. Zaczynając współpracę z klasą, warto wdrażać i egzekwować zasady i rutyny, które pomogą w organizacji „niecodziennych” lekcji. Chodzi zarówno o wprowadzenie zasad zapewniających bezpieczeństwo pracy i porządek podczas lekcji doświadczalnych, ale także rytuałów, które pomogą uczniom rozwijać rozumowanie naukowe od pierwszych Waszych wspólnych lekcji biologii.

PRZYKŁADOWY KONTAKT Z KLASĄ NA LEKCJI BADAWCZEJ:

1. Dziś wszyscy jesteśmy naukowcami, a sala staje się laboratorium.
2. Uważnie czytam i słucham instrukcji.
3. Stosuję zasady bezpieczeństwa zawarte w doświadczeniu.
4. W laboratorium panuje bezwzględny zakaz jedzenia, picia i biegania.
5. Słucham innych badaczy i pomagam wspólnie rozwiązywać problemy.
6. Dbam o porządek na stanowisku pracy.
7. Pamiętam o robieniu notatek w dzienniku laboratoryjnym.
8. Po skończeniu doświadczenia sprzątam stanowisko swojej pracy.

Nie każda lekcja będzie lekcją doświadczalną, ale każda lekcja może służyć rozwijaniu niewielkich elementów układanki zwanej rozumowaniem naukowym. Planując pojedynczą lekcję, powinniśmy zobaczyć ją w szerszym kontekście cyklu lekcji, działu, semestru, roku i etapu edukacyjnego. Na wszystkich lekcjach, także tych bardziej tradycyjnych, warto dawać uczniom przestrzeń do:

- uważnej obserwacji przyrody i zjawisk (przynieście elementy przyrody do klasy!);
- zadawania pytań i oceny które pytania da się zweryfikować naukowo, a które nie;
- szukania odpowiedzi na intrygujące, nieoczywiste, czasem paradoksalne pytania;
- poszukiwania wiedzy w źródłach.

Dobre praktyki podczas pracy doświadczalnej z uczniami.

PORADY DLA NAUCZYCIELA: JAK ZORGANIZOWAĆ LEKCJĘ BADAWCZĄ?

WAŻNE SZCZEGÓŁY TECHNICZNE • Przygotuj odpowiednią liczbę sprzętu; • Użyj tacek do łatwego rozstawienia i sprzątania zestawów dla każdej grupy; • Przetestuj procedurę przed lekcją; • Sprawdź czy sprzęt i odczynniki działają; • Pamiętaj o czasie na sprzątanie przez uczniów.	POMOCNE „OGARNIACZE” CHAOSU • Kontrakt – odnoś się do ustalonych norm zachowania; • Rutyny – zmniejszają nadmierną ekscytację, pozwalają przewidzieć uczniom, co się będzie działo; • Zasady BHP – wprowadzone i egzekwowane zapewniają bezpieczeństwo.
PRZESTRZEŃ W KLASIE • Zaplanuj ustawienie ławek wygodne do pracy; • Znajdź pomocników – deleguj uczniom zadania organizacyjne i porządkowe; • Sprawdź ułatwienia w klasie – dostęp do zlewu, gniazdek, stolika technicznego; • Monitoruj pracę uczniów, przemieszczaj się po całej klasie; • Przygotuj stolik techniczny z zapasem materiałów, trudniejszymi w obsłudze sprzętami.	ORGANIZACJA NA LEKCJI • Przemyśl sposób wprowadzenia instrukcji; • Sprzęt udostępnij dopiero po wprowadzeniu całej niezbędnej instrukcji ustnej; • Klarownie oddziel czas instrukcji ustnej nauczyciela od czasu pracy własnej uczniów, inaczej będziesz przekrzykiwać uczniów; • Zadbaj o karty pracy lub dziennik laboratoryjny do prowadzenia notatek; • Zaplanuj, jak uczniowie zgłaszają potrzebę Twojej pomocy; • Kontroluj czas; • Zawsze miej przygotowane awaryjne plany działania.

PRZYDANE RUTYNY KLASOWE:

Tajny znak oznaczający uruchomienie zasad. Warto stworzyć rutynę, która za każdym razem oznaczać będzie moment, w którym obowiązywać zaczynają zasady pracy doświadczalnej. Przykładem może być moment założenie fartucha przez nauczyciela - można to zrobić w sposób teatralny, dając jednocześnie znać, że cała sala przeistacza się teraz w laboratorium badawcze (nawet jeśli pracujemy w zwykłej sali szkolnej), w którym panują wyjątkowo „rygorystyczne” zasady bezpieczeństwa. Na pierwszej lekcji należy w tym momencie wprowadzić zasady, kontrakt, spisać regulamin lub powiesić charakterystyczne znaki ostrzegawcze, które będą obowiązywały zawsze, kiedy nauczyciel założy fartuch. Na lekcji badawczej zawsze nazywajmy uczniów naukowcami, badaczami.

Ręka w górze – cisza w chórze. Sposób na uzyskanie ciszy i uwagi skierowanej na nauczyciela w klasie. Podczas lekcji z doświadczeniem wykonywanym przez uczniów zawsze jest czas, podczas którego w klasie panuje twórczy hałas. Są także momenty, w których nauczyciel musi przekazać ważną instrukcję lub pytanie do wszystkich uczniów. Powinien mieć umówiony niezawodny sposób znany i często ćwiczony z uczniami, aby uzyskać efekt należytej uwagi uczniów. Rutyna „ręka w górze-cisza w chórze” polega na trzech krokach:

- nauczyciel staje w widocznym miejscu sali i unosi rękę do góry;
- każdy uczeń, który dostrzega ten gest również unosi rękę w górę oraz milknie;
- kolejni uczniowie zaczynają zwracać uwagę na ten gest – unoszą rękę i milkną. Po chwili cała sala milczy a głos może zabrać tylko nauczyciel.

Trzy kroki ucznia, gdy nie wie, co dalej robić. Każdy krok może prowadzić do rozwiązania problemu i następne kroki nie muszą być konieczne. Ważne, żeby zanim uczeń poprosi nauczyciela o pomoc, spróbował sam rozwiązać problem:

Krok 1. Czytam raz jeszcze instrukcję. Jeśli tam nie znajdę odpowiedzi, wykonuję:
krok 2. Pytam po cichu kolegę/koleżankę, który działa i wygląda, że wie co robić. Jeśli nadal nie znam rozwiązania, wykonuję:

krok 3. Umówionym sposobem daję znać nauczycielowi, że potrzebuję pomocy. Nauczyciel ustala z uczniami sposób dyskretnego przywołania – może to być ręka w górze lub żółte światło wystawione na ławce w metodniku lub podejście do „punktu konsultacji” np. przy tablicy.

Tacki z zestawami doświadczalnymi. W celu łatwiejszej dystrybucji niezbędnych materiałów i odczynników dla każdej grupy badawczej, zestawy najlepiej przygotować na sztywnych, plastikowych tackach lub w koszykach. Przyspiesza to kompletowanie sprzętu podczas lekcji, ułatwia organizację sta-

cji badawczych, umożliwia uczniom sprawne umycie i odstawienie zestawów po skończonej pracy.

Stół techniczny. W sali przydaje się wyznaczony stół, na którym uczniowie znajdą zapasowe materiały oraz sprzęty, których użycie wymaga obecności nauczyciela. Przy stole technicznym uczniowie mogą też zasięgnąć porady nauczyciela oraz otrzymać dodatkowe instrukcje.

Dziennik laboratoryjny lub obserwacyjny. Może być zwykłym zeszytem uczniów lub kartą pracy, powinien jednak zawierać stałe elementy do notowania podczas prowadzenia doświadczeń i obserwacji. W zależności od stopnia samodzielności uczniów, część pól, takich jak pytanie badawcze, zmienne niezależne i zależne powinny być uzupełnione lub podane przez nauczyciela. Dobrą praktyką jest rozdanie wydrukowanej instrukcji doświadczenia, którą uczeń może wkleić do dziennika. Poniżej podajemy przykładową propozycję układu notatek w dzienniku laboratoryjnym. W celu ułatwienia analizy wyników, wnioskowania i ewaluacji wiarygodności wyników podajemy pytania pomocnicze, które ukierunkowują rozumowanie ucznia i kształtują nawyki myślowe.

Dziennik laboratoryjny

Data, autor

Pytanie badawcze	<i>Jest precyzyjne, zawiera nazwę badanego obiektu, określa badany czynnik</i>
Jaki czynnik zmieniam (zmienna niezależna)	<i>Wymienione są wszystkie badane warianty zmienianego czynnika, w tym przynajmniej jedna próba kontrolna</i>
Jaki parametr obserwuję lub mierzę (zmienna zależna)	<i>Można zbierać dane jakościowe (obserwacyjne) lub ilościowe (pomiar). Pamiętaj o podaniu jednostki pomiaru.</i>
Hipoteza	<i>Stanowi odpowiedź na pytanie badawcze, jest precyzyjna i testowalna, zawiera informację o związku między zmienną niezależną i zależną.</i>
Przewidywanie	<i>Opis przewidywanego wyniku i co on będzie oznaczał, np.: Jeśli trzymam taki wynik... to hipoteza będzie potwierdzona.</i>

Odczynniki i materiały

-
-
-
-
-

Instrukcja doświadczenia

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Opis lub rysunek układu badawczego

Dokumentacja wyników (np. tabela)

ANALIZA WYNIKÓW

Pytania pomocnicze:

- *Jaki typ wykresu najlepiej odzwierciedli zebrane dane?*
- *Czy należy odrzuć jakiś wynik, jako anomalię?*
- *Jak zmieniały się wyniki podczas prowadzenia doświadczenia?*
- *Czy wyniki są podobne dla powtórzeń danej próby?*
- *Jaka jest różnica wyników pomiędzy próbą kontrolną a badawczą?*
- *Czy różnica wyników pomiędzy próbą kontrolną a badawczą jest istotna statystycznie?**
- *Jaka miara tendencji środkowej oraz rozproszenia wyników będzie pomocna dla zrozumienia wyników?**

** Pytania oznaczone gwiazdką dotyczą uczniów szkół ponadpodstawowych, zgodnie z wymaganiami postawy programowej: „uczeń opracowuje, analizuje i interpretuje wyniki badań w oparciu o proste analizy statystyczne”*

WNIOSKI

Pytania pomocnicze:

- *Czy wyniki pozwalają potwierdzić lub obalić hipotezę?*
- *Jaka jest odpowiedź na pytanie badawcze?*
- *Jak można wytłumaczyć naukowo przyczynę zaobserwowanego zjawiska?*

Pytania pomagające w ocenie wiarygodności wniosków:

- *Czy Twoja odpowiedź na pytanie badawcze jest pewna? Co ją potwierdza, a co może budzić wątpliwości?*
- *Czy wyniki są jednoznaczne?*
- *Czy wykonana procedura i test były prawidłowe, nie popełniono błędu i zebrano odpowiednią liczbę danych/powtórzeń?*
- *Czy monitorowano wszystkie czynniki zewnętrzne mogące wpłynąć na wyniki?*
- *Co można zrobić w przyszłości, aby wyniki były bardziej wiarygodne?*

NOWE PYTANIA BADAWCZE

Pytania pomocnicze:

- *Czego nie jesteś pewna/pewien, patrząc na wyniki?*
- *Co by było gdyby czynnik zmieniany w doświadczeniu miał inne parametry niż te przyjęte w badaniu?*
- *Jakie inne czynniki mogą wpływać na obserwowane zjawisko?*
- *Co jest przyczyną, a co skutkiem obserwowanego zjawiska?*

Dziennik obserwacji

Data, autor

Pytanie badawcze do celowej obserwacji	<i>Jest precyzyjne, wynika z ciekawości poznawczej.</i>
Obserwowany obiekt	<i>Podaj nazwę gatunkową lub jednoznaczną nazwę obiektu.</i>
Warunki obserwacji	<i>Okres obserwacji, miejsce, częstotliwość zbierania danych, skala powiększenia, jeśli obserwacja mikroskopowa.</i>
Jakie właściwości obiektu są obserwowane	
Przewidywany wynik i co on będzie oznaczał	<i>Twoje przewidywania w odniesieniu do pytania badawczego.</i>

Dokumentacja rysunkowa lub zdjęciowa

Wyniki w postaci tabeli

Data, godzina	Opis obserwacji lub dane	Uwagi <i>np. czy czynniki środowiska wpływające na wyniki obserwacji są niezmiennie?</i>

Notatki uzupełniające, nasuwające się pytania
Wnioski

Organizacja końca lekcji z młodymi badaczami

Podsumowanie pracy badawczej uczniów polegające na samodzielnym formułowaniu wyjaśnień opartych na zebranych danych jest istotnym elementem rozumowania naukowego, spinającym klamrą wiele czynności manualnych i myślowych, wymaganych podczas prowadzenia doświadczeń i obserwacji. Jest to ważny krok pogłębiający formułowanie wniosków z doświadczenia, wymagający uogólnień, dochodzenia do rozumienia zjawisk oraz dostrzeżenia ograniczeń metody badawczej. Często może prowadzić do samodzielnego formułowania przez uczniów definicji i zasad działania poznanego procesu, a także ewaluacji jakości pracy doświadczalnej, którą przeprowadzili. Model podsumowania pracy badawczej doskonale opisuje Wendy Hoffer, w książce „Science as Thinking” [Hoffer, 2009]:

„FORMUŁOWANIE WYJAŚNIEŃ NA PODSTAWIE DOWODÓW.

Zamiast mówić uczniom, czego się nauczyli (lub mieli nauczyć), poproś, aby sami to wyjaśnili, niech samodzielnie uzasadniają i tłumaczą, co rozumieją. Po zebraniu danych pracujcie razem, aby nadać znaczenie wynikom poszczególnych grup badawczych, jak i wszystkim danym zebranym w całej klasie. Szukajcie anomalii, róbcie burze mózgów, dyskutujcie, twórczo krytykujcie rozwiązania. Wspieraj uczniów w rozwijaniu ich logiki i szukaniu uzasadnień. Najważniejsze: opieraj się pokusie wyjaśniania uczniom ich wątpliwości i nie zaspokajaj od razu ich ciekawości.”
(s. 107, tłumaczenie własne)

Opisany model podsumowania pracy badawczej uczniów zakłada więc zaangażowanie uczniów w poszukiwanie błędów, formułowanie uogólnień, argumentów i poszukiwanie wyjaśnień. Jest to najważniejszy moment uczenia się podczas lekcji, powinniśmy zatem zmienić myślenie o znaczeniu końcowej fazy lekcji. Podsumowanie pracy badawczej nie może być planowane na ostatnie 5 minut lekcji wraz ze sprzątaniami sali. Należy na nie przeznaczyć znaczną część lekcji. Jeśli nie mamy komfortu pracy podczas kilku lekcji w bloku jednego dnia, należy przeznaczyć część następnej lekcji po eksperymencie (nawet tydzień później) na merytoryczne podsumowanie, omówienie zdobytych doświadczeń i ugruntowanie kształtującej się wiedzy o świecie wg schematu proponowanego przez Hoffer. Sposób podsumowania lekcji doświadczalnej jest zatem kluczowy dla efektywnego procesu dydaktycznego. Koniec lekcji to nie tylko sprzątanie sali i udanie się na przerwę. Zakończenie lekcji powinno stanowić stałą strukturę, do której uczniowie są przyzwyczajeni, dlatego wpisuje się w ustalone klasowe rutyny.

„Bilecik na wyjście”. Jednym z pomysłów jest pisanie biletu na wyjście, którego celem jest zarówno monitorowanie efektów uczenia się uczniów przez nauczyciela, jak i kształtowanie nawyku refleksji nad swoim uczeniem się przez samych uczniów. Dlatego ważne jest, aby wypełniony bilecik mógł być przeczytany przez nauczyciela (karteczki zebrane lub naklejone na tablicę lub drzwi), a następnie mógł wrócić do uczniów np. na początku następnej lekcji, jako ślad pamięciowy tego, co działo się podczas minionych 40 minut. Bilecik może też być zapisany w dzienniku laboratoryjnym. Przykładowe pytania do bilecików na wyjście:

- Co zrobiłaś/eś dobrze podczas dzisiejszego doświadczenia, a co mogłaś/eś zrobić lepiej?
- Co Ci dziś pomagało, a co utrudniało się uczyć?
- Co dziś zrozumiałaś/eś, a z jakimi zostajesz pytaniami dotyczącymi tematu?
- Jak oceniasz, które cele dzisiejszej lekcji udało Ci się zrealizować?
- Które Twoje wcześniejsze przypuszczenia na temat dzisiejszego tematu się potwierdziły, a które nie?
- W którym momencie lekcji myślałaś/eś i czułaś/eś się jak naukowczyni/naukowiec?
- Twój największy moment „Aha!” z dzisiejszej lekcji to:...
- Co odpowiesz rodzinie, gdy zapytają, co dziś było na biologii?
- Jak myślisz, co będziemy robić i czego się uczyć na następnej lekcji?
- Gdybyśmy zaczynali następną lekcję krótkim quizem, jakiego pytania się spodziewasz?

O eksperymentach proponowanych w poradniku

Poradnik został opracowany na podstawie doświadczeń prowadzonych podczas zajęć ze studentami przygotowującymi się do zawodu nauczyciela w Szkole Edukacji Polsko-Amerykańskiej Fundacji Wolności i Uniwersytetu Warszawskiego oraz Pracowni Dydaktyki Biologii Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Powstał z potrzeby zebrania różnorodnych doświadczeń, selekcji i zgromadzenia takich protokołów, które niezawodnie zadziałają w warunkach szkolnych. Temat okazał się na początku frustrujący, ponieważ większość procedur dostępnych w podręcznikach i na platformach edukacyjnych była albo błędna, albo zbyt mało precyzyjnie opisana, aby doświadczenie sprawnie powtórzyć. Dobór protokołów był w związku z tym inspirowany wieloma materiałami edukacyjnymi pochodzącymi głównie z brytyjskiego systemu edukacji, uporządkowany i dopasowany do skromniejszych warunków polskich szkół.

Wszystkie opisane w poradniku procedury zostały wielokrotnie prze-testowane zarówno w warunkach laboratoryjnych przez nauczycieli i dorosłych badaczy, jak i w pracowniach szkolnych z uczniami w różnym wieku, a także w domowych kuchniach. Testy pokazują, że nawet najlepiej opisane doświadczenie czasem „nie wychodzi” – czyli wyniki nie pozwalają na zaobserwowanie spodziewanego procesu. Jeśli mamy już wcześniej zgromadzony i przetestowany sprzęt, najczęściej niepowodzenie zależy od przypadkowych czynników, pomyłek czy niedokładności. Zawsze jednak każde przeprowadzone samodzielnie doświadczenie, nawet takie, które „nie wyjdzie”, jest cennym materiałem do dociekań naukowych.

Literatura

Chudzik B., Wójcik A. M., *Eksperymentowanie z elementami analizy statystycznej w nauczaniu-uczeniu się biologii w szkole ponadpodstawowej*. Wydawnictwo UMCS, 2021

Federowicz M., Sitek M. (red.). *Program Międzynarodowej Oceny Umiejętności Uczniów. Wyniki badania PISA 2015 w Polsce*. Warszawa: Instytut Badań Edukacyjnych, 2017.

Hoffer W.W., *Science as Thinking. The constants and variables of inquiry teaching, grades 5-10*. Heinemann, Portsmouth, NH, 2009.

Lilpop J., et al., *Jak przygotować pracę badawczą na Olimpiadę Biologiczną?* Edukacja Biologiczna i Środowiskowa, nr 2/20217 s. 79-102, 2017.

Maciejowska I., Odrowąż E., *Nauczanie przedmiotów przyrodniczych kształtujące postawy i umiejętności badawcze uczniów*. Uniwersytet Jagielloński, 2018.

Marzano R. J., *Sztuka i teoria skutecznego nauczania*. Centrum Edukacji Obywatelskiej, Warszawa, 2012.

Projekt Establish <https://zdch.uj.edu.pl/establish>

Projekt Fibonacci <http://fibonacci.uni-bayreuth.de/resources/resources-for-implementing-inquiry.html>

Rocard M. et al., *Rocard report: “Science Education Now: A New Pedagogy for the Future of Europe”*. European Commission, 2007. <https://www.eesc.europa.eu/en/documents/rocard-report-science-education-now-new-pedagogy-future-europe> (dostęp 07.2023)

Science and Plants for Schools <https://www.saps.org.uk/>

Wiggins, Grant, Jay McTighe, *Understanding by Design*. Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development, 2005.

BADANIE INTENSYWNOŚCI FOTOSYNTEZY W ROŚLINACH

OPRACOWANIE: JOANNA LILPOP

W PORADNIKU NA TEMAT FOTOSYNTEZY ZNAJDZIESZ:

- listę przykładowych błędnych przekonań na temat procesu fotosyntezy, utrudniających zrozumienie procesu;
- dwa sprawdzone protokoły badania fotosyntezy, stosowane do pytań badawczych o wpływ różnych czynników środowiskowych na intensywność fotosyntezy
 - procedura 1. to badanie na roślinie wodnej,
 - procedura 2. na krążkach wyciętych z liści rośliny lądowej;
- dobre praktyki i częste błędy prowadzenia doświadczeń z fotosyntezą;
- pomysły zastosowania symulacji komputerowych umożliwiających zbieranie danych z badania wpływu czynników na przebieg fotosyntezy. Symulacje mogą służyć prowadzeniu badań mimo braku możliwości przeprowadzenia prawdziwych doświadczeń albo jako ich uzupełnienie;
- serię ćwiczeń teoretycznych służących analizie doświadczeń, rozwijaniu rozumowania naukowego oraz głębokiego rozumienia przebiegu procesu fotosyntezy i jego znaczenia w ekosystemach.

Fotosynteza jest najważniejszym procesem biochemicznym utrzymującym funkcjonowanie ziemskiego ekosystemu. Za pomocą chlorofilu i enzymów zawartych w liściach energia słoneczna jest przekształcana w energię chemiczną magazynowaną w postaci glukozy. Dwutlenek węgla i woda przekształcane są w wysokoenergetyczną glukozę oraz tlen będący produktem ubocznym, a równanie chemiczne tego procesu to:



Równanie to jest wprowadzane w polskim programie nauczania biologii w piątej klasie: „uczeń przedstawia istotę fotosyntezy jako jednego ze sposobów odżywiania się organizmów (substraty, produkty i warunki przebiegu procesu) oraz planuje i przeprowadza doświadczenie...” (treści nauczania

I.6). Zwykle już wcześniej uczniowie znają to pojęcie z etapu edukacji wczesnoszkolnej i popularnej w Internecie piosenki o fotosyntezie¹. Znajomość pojęcia i zapamiętanie nazw związków chemicznych biorących udział w reakcji nie gwarantuje jednak głębokiego zrozumienia procesu oraz jego znaczenia dla funkcjonowania ekosystemów.

W szkole ponadpodstawowej w programie rozszerzonym to samo doświadczenie pojawia się w pierwszej klasie w postaci uszczegółowionej: „Uczeń planuje i przeprowadza doświadczenie wykazujące wpływ temperatury, natężenia światła i zawartości dwutlenku węgla na intensywność fotosyntezy” (treści nauczania IX.4.5.). Niestety, obecne wymagania podstawy programowej w ogóle nie wymieniają w zakresie biologii dla osób nierozszerzających tego przedmiotu, treści związanych z przebiegiem procesu fotosyntezy. Część osób kończących ogólnokształcący etap edukacji nie wróci do studiowania jego przebiegu ani znaczenia dla funkcjonowania ekosystemów.

Tymczasem głębokie zrozumienie tego procesu leży u podstaw rozumienia **nadrzędnych idei** funkcjonowania życia na Ziemi - od struktury troficznej ekosystemów po bioróżnorodność na świecie. Dlatego w obecnym układzie treści programowych tak ważne staje się poprowadzenie uczniów już w klasie piątej szkoły podstawowej do głębszego zrozumienia tego procesu, na poziomie percepcji dostępnej dla piątoklasisty. Istotne jest wyprowadzenie uczniów z **błędnych przekonań**, które mogą uniemożliwiać głębsze rozumienie procesu. Zrozumienie procesu fotosyntezy i jego znaczenia powinno być systematycznie ćwiczone także przy innych działach – różnorodności i znaczenia roślin w przyrodzie, ekologii i dla różnorodności biologicznej. Zachęcamy nauczycieli prowadzących program nierozszerzony w szkołach ponadpodstawowych, aby znaleźli czas i wartości edukacyjne w powrocie do tematu fotosyntezy. Ważne są długoterminowe umiejętności zastosowania teoretycznej wiedzy do rozumienia zasady działania ekosystemów. W starszych klasach fotosynteza będzie istotna dla zrozumienia przepływu energii, obiegu materii, piramid spasilania, stabilności sieci troficznych i stabilności całych ekosystemów na Ziemi. W świecie ogarniętym globalnym kryzysem środowiskowym, rozumienie obiegu węgla w przyrodzie ma znaczenie dla akceptowania lub odrzucania przez obywateli opisywanych przez naukowców mechanizmów globalnego ocieplenia oraz wyboru sensownych środków zaradczych mających szansę zmniejszania skutków globalnego kryzysu. Zrozumienie obiegu węgla oraz

PODSTAWA PROGRAMOWA PRZEDMIOTU BIOLOGIA

nakłada obowiązek „planowania i przeprowadzenia doświadczenia wykazującego wpływ wybranych czynników na intensywność procesu fotosyntezy” (treści nauczania I.6.) już w piątej klasie szkoły podstawowej.

¹ Piosenka o fotosyntezie: <https://www.youtube.com/watch?v=tBw-onF8dMk> (dostęp: 07.2024)

przepływu energii w ekosystemach jest niezbędne do podejmowania odpowiedzialnych decyzji przez nas jako obywateli świata w erze globalnych zagrożeń ekosystemów. Publiczna debata na temat strategii sekwestracji węgla ma niewielki sens, bez świadomości, że wszystkie one polegają na magazynowaniu węgla w stabilnych strukturach długo żyjących, drzewiastych roślin lub torfu. Niezbędne jest, aby programy nauczania biologii lepiej sprzyjały rozumieniu tego procesu.

BŁĘDNE PRZEKONANIA ZWIĄZANE Z ROZUMIENIEM FOTOSYNTEZY

Uczniowie przychodzący na lekcje o fotosyntezie mogą posiadać wiele różnych błędnych przekonań dotyczących tego procesu oraz funkcjonowania roślin. Błędne przekonania, jeśli nie zostaną zdiagnozowane przez nauczyciela, zauważone przez ucznia i przepracowane, mogą utrudniać uczniowi prawidłowe rozumowanie podczas lekcji, a także prowadzić do niezrozumienia procesu i niepowodzenia w nauce.

LISTA POWSZECHNYCH BŁĘDNYCH PRZEKONAŃ ZWIĄZANYCH Z FOTOSYNTEZĄ:

1. Wzrost masy roślin pochodzi z substancji pobieranych z gleby (+ gazy nie mają masy).
2. Rośliny pobierają pożywienie korzeniami.
3. Rośliny jedzą energię słoneczną.
4. Głównym produktem procesu fotosyntezy jest tlen.
5. Rośliny prowadzą fotosyntezę, aby zwierzęta mogły oddychać tlenem.
6. Rośliny są zielone, ponieważ pochłaniają zielone spektrum światła, które napędza fotosyntezę.
7. Rośliny prowadzą fotosyntezę w dzień, a oddychanie komórkowe (tylko) w nocy.
8. Rośliny prowadzą (tylko) fotosyntezę, a zwierzęta oddychają.
9. Fotosynteza i oddychanie komórkowe są dokładną odwrotnością.
10. Ciemna faza fotosyntezy/cykl Kelvina zachodzi tylko w ciemności.
11. Im więcej światła, tym fotosynteza zachodzi intensywniej. Lub: Intensywność fotosyntezy po osiągnięciu punktu wysycenia światłem spada.
12. Lasy deszczowe są głównym dostawcą tlenu atmosferycznego, którym oddychamy w ciągu roku.
13. Hodowle leśne są sposobem na sekwestrację (pochłanianie) nadmiaru dwutlenku węgla produkowanego przez człowieka.
14. Młode drzewo jest lepszym magazynem dwutlenku węgla niż stare.
15. Złóża paliw kopalnych nie powstały w wyniku fotosyntezy / nie mają z nią związku.

Planowanie i prowadzenie doświadczeń badających intensywność fotosyntezy

Badanie fotosyntezy jest popularnym doświadczeniem szkolnym na różnych etapach edukacyjnych. Przeprowadzenie go jest proste, ale dostępne nauczycielom i uczniom materiały edukacyjne – zarówno z podręczników szkolnych, jak i otwartych zasobów internetowych – są pełne podstawowych błędów, które utrudniają efektywne przeprowadzenie obserwacji i badania tego procesu. Obserwacja zjawiska fotosyntezy i jej badanie jest wartościowym rozwiązaniem dydaktycznym służącym eliminacji błędnych przekonań, prowadząc do lepszego długoterminowego zapamiętania podstawowych właściwości procesu. Z kolei ćwiczenia rozumowania oparte o zebrane dane i obserwacje służyć będzie głębszemu zrozumieniu przebiegu procesu, zależności i jego znaczenia.

POWIELANE BŁĘDY DOŚWIADCZEŃ Z FOTOSYNTEZĄ TO M.IN:

- próba obserwowania pęcherzyków gazu unoszących się z liści, zamiast z uciętej łodyżki;
- badanie prowadzone w wodzie gazowanej;
- badanie prowadzone w wodzie destylowanej;
- brak stosownych kontroli do proponowanego pytania badawczego.

MOŻLIWE PROBLEMY BADAWCZE

Procedury doświadczalne można zastosować do badania różnych zmiennych niezależnych, w zależności od pytań badawczych, jakie staną się obszarem dociekań uczniowskich. Oto przykładowe problemy badawcze:

- Czy światło słoneczne jest niezbędne do przebiegu fotosyntezy?
- Badanie wpływu poszczególnych czynników środowiska na intensywność fotosyntezy:
 - intensywność światła,
 - kolor światła
 - stężenie CO_2
 - temperatura,
- Jaki wpływ na proces fotosyntezy ma zanieczyszczenie wody, np.:
 - zasolenie,
 - pH,
 - stężenie jonów azotowych, fosforanowych itp.
 - obecność detergentów.
- Czy kolor liści ma wpływ na intensywność fotosyntezy? Porównanie między odmianami rośliny akwariowej o liściach zielonych i czerwonych.
- Porównanie intensywności fotosyntezy między różnymi gatunkami roślin.

CO BADAĆ CZYLI DOBÓR OBIEKTU DO BADANIA

Do badania fotosyntezy niezbędna jest roślina. Opisane w poradniku procedury umożliwiają obserwację procesu przebiegającego w roztworze wodnym, gdzie dwutlenek węgla jest rozpuszczony w postaci jonów węglanowych. Badania można prowadzić na naczyniowych roślinach wodnych (protokół 1.) lub na fragmentach liści roślin lądowych (protokół 2.).

Wybór gatunku do badania fotosyntezy w roślinach wodnych: w tradycyjnych protokołach tego doświadczenia proponuje się moczarkę kanadyjską (*Eloдея canadiensis*). Obecnie coraz trudniej ją kupić w sklepach akwariowych ze względu na to, że znajduje się na liście ostrzegawczej roślin inwazyjnych (kategoria S4). Nadal bez problemu można ją kupić w sklepach internetowych. Polecamy zastąpienie moczarki innymi naczyniowymi roślinami wodnymi dostępnymi w sklepach akwariowych – nam sprawdziły się świetnie: *Ludwigia*, *Lobelia*, *Bacopa*, *Cabomba*, *Rotala*, *Ceratophyllum* (rogatek). Rośliny można pozyskać także ze środowiska naturalnego – np. rogatek. Do badania należy uciąć gałązki długości około 5-7 cm.



Elodea canadensis



Rotala macrandra



Bacopa crenata



Cabomba sp.



Ludwigia peruensis



Ludwigia repens

www.waterandgarden.pl

Hodowla i przechowywanie roślin wodnych: rośliny należy przechowywać w dobrze napowietrzonym i dobrze naświetlonym akwarium lub innym pojemniku z wodą w temperaturze pokojowej lub nieco cieplejszej. W sali szkolnej można założyć całoroczną hodowlę roślin wodnych w akwarium wyposażonym w system uzdatniania wody w CO₂ (profesjonalne z butlą i dozownikiem CO₂ albo domowe z bioreaktorem drożdżowym lub kwaskowo-

-sodowym) oraz wyposażone w odpowiednio dobrane do roślin oświetlenie. Prowadzenie akwariarium może stanowić ciekawy projekt dla uczniów. Przy zastosowaniu systemu uzdatnienia wody w CO₂ oraz dobre oświetlenie, obserwację wydzielania bąbelków z powierzchni liści oraz obciętych łodyżek można oglądać na co dzień w akwariarium.

Najlepsze liście do badania w procedurze 2. z krążków liści: Liście powinny pochodzić z młodej rośliny/gałązki i być świeże. Nam najlepiej sprawdzały się krążki z liści „*baby szpinak*” kupione w torebce lub zwykłego szpinaku, a także liście bazylii z rośliny kupionej jako świeże zioło w hipermarkecie. Oba produkty dostępne są w handlu przez cały rok. W proponowanej procedurze nie sprawdzają się liście posiadające dużo włosków na powierzchni, jak liście rzodkiewki.

JAK BADAĆ, CZYLI DOBÓR ZMIENNYCH NIEZALEŻNYCH: CZYNNIK ZMIENIANY W DOŚWIADCZENIU

Zmienna niezależna jest dobierana w zależności od wybranego problemu badawczego. Liczba wariantów zmiennej niezależnej może być różna, ale minimum to dwa warianty, w tym jeden z nich będzie stanowił próbę kontrolną. Wariant kontrolny pozwala na porównanie wyników i potwierdzenie, czy obserwowane zmiany są wynikiem działania wybranej zmiennej niezależnej.

Temperatura: jest czynnikiem wpływającym na działanie każdego układu biologicznego ze względu na wrażliwość enzymów katalizujących reakcje. Testowane temperatury najlepiej wybrać z zakresu od 0°C do 50°C. Wyższe temperatury będą powodowały dezaktywację enzymów, a zatem ustanie katalizowanego procesu. W wariancie z próbą zdenaturowaną cieplnie można rozstrzygać, czy obserwowana reakcja jest procesem biologicznym.

Intensywność światła białego: Intensywność najlepiej regulować odległością próbki od źródła światła (żarówki), najlepiej w zakresie 10 – 100 cm, pamiętając, że intensywność światła maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości² ($=1/r^2$). Różną intensywność światła można także uzyskać, stosując żarówki o różnej jasności (lumeny), porównując światło słoneczne ze światłem sztucznym lub owijając żarówkę szarymi filtrami (folie przezroczyste o różnym odcieniu szarości). Pomiar ilości światła docierającego do próbki można prowadzić światłomierzem, np. w telefonie komórkowym – aplikacje takie jak *phyphox* (<https://phyphox.org/>) pozwalają na badawcze użycie czujników obecnych w telefonie.

Jakiego oświetlenia użyć w badaniu? Im mocniejsza żarówka, tym lepiej! Nam najlepiej sprawdza się duża żarówka fotograficzna: 85W / 230V fluorescencyjna o temperaturze barwowej: 5500K i strumieniu świetlnym: 5000 lm, imitująca światło dzienne. Duża żarówka ma także tę zaletę, że stanowi obiekt

² <https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/pytania/zaleznosc-natezenia-swiatla-od-odleglosci/>



zainteresowania i entuzjazmu uczniów, a wokół niej zmieści się dużo badanych próbek. Dobrze sprawdzają się też lampy diodowe LED do akwariów roślinnych, o temperaturze barwowej 5500-9000 K i strumieniu świetlnym powyżej 1000 lm, albo zamienniki tradycyjnych żarówek 100W. Spróbuj także postawić przezroczyste naczynie z rośliną na włączonej latarce telefonu komórkowego – często jest to wystarczające źródło światła.

Barwa światła: filtry/folie przezroczyste w różnych kolorach: czerwony, zielony, niebieski, żółty. W doświadczeniach dobrze sprawdza się przezroczysta kolorowa folia typu celofan (<https://nowaszkola.com/art,16752>) albo kolorowe filtry fotograficzne, oświetleniowe do reflektorów i nakładki do obiektywów do obserwacji planet. Możliwe jest też zastoso-

wanie kolorowych żarówek LED, ale ze względu na niską intensywność emitowanego światła proces fotosyntezy będzie przebiegał bardzo wolno.

Dostępność dwutlenku węgla: porównanie przebiegu procesu w wodzie odgazowanej pozbawionej dwutlenku węgla i w wodzie z wysoką zawartością rozpuszczonych jonów węglanowych. Możliwe jest też porównanie różnych stężeń jonów w wodzie mineralnej wzbogaconej w jony wodorowęglanowe lub roztworem sodu oczyszczonej (NaHCO_3) w wodzie kranowej.

Jak uzyskać wodę bogatą w CO_2 ?

1. Woda świeżo pobrana z kranu jest wystarczająco napowietrzona do prowadzenia proponowanych doświadczeń.
2. Wodę można wzbogacić w CO_2 , rozpuszczając jony wodorowęglanowe z kuchennej sody oczyszczonej. Roztwór 1% będzie właściwy. **Przygotowanie 1% roztworu wodorowęglanu sodu:** odważ 5g sody oczyszczonej (1 płaska łyżeczka), wsyp do naczynia z miarką, zalej wodą kranową do poziomu 500 ml. Zamieszaj, pozostaw do rozpuszczenia i osiągnięcia temperatury pokojowej.
3. **Niegazowane** wody mineralne oraz wysoko zmineralizowane są dobrym źródłem dwutlenku węgla, gdyż mają wysoką zawartość rozpuszczonych jonów wodorowęglanowych.
4. Gazowy CO_2 bardzo dobrze rozpuszcza się w wodzie, dlatego ciekawym sposobem jest przepuszczenie przez wodę gazowego dwutlenku węgla za pomocą zanurzonej rurki. Można go wyprodukować np. w fermentacji drożdżowej albo z mieszaniny roztworów kwasu cytrynowego i sody.
5. Względną zawartość CO_2 rozpuszczonego w wodzie można zbadać za pomocą wskaźnika pH – akwariowego indykatora CO_2 (np.: <https://sklep.mcten.pl/381-indykatory-co2>) lub pH-metru.

UWAGA!

W proponowanych doświadczeniach nie należy używać mineralnej **wody gazowanej!** Obecność dużej liczby pęcherzyków gazu w wodzie uniemożliwia prawidłowy odczyt wyników doświadczenia.

Jak uzyskać wodę odgazowaną?

Gotująca się woda nie zawiera rozpuszczonych w sobie gazów. Podczas schładzania, gazy z powietrza stopniowo rozpuszczają się w wodzie. Aby uzyskać wodę pozbawioną gazów, wystarczy świeżo zagotowaną wodę zamknąć w szczelnym pojemniku i schłodzić bez dostępu do powietrza. **Przygotowanie wody odgazowanej:** dzień przed doświadczeniem zagotuj pół litra wody kranowej lub mineralnej. Gorącą wodę przelej ostrożnie do 500 ml słoika, zakręć i odstaw do ostygnięcia.

UWAGA!

Woda odgazowana to nie jest woda demineralizowana ani destylowana!

Doświadczenia nie należy prowadzić w wodzie destylowanej, ponieważ nie jest to odpowiednie środowisko dla życia rośliny, a destylacja nie oznacza, że w takiej wodzie nie ma rozpuszczonych gazów.

**JAK MIERZYĆ, CZYLI MOŻLIWE ZMIENNE ZALEŻNE:
PARAMETR MIERZONY LUB OBSERWOWANY W DOŚWIADCZENIU**

Zmienna zależna wynikać będzie z dobranej procedury badania. Badacz obserwuje zmienną zależną, aby ocenić efekt działania zmiennej niezależnej (badanego czynnika). Jej świadomy dobór jest potrzebny, aby prawidłowo notować wyniki oraz wyciągać wnioski. Zmienne zależne mogą być ilościowe (np. objętość gazu, wysokość rośliny, tempo wydzielania produktu) lub jakościowe (np. zmiana koloru, powstanie osadu, zmiana wyglądu badanego obiektu). Wybrane procedury zakładają bezpośrednią (pęcherzyki gazu w protokole 1.) lub pośrednią (wypływanie krążków liści w protokole 2.) obserwację tempa wydzielania jednego z produktów fotosyntezy – tlenu.

Liczba wydzielanych pęcherzyków tlenu w czasie.

Z przeciętej łodygi rośliny wodnej w warunkach prowadzenia fotosyntezy będzie się wydzielał tlen w postaci pęcherzyków. Pomiar można prowadzić w ciągu 30 sekund lub 1 minuty i powtórzyć go kilkakrotnie.

Objętość wydzielanego tlenu w czasie.

W procedurze 1. gaz można także gromadzić w odwróconej, napełnionej wodą probówce nałożonej na łożyskę rośliny wodnej. Aby pomiar dało się odczytać, proponujemy prowadzenie doświadczenia przez kilka godzin albo całą dobę i odczytanie względnej objętości zgromadzonego gazu np. w milimetrach słupa, jeśli gaz gromadzimy w szklanej probówce. Gaz można zbierać w małej strzykawce 1 ml tzw. „insulinówce”, która ma dokładną podziałkę objętości, bez tłoczka, z zatkanym plasteliną wylotem. Ze względu na niewielkie objętości wydzielanego gazu przez jedną łożyskę, można zastosować pomiar kilku gałązek rośliny zebranych pod odwróconym lekiem, na wylot lejka nakłada się probówkę zbierającą gaz.

Czas wypłynięcia krążka liścia na powierzchnię roztworu

W procedurze 2. (badania wyciętych krążków liści) parametrem mierzonym jest tempo wypływania krążków na powierzchnię roztworu, świadczące o produkcji tlenu w komórkach liścia. Zgromadzony w tkankach gaz powoduje unoszenie się krążków.

SPRÓBUJ TAKŻE: STOPIEŃ ZUŻYCIA ROZPUSZCZONEGO CO₂.

Sposobem monitorowania procesu fotosyntezy może być pomiar ubytku substratu czyli dwutlenku węgla w próbach. W tym celu w roztworze, w którym zanurzone są rośliny wodne lub krążki liści można rozpuścić czuły wskaźnik pH (np. akwariowy indykator CO₂). Pozwoli to na obserwację zmiany barwy roztworu wraz z obniżającym się stężeniem rozpuszczonych jonów węglanowych zużywanych w procesie fotosyntezy.

Jakich błędów unikać, obserwując fotosyntezę?

Doświadczenia nie należy prowadzić w kupnej wodzie mocno gazowanej. W takiej wodzie na całej powierzchni naczynia oraz rośliny pojawiają się bąbelki gazu – CO₂ z wody. Wszystkie powierzchnie chropowate, w tym końcówka uciętej łodygi, stają się centrami kondensacji dwutlenku węgla rozpuszczonego w wodzie gazowanej. Nie da się ich odróżnić od bąbelków tlenu powstałych w wyniku fotosyntezy. To jest bardzo rozpowszechniony błąd w wielu szkolnych materiałach edukacyjnych – zarówno w podręcznikach jak i filmikach w serwisie YouTube.

W doświadczeniach nie należy używać wody destylowanej. Jest ona środowiskiem hipotonicznym, szkodliwym dla rośliny. Woda destylowana to nie to samo co woda odgazowana. Woda destylowana jest wodą pozbawioną minerałów i soli rozpuszczalnych, ale nie gazów, które rozpuszczają się z powietrza.

Nie należy używać żarówek żarowych. Ich dostępność jest coraz mniejsza, więc ten problem jest rzadki, ale odradzamy ich używanie ze względu na produkowaną przez nie wysoką temperaturę. Po pierwsze uczniowie mogą się łatwo poparzyć operując blisko takiej żarówki, po drugie roztwór wodny, w którym prowadzone jest doświadczenie, będzie się ogrzewał, co zmienia warunki badanego procesu.

BEZPIECZEŃSTWO:

- W doświadczeniu nie występują czynniki szkodliwe lub niebezpieczne.
- Uwagę i ostrożność należy zachować przy obsłudze lamp i żarówek.
- W sali należy przygotować stanowisko z lampką podłączoną do prądu, do którego grupy badawcze będą miały swobodny i bezpieczny dostęp.
- Uczniowie wrażliwi na jasne światło powinni włożyć ciemne okulary.
- Po dotykaniu roślin wodnych i wody z akwarium należy umyć ręce.

Jakie doświadczenie przeprowadzisz?

Umiejętność projektowania i prowadzenia doświadczeń przyrodniczych jest złożona, a jej kształcenie w procesie edukacyjnym powinno być rozłożone w czasie na poszczególne elementy składowe. Uczniowie znający zasady projektowania i wprawni w dobieraniu układów badawczych powinni sami formułować interesujące ich pytania badawcze i dobierać procedury. Jednak zanim osiągną ten stopień samodzielności badawczej, mogą skorzystać z przedstawionych w poniższej tabeli propozycji układów badawczych dla przykładowych pytań. Tabela zawiera propozycje pytań badawczych w zestawieniu z prawidłowym doborem prób, aby łatwiej było dobrać odpowiednie komponenty na lekcję lub projekt badawczy.

Pytanie badawcze	Zmienna niezależna	Zastosowany protokół	Zmienna zależna	Próba kontrolna
Czy światło słoneczne jest niezbędne do przebiegu fotosyntezy?	Obecność/ brak światła	1. wydzielanie tlenu przez rośliny wodne	Liczba pęcherzyków gazu uwalniana w czasie	Próba trzymana w ciemności
Czy światło słoneczne jest niezbędne do przebiegu fotosyntezy?	Obecność/ brak światła	2. badanie fotosyntezy za pomocą krążków z liści	Liczba krążków uniesionych na powierzchnię w czasie	Próba trzymana w ciemności
Czy intensywność światła ma wpływ na intensywność fotosyntezy?	Odległość od źródła światła (np. próby ustawione co 10 cm)	2. badanie fotosyntezy za pomocą krążków z liści	Czas wypłynięcia wszystkich krążków w próbie	Próba w ciemności (negatywna) lub próba najbliższej światła (pozytywna)
Czy kolor światła ma wpływ na intensywność fotosyntezy?	Próby owinięte kolorowymi przezroczystymi foliami	1. wydzielanie tlenu przez rośliny wodne	Liczba pęcherzyków gazu uwalniana w czasie	Próba w świetle białym
Czy dostępność CO ₂ ma wpływ na intensywność fotosyntezy?	Próba w wodzie bogatej w rozpuszczony CO ₂	2. badanie fotosyntezy za pomocą krążków z liści	Czas wypłynięcia wszystkich krążków w próbie	Próba w wodzie pozbawionej rozpuszczonych gazów
Czy zasolenie wody ma wpływ na intensywność fotosyntezy?	Próby w wodzie o różnym stężeniu rozpuszczonej wybranej soli	1. wydzielanie tlenu przez rośliny wodne	Liczba pęcherzyków gazu uwalniana w czasie	Próba w czystej wodzie
Czy kolor liści ma wpływ na intensywność fotosyntezy?	Rośliny tego samego gatunku w różnych odmianach kolorystycznych np. <i>Rotala</i> zielona i czerwona	1. wydzielanie tlenu przez rośliny wodne	Liczba pęcherzyków gazu uwalniana w czasie	Odmiana rośliny o liściach zielonych

Procedura 1. Obserwacja wydzielania tlenu przez rośliny wodne

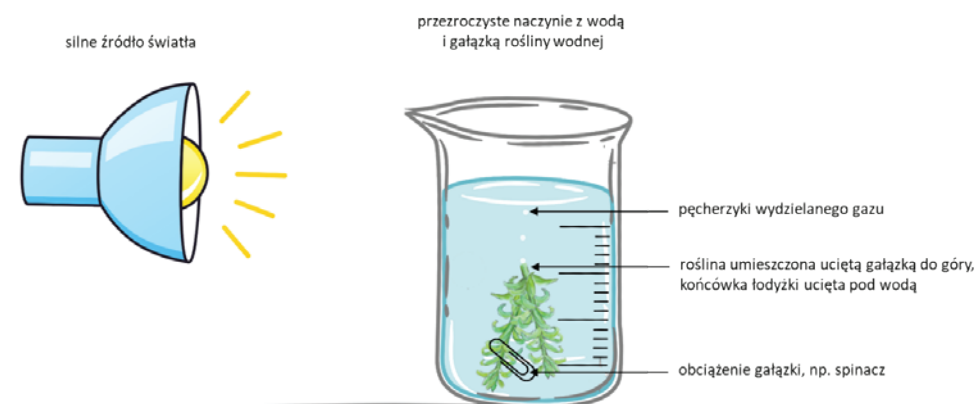
ODCZYNNIKI I MATERIAŁY:

- gałązki naczyniowej rośliny wodnej, długości około 5-7 cm
- woda kranowa lub mineralna niegazowana bogata w rozpuszczony CO_2
- przezroczyste szklane naczynie 100-250 ml
- lampka z mocną żarówką (np. o temperaturze barwowej: 5500K i strumieniu świetlnym: 5000 lm)
- stoper / zegarek z sekundnikiem

PRZEBIEG PROCEDURY:

1. Do przezroczystego naczynia nalej wodę kranową w temperaturze pokojowej do wysokości 15 cm.
2. W wodzie umieść gałązkę rośliny wodnej długości ok. 5-7 cm wierzchołkiem do dołu, a uciętą łodyżką do góry. Jeśli gałązka wypływa, obciąż wierzchołek metalowym spinaczem do papieru. Uważaj, aby nie uszkodzić gałązki.
3. Pod powierzchnią wody odetnij nożyczkami końcówkę łodyżki.
4. Postaw naczynie z rośliną blisko (około 15 cm) silnego źródła światła.
5. Obserwuj pojawiające się na końcu uciętej łodyżki pęcherzyki gazu. Policz, ile pęcherzyków uwalnianych jest w ciągu 1 minuty.
6. Notuj wyniki w dzienniku laboratoryjnym.
7. Sprawdź, czy światło ma wpływ na przebieg procesu – wyłącz światło i obserwuj liczbę pęcherzyków uwalnianych w ciągu 1 minuty. Czy liczba ta jest inna niż przy świetle? Dlaczego? Jak szybko roślina reaguje na zmianę natężenia światła?

W podobny sposób przygotuj kolejne próby kontrolne i badawcze, dobierając odpowiednie do pytania badawczego warunki prowadzenia doświadczenia.



PRÓBY KONTROLNE

Aby obserwacja stała się doświadczeniem, niezbędne jest postawienie pytania badawczego ze wskazaną zmienną niezależną oraz dobór odpowiednich prób kontrolnych. Próbą kontrolną służącą porównaniu wyników z prób badanych może być próba kontrolna pozytywna z widocznym w niej optymalnym przebiegiem procesu w warunkach dostępności CO_2 , światła oraz prowadzone w temperaturze pokojowej, czyli ta opisana w procedurze 1.: naczynie z gałązką rośliny umieszczoną w wodzie kranowej (bogatej w rozpuszczony CO_2) w temperaturze pokojowej, stojące blisko źródła światła.

Próby kontrolne negatywne będą się różnić w zależności od badanej zmiennej. Na przykład:

- bez dostępu do światła – dla pytania badawczego o wpływ światła na proces;
- bez dostępu do CO_2 , czyli w wodzie pozbawionej rozpuszczonych gazów – dla pytania badawczego o wpływ stężenia CO_2 na proces.

ZMIENNA ZALEŻNA: PARAMETR MIERZONY LUB OBSERWOWANY W DOŚWIADCZENIU

Czas wypłynięcia krążka na powierzchnię: w tym doświadczeniu parametrem mierzonym jest tempo wypływania krążków liści na powierzchnię, świadczące o produkcji tlenu w komórkach liścia. Zgromadzony w tkankach gaz powoduje unoszenie się krążków.

PRZYGOTOWANIE PRZED DOŚWIADCZENIEM:

- Rośliny wodne przed doświadczeniem należy przechowywać w naświetlonym i napowietrzonym akwarium/pojemniku z wodą.
- W sali należy przygotować stanowisko z lampką podłączoną do prądu, do którego grupy badawcze będą miały swobodny i bezpieczny dostęp.
- Opcjonalnie: Przygotowanie 1% roztworu wodorowęglanu sodu: odważ 5g sody oczyszczonej, wsyp do naczynia z miarką, zalej wodą kranową do poziomu 500 ml. Zamieszaj, pozostaw do rozpuszczenia i osiągnięcia temperatury pokojowej.
- Opcjonalnie: Przygotowanie wody odgazowanej: dzień przed doświadczeniem zagotuj pół litra wody kranowej lub mineralnej. Gorącą wodę przelej ostrożnie do 500 ml słoika, zakręć i odstaw do ostygnięcia.

WYTŁUMACZENIE OBSERWOWANEGO ZJAWISKA

Jakie czynniki wpływają na intensywność fotosyntezy?

Fotosynteza, jako proces chemiczny katalizowany przez enzymy, limitowana jest czynnikami takimi jak każdy inny proces enzymatyczny: stężeniem substratów i produktów, pH środowiska, temperaturą, zasoleniem. Jest to zarazem proces zależny od światła – zatem będzie reagować zarówno na intensywność oświetlenia (wyrażona np. w lumenach), jak i długość docierających do liścia fal świetlnych (kolor światła określony w nm długości fali świetlnej). Poza czynnikami środowiska, znaczenie będzie także miała kondycja fizjologiczna rośliny w momencie badania i liczba fotosyntetyzujących liści na łodydze.

Dlaczego obserwujemy wydzielanie pęcherzyków gazu z uciętej gałązki?

Obserwacja uwalnianych z łodygi bąbelków tlenu jest nieco sprzeczna z intuicją. Zwykle uczniowie dowiadują o fotosyntezie w roślinie lądowej, w której wymiana gazowa odbywa się przez aparaty szparkowe. Rośliny wodne (hydrofity) nie posiadają aparatów szparkowych ani kutykuli na liściach wodnych, a gazy dyfundują z/do wody przez powierzchnię liści i łodyg. Obserwowany w doświadczeniu proces uwalniania bąbelków z łodygi rośliny wodnej jest możliwy dzięki cechom adaptacyjnym tych roślin umożliwiającym przetrwanie pod wodą. W łodygach znajduje się wyspecjalizowana tkanka wypełniona gazem, zwana **aerenchymą (mięgisz powietrzny)**. Gaz ten umożliwia unoszenie się łodyg w toni. Gazy w przestrzeniach powietrznych w łodydze ułatwiają dyfuzję i dystrybucję gazów – tlenu i dwutlenku węgla do wszystkich części rośliny. Pozwala to komórkom w korzeniach oddychać tlenem wytworzonym przez liście. Gazy wytwarzane w korzeniach będą również dyfundować w górę przez przestrzenie powietrzne w łodydze. Kiedy łodyga zostanie odwrócona do góry nogami i przecięta pod poziomem wody, gaz może wydostawać się z przestrzeni powietrznych, co obserwujemy w postaci pęcherzyków.

SPRÓBUJ TAKŻE:

Zaobserwuj budowę aerenchymy. Wykonując przekroje poprzeczne łodyg różnych gatunków roślin wodnych, możemy obserwować strukturę aerenchymy – tkanki z dużymi przestrzeniami powietrznymi widocznymi na przekroju. U różnych gatunków roślin wodnych przestrzenie powietrzne w łodydze różnią się kształtem, zwartością i objętością. Preparaty można wybarwić np. 0,5% roztworem błękitu toluidyny lub błękitu metylenowego, aby zwiększyć kontrast i lepiej uwidocznić obserwowane struktury.

DOBRE PRAKTYKI

Ułożenie łodygi rośliny wodnej w doświadczeniu ma znaczenie! Łodygę rośliny należy ułożyć „do góry nogami”, czyli obciętą łodygą skierowaną do góry. Jest to potrzebne, aby gazy produkowane przez roślinę mogły swobodnie wydostać się przeciętą częścią łodygi, a badacz wygodnie mógł obserwować i liczyć uwalniane pęcherzyki gazu.

Końcówkę łodygi rośliny wodnej należy na świeżo obciąć pod wodą. W docelowym naczyniu, gdzie prowadzona będzie obserwacja, gdy łodyga cała jest zanurzona pod powierzchnią wody, należy ostrymi nożyczkami odciąć końcówkę łodygi. Dzięki temu łatwiej formować się będą małe bąbelki gazu szybko dryfujące do góry.

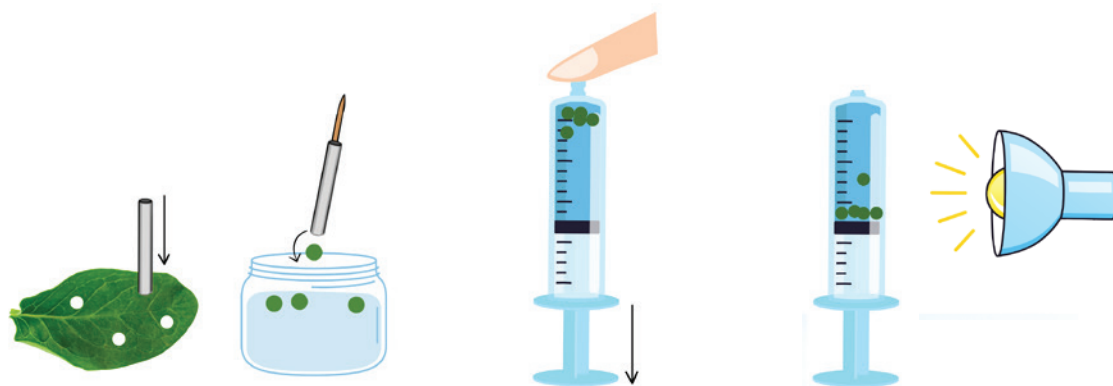
Procedura 2. Obserwacja fotosyntezy za pomocą krążków z liści

ODCZYNNIKI I MATERIAŁY:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Świeże liście np. szpinak, bazylia• Duża zlewka z wodą bogatą w rozpuszczony CO_2 (np. woda kranowa) | <ul style="list-style-type: none">• Szeroka słomka do napojów, krótko ucięta• wykałaczka• strzykawka o poj. 10-20 ml• Lampa z mocną żarówką min. 1000 lm |
|---|---|

PRZEBIEG PROCEDURY:

1. Za pomocą krótkiej słomki do napojów wytnij krążki liści. Od razu umieść je w zlewce z wodą wypychając ze słomki wykałaczka. Zadbaj o to, aby nie wyschły. Do jednej strzykawki potrzeba będzie 10 krążków.
2. Wyjmij tłoczek ze strzykawki, w pustej strzykawce umieść 10 krążków liści.
3. Załóż tłoczek i pobierz do strzykawki ok. 5 ml wody.
4. Trzymając strzykawkę dzióbkiem do góry, wypuść z niej nadmiar powietrza. Zatkaj dzióbek strzykawki szczelnie palcem.
5. Trzymając zatkaną strzykawkę dzióbkiem w górę, pociągnij tłoczek strzykawki **w DÓŁ** – tak, aby wewnątrz wytworzyło się **podciśnienie**. W roztworze zobaczysz wytrącające się pod wpływem podciśnienia pęcherzyki gazów.
6. Zwolnij zatkaną palcem wylot strzykawki, pozwól krążkom swobodnie opadać. Potrząśnij aby krążki nie przyklejały się do ścianek ani powierzchni wody.
7. Powtórz czynności 2-3 kilkukrotnie, aż wszystkie krążki opadną. Jeśli 1-2 krążki uparcie nie chcą opaść – zostaw je, zanotuj w dzienniku laboratoryjnym ile krążków opadło.
8. Uzupełnij strzykawkę do poziomu 10 ml wodą bogatą w CO_2 .
9. Postaw strzykawki na tłoczkach (dzióbkami do góry) na świetle. Włącz stoper.
10. Co 5 minut notuj liczbę krążków, które wypłynęły na górę roztworu LUB: dla każdego krążka notuj czas, po którym uniósł się na powierzchnię roztworu. Obserwacja może trwać do 20 minut (przy słabszym źródle światła do 30 minut).
11. Notuj wyniki w dzienniku laboratoryjnym.
12. Sprawdź, czy światło ma wpływ na przebieg procesu – drugą tak samo przygotowaną strzykawkę z krążkami liści postaw w ciemnym miejscu, np. szafce lub owiń folią aluminiową. Czy liczba krążków, które wypłynęły na górę po badanym czasie, jest taka sama? Dlaczego?



PRÓBY KONTROLNE:

W każdej próbie warto umieścić po 10 krążków, aby zwiększyć badaną liczbę obiektów. Część krążków z różnych powodów może nie chcieć utonąć (obecność tkanki przewodzącej) lub nie wypłynąć (uszkodzenie liści).

W każdym wariantcie doświadczenia próbą kontrolną pozytywną służącą porównaniu wyników z prób badanych może być strzykawka z krążkami liści w wodzie kranowej (bogatej w rozpuszczony CO_2) w temperaturze pokojowej, stojąca blisko źródła światła. Jest to próba kontrolna pozytywna z widocznym w niej optymalnym przebiegiem procesu w warunkach dostępności CO_2 , światła oraz prowadzone w temperaturze pokojowej.

W tym doświadczeniu zawsze należy przygotować także próbę kontrolną negatywną z zachowaniem tych samych parametrów co kontrola pozytywna (woda, temperatura, liczba krążków), ale bez dostępu do światła. Dzięki temu sprawdzimy, czy krążki nie wypływają po pewnym czasie samoistnie, niezależnie od badanego procesu fotosyntezy (np. z powodu uwalnianego w komórkach podczas oddychania komórkowego CO_2).

Inne próby należy konstruować w zależności od badanej zmiennej, na przykład:

- bez dostępu do CO_2 , czyli w wodzie pozbawionej rozpuszczonych gazów – dla pytania badawczego o wpływ stężenia CO_2 na proces;
- ze sparzonymi wcześniej krążkami liści – dla pytania o wpływ denaturacji cieplnej na proces.

SPRÓBUJ TAKŻE:

Jak udoskonalać samą procedurę badania? Możesz badać, czy średnica i kształt krążka liściowego ma wpływ na efektywność opadania i wypływania na powierzchnię.

ZMIENNA ZALEŻNA: PARAMETR MIERZONY LUB OBSERWOWANY W DOŚWIADCZENIU

Czas wypłynięcia krążka na powierzchnię: w tym doświadczeniu parametrem mierzonym jest tempo wypływania krążków liści na powierzchnię, świadczące o produkcji tlenu w komórkach liścia. Zgromadzony w tkankach gaz powoduje unoszenie się krążków.

PRZYGOTOWANIE PRZED DOŚWIADCZENIEM:

- Rośliny wodne przed doświadczeniem należy przechowywać w naświetlonym i napowietrzonym akwarium/pojemniku z wodą.
- W sali należy przygotować stanowisko z lampką podłączoną do prądu, do którego grupy badawcze będą miały swobodny i bezpieczny dostęp.
- Opcjonalnie: Przygotowanie 1% roztworu wodorowęglanu sodu: odważ 5g sody oczyszczonej, wsyp do naczynia z miarką, zalej wodą kranową do poziomu 500 ml. Zamieszaj, pozostaw do rozpuszczenia i osiągnięcia temperatury pokojowej.
- Opcjonalnie: Przygotowanie wody odgazowanej: dzień przed doświadczeniem zagotuj pół litra wody kranowej lub mineralnej. Gorącą wodę przelej ostrożnie do 500 ml słoika, zakręć i odstaw do ostygnięcia.

WYTŁUMACZENIE OBSERWOWANEGO ZJAWISKA

Powstający w procesie fotosyntezy gaz powoduje wypłynięcie liści na powierzchnię roztworu. Liście pozostawione w ciemności pozostają na dnie naczynia. Produkują zapewne dwutlenek węgla w oddychaniu komórkowym, ale CO_2 łatwo rozpuszcza się w wodzie i nie powoduje unoszenia się krążków w obserwowanym czasie.

Przed wystawieniem krążków liści na działanie badanego czynnika trzeba spowodować, aby krążki opadły na dno naczynia. Robi się to za pomocą wywołanego w strzykawce podciśnienia, które wypycha gazy rozpuszczone w tkankach liścia. Czynność należy powtarzać do momentu opadnięcia krążków. Zbyt intensywne działanie podciśnienia na liście może uszkodzić strukturę tkanek do tego stopnia, że nie uda się zaobserwować powtórnego unoszenia – fotosynteza i inne procesy metaboliczne przestaną zachodzić.

Podciśnienie vs nadciśnienie: Aby gazy zawarte w krążku liścia rośliny lądowej zostały uwolnione, w strzykawce należy wytworzyć niższe ciśnienie, a nie nadciśnienie. **Uczniowie często pchają tłoczek w kierunku dzióbka, co jest błędem** – wtedy wytwarza się wyższe ciśnienie i gazy rozpuszczają się lepiej. Przy zatkanej szczelnie strzykawce, tłoczek należy ciągnąć przesuwając go delikatnie w kierunku większych wartości na podziałce mililitrowej. Wtedy

wytwarza się podciśnienie. Oznaką tego jest pojawienie się pęcherzyków gazu w całej objętości roztworu.

SPRÓBUJ TAKŻE:

Prostą obserwację wytrącania gazów w strzykawce pod wpływem podciśnienia można zrobić i omówić również na **lekcji fizyki!**

ROZWIĄZYWANIE PROBLEMÓW

Krażki nie wypływają na powierzchnię (przy zachowaniu optymalnych warunków dla fotosyntezy): przyczyną tego zjawiska jest najczęściej zniszczenie tkanki merystematycznej krążków liści podciśnieniem podczas przygotowania doświadczenia. Zbyt dużo razy pociągano tłoczek i zmieniano ciśnienie w strzykawce, w wyniku czego liście zostały uszkodzone. Aby poradzić sobie z tym problemem, do roztworu, w którym prowadzone jest doświadczenie można dodać **odrobinę detergentu**, zmniejszając napięcie powierzchniowe wody. Innymi przyczynami mogą być: zbyt niskie natężenie światła lub brak jonów węglanowych rozpuszczonych w roztworze.

Łatwiejsze opadanie krążków: Warto do roztworu, w którym prowadzi się badanie dodać odrobinę **detergentu** – w ilości około 1 kropli na litr, aby pomóc wydostać się bąbelkom z liści i zapobiec przyklejaniu się krążków do powierzchni wody oraz boków strzykawki.

Wysychanie krążków: wycięte krążki liści łatwo tracą turgor. Najlepiej wyciąć szybko potrzebne do eksperymentu krążki i umieszczać je od razu po wycięciu w zlewce z wodą kranową. Z tego zbiorniczka dopiero nakładać łyżeczką lub pęsetką wybraną liczbę krążków do strzykawek.

Zachowanie jednorodności krążków: Krążki najlepiej wycinać pomiędzy nerwami liści. Jeśli nerw przechodzi przez krążek, zwykle krążek trudniej będzie opadał na dno strzykawki.

Procedura 3. Badanie fotosyntezy w wirtualnym laboratorium

Doświadczenia polegające na badaniu wpływu różnorodnych czynników na intensywność fotosyntezy mają swoje odzwierciedlenie w bogatym wyborze symulacji komputerowych dostępnych w sieci. Jeśli w szkole nie ma warunków na przeprowadzenie tego doświadczenia w pełnym układzie doświadczalnym, proponujemy rozwiązanie, które połączy obserwację prawdziwego zjawiska, z ćwiczeniami zbierania i analizy danych wirtualnych. Cykl lekcji o fotosyntezie warto rozpocząć od pokazu fotosyntezy u roślin wodnych – obserwacja uwalnianych bąbelków na świetle i po jego wyłączeniu. Pokaz ten traktujemy jako wzbudzenie ciekawości i poszukiwanie odpowiedzi na pytania takie jak:

- czym są uwalniane pęcherzyki gazu,
- czy i dlaczego do procesu potrzebne jest światło,
- jakie czynniki mogą wpływać na przebieg procesu.

Następnie, zgodnie z metodologią dociekania, uczniowie określają własnymi słowami definicję procesu fotosyntezy, a na tej podstawie nauczyciel wprowadza treści związane ze wzorem reakcji, jej przebiegiem i znaczeniem procesu dla funkcjonowania rośliny oraz ekosystemu. Kolejna lekcja może być poświęcona projektowaniu pytań badawczych dotyczących wpływu czynników limitujących na przebieg fotosyntezy oraz zbieraniu danych z symulacji komputerowych, rysowaniu wykresów i ich analizie w celu odpowiedzi na pytania badawcze. Zamiast ćwiczenia czynności manualnych i laboratoryjnych cele takich zajęć będą ogniskować się na sposobach zbierania i analizy danych, pracy z wykresami oraz wnioskowaniu na ich podstawie.

1. <https://leosiiman.neocities.org/lab-rate-of-photosynthesis/photolab-individual> (dostęp 07.2023)

Najprostsza symulacja fotosyntezy prowadzonej przez roślinę wodną pozwalająca na manipulowanie intensywnością naświetlenia (0-3000 lumenów w 4 punktach pomiarowych) oraz wartością temperatury (w zakresie 10-40°C w 3 punktach). Monitorowane parametry to upływ czasu w sekundach oraz liczba uwalnianych przez roślinę wodną pęcherzyków gazu. Symulacja nie rysuje wykresu.

2. https://iwant2study.org/lookangejss/biology/ejss_model_photosynthesis/photosynthesis_Simulation.xhtml (dostęp 07.2023)

Symulacja fotosyntezy rośliny wodnej pozwala na zmianę dwóch parametrów osobno: stężenia CO₂ (w zakresie 0 – 0,3% w 7 punktach pomiarowych) dla stałej intensywności światła oraz zmianę intensywności światła (w zakresie 0-6 względnych jednostek, w 7 punktach) przy stałej zawar-

tości CO₂. Pomiar następuje w stałej jednostce czasu równej 60 sekund. Wynik w postaci liczby uwalnianych pęcherzyków gazu przez minutę umieszczany jest automatycznie na wykresie. Podczas jednej otwartej sesji symulacji można zbierać dane z kolejnych puszczonej eksperymentów ze zmienionymi parametrami. Wykresy gromadzą dane.

3. <https://sites.google.com/site/biologydarkow/metabolism/photosynthesis-simulation> (dostęp 02.2025)

Najbardziej zaawansowana symulacja badania intensywności fotosyntezy w roztworze izolowanych chloroplastów. Czynniki, które można zmieniać w symulacji to: brak/obecność światła, białe światło (pełne spektrum) / wybrane długości fal świetlnych, odległość od źródła światła 0 – 150 cm, stężenie CO₂ 0 – 100 μmoli, temperatura 0 – 100°C, pH roztworu 0 – 14, stężenie NADPH do roztworu 0 – 50 μmoli, stężenie atrazyny (herbicyd, inhibitor fotosystemu II) 0 – 1 μmola. Parametry mierzone i przedstawiane na generowanych automatycznie wykresach to: stężenie ATP, NADPH, glukozy i tlenu. Podczas otwartej sesji wykresy gromadzą dane z kolejnych powtarzanych eksperymentów.

Zadania pogłębiające rozumienie

PYTANIA O ROZUMIENIE PROCEDURY BADAWCZEJ

1. Wymień, jakie czynniki były niezmiennie w Twoim doświadczeniu. Opisz, jakie ma to znaczenie dla interpretacji wyników.

Pytanie dotyczy rozumienia znaczenia zmiennych kontrolowanych w doświadczeniu. Przykładowa odpowiedź może uwzględniać czynniki środowiska, jak również równą wielkość gałązek rośliny, podobną liczbę liści (procedura 1.) lub wielkość i kształt krążków liści (procedura 2.), objętość roztworu, w którym prowadzona jest reakcja, sposób obserwacji wyników itp.

2. Dlaczego należy zadbać o równą wielkość i kształt krążków liściowych?

Pytanie dotyczy rozumienia znaczenia zmiennych kontrolowanych w doświadczeniu. Przykładowa odpowiedź: Wielkość i kształt krążków wpływa na ich masę, powierzchnię oraz objętość wytwarzanego tlenu, a zatem może wpływać na zróżnicowanie tempa ich wypływania na powierzchnię i utrudnić interpretację wyników.

3. Dlaczego gałązka rośliny wodnej powinna być skierowana uciętą częścią do góry?

Przykładowa odpowiedź: Taka pozycja umożliwia swobodny przepływ gazów przez aerenchymę i uwalnianie ich w postaci pęcherzyków, które można liczyć. Przy takim ułożeniu gałązki liczenie pęcherzyków jest łatwiejsze.

4. Jakie znaczenie ma zagotowanie wody i ostudzenie jej w zamkniętym pojemniku przed użyciem w doświadczeniu?
Przykładowa odpowiedź: Taka woda jest pozbawiona gazów, umożliwia przeprowadzenie próby bez dostępu CO_2 do reakcji fotosyntezy.
5. Jakie zalety i wady ma zastosowanie w badaniu krążków liści roślin lądowych w roztworze wodnym?
Odpowiedź powinna uwzględniać zarówno zalety, np. możliwość obserwacji wydzielania gazów, niewidocznych w powietrzu, jak i wady np. to, że środowisko wodne nie jest naturalnym dla liści rośliny lądowej, a zatem wyniki mogą być mniej wiarygodne.
6. O czym świadczy wypłynięcie krążków na powierzchnię?
Świadczy o produkcji gazów wewnątrz liści, gazy wynoszą unoszą krążek na powierzchnię. Jest pośrednim dowodem produkcji tlenu przez liście w procesie fotosyntezy, jeśli porówna się próbę oświetloną i nieoświetloną (w nieoświetlonej krążki nie wypływają).
7. Jakie znaczenie ma umieszczenie aż 10 krążków liści w jednej próbie?
Służy to zwielokrotnieniu próby, zwiększeniu wiarygodności wyników.
8. O jakie warunki w doświadczeniu należy zadbać, aby zaobserwować wydzielanie tlenu w roślinie?
Należy wymienić czynniki niezbędne dla procesu fotosyntezy: dostęp CO_2 i wody, światło, oraz odpowiednie warunki środowiskowe związane z pH, temperaturą, stężeniem osmotycznym itp.
9. Czemu służyła próba kontrolna w doświadczeniu?
Próba kontrolna służy wykazaniu, że obserwowany wynik jest związany z wpływem badanego czynnika.
10. Jakie są możliwe wyjaśnienia, jeśli w jednej z obserwowanych prób nie wydzielają się pęcherzyki gazu (z rośliny wodnej) lub nie unoszą się krążki liści?
Odpowiedzi powinny wskazać możliwe czynniki środowiskowe warunkujące proces fotosyntezy oraz możliwe błędy techniczne uniemożliwiające zaobserwowanie zjawiska.

PYTANIA O ROZUMIENIE WYNIKÓW DOŚWIADCZENIA

1. Czy wyniki są jednoznaczne? Czy wszystkie powtórzenia badania dają podobne wyniki?
2. Czy wyniki wszystkich grup w klasie potwierdzają Twoje wnioski? Jeśli nie, to dlaczego?
3. Czy wynik można wytłumaczyć działaniem jakiegoś innego czynnika lub procesu, niż ten badany?
4. Jak można by inaczej przeprowadzić doświadczenie, aby wyniki były bardziej wiarygodne?
5. Oceń, jak pewna jest Twoja odpowiedź na pytanie badawcze w stosunku do wszystkich roślin na Ziemi?

Odpowiedzi powinny odnosić się do ograniczonych możliwości wnioskowania i uogólniania na podstawie badania jednej rośliny. Mogą również odwoływać się do danych literaturowych potwierdzających badane zjawisko na różnych roślinach.

ĆWICZENIA ROZUMOWANIA NAUKOWEGO

1. Wyjaśnij, dlaczego miarą intensywności fotosyntezy w doświadczeniu z rośliną wodną jest liczba wydzielanych pęcherzyków gazu w czasie. (Lub w doświadczeniu z krążkami liści - tempo wypływania krążków na powierzchnię.)

Przykładowa odpowiedź: Skoro produktem ubocznym fotosyntezy jest tlen, to intensywność jego wytwarzania w postaci pęcherzyków gazu wskazuje na intensywność fotosyntezy.

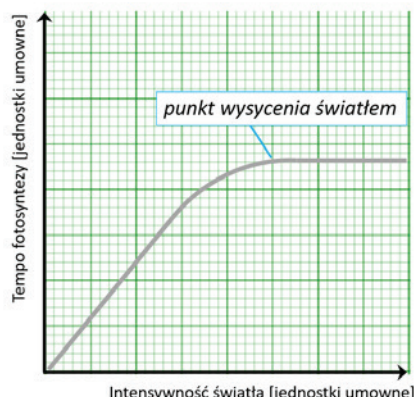
Uwaga: *W składzie obserwowanych pęcherzyków gazu znajduje się zarówno tlen, jak i azot oraz dwutlenek węgla. Na intensywność wydzielania pęcherzyków gazu wpływa także (ujemnie) intensywność oddychania komórkowego. Zatem tempo uwalniania pęcherzyków wskazuje na względną intensywność fotosyntezy.*

2. Co by było, gdyby żarówkę w doświadczeniu zastąpić światłem słonecznym? Opisz jeden bezpośredni skutek i uzasadnij, dlaczego takie jest Twoje przewidywanie.

Przykładowe odpowiedzi powinny uwzględniać różnice między światłem słonecznym a sztucznym:

- Fotosynteza przebiegałaby intensywniej, ponieważ bezpośrednie światło słoneczne jest intensywniejszym źródłem światła niż jakakolwiek żarówka.
- Fotosynteza będzie przebiegać szybciej, gdyż oprócz dostępu do światła próbka będzie także intensywnie nagrzewana słońcem.
- Fotosynteza przebiegałaby wolniej, gdyż słońce może być w momencie prowadzenia badania za chmurami dając mniej intensywne naświetlenie niż żarówka.

3. Na podstawie wykresu opisz zależność, jaka istnieje pomiędzy intensywnością światła a efektywnością fotosyntezy.



Przykładowa odpowiedź: *Im oświetlenie jest intensywniejsze, tym fotosynteza zachodzi efektywniej. Zależność nie jest liniowa na całej długości, po przekroczeniu pewnej wartości naświetlenia, intensywność fotosyntezy nie wzrasta – wartość ta to punkt wysycenia światłem.*

4. Wyjaśnij, dlaczego dochodzi do efektu wysycenia światłem.
Odpowiedź odnosi się do fizjologicznych bądź biochemicznych ograniczeń w zdolności do przekształcania energii świetlnej w energię chemiczną, takich jak: ograniczona liczba centrów reakcji; ograniczenia w transporcie elektronów w tylakoidach; graniczenia fizyczne transportu i dystrybucji zasobów wewnętrznych; stres oksydacyjny przy bardzo wysokim natężeniu światła itp.
5. Wskaż, który z czynników środowiskowych będzie miał efekt zmniejszający intensywność fotosyntezy przy wysokich wartościach tego czynnika. Określ przyczynę tego zjawiska.

- a) intensywność światła
- b) temperatura
- c) stężenie CO_2

Przykładowa odpowiedź: *temperatura, ponieważ w wysokiej temperaturze enzymy prowadzące fotosyntezę będą mniej aktywne lub zdenaturowane.*

6. Narysuj, jaki kształt ma wykres przedstawiający zależność intensywności fotosyntezy od temperatury (lub światła/stężenia CO_2 itp.).
7. W doświadczeniu intensywność fotosyntezy mierzymy ilością wydzielonego produktu ubocznego – tlenu. Jak inaczej można by wykazać, że fotosynteza zachodzi w roślinach? Przedstaw jeden pomysł.

Przykładowe odpowiedzi:

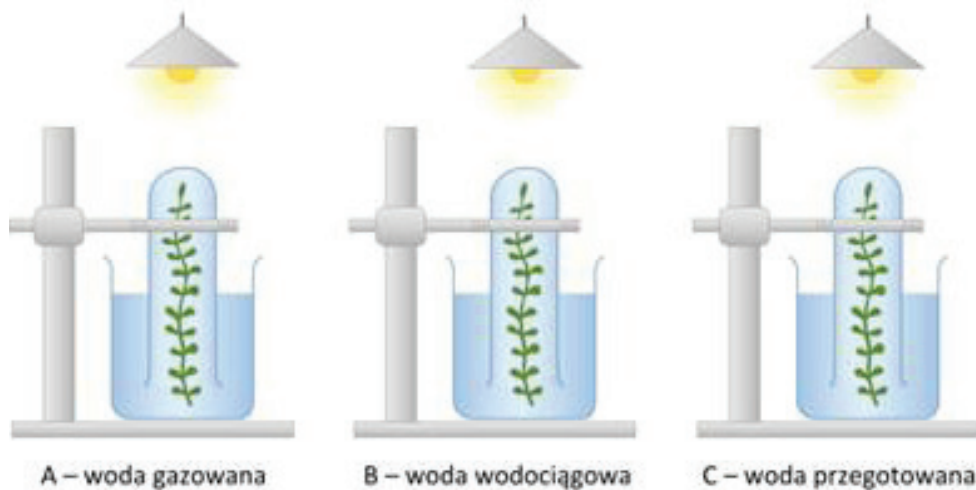
- Pomiar zużycia CO_2 , np. przy użyciu czujnika elektronicznego CO_2 w powietrzu w zamkniętym naczyniu z rośliną, lub poprzez obserwację zmiany odczynu pH roztworu – wraz ze spadkiem stężenia pobieranych jonów HCO_3^- odczyn pH będzie się podnosił.
- Pomiar ilości wytworzonej w liściach skrobi, poprzez wybarwienie roztworem jodyny.

- Pomiar wzrostu suchej masy rośliny (patrz filmik edukacyjny „Magiczne moce roślin, czyli kilka słów o fotosyntezie”, Wydział Biologii UW).
8. Ćwiczenie wyszukiwania błędów merytorycznych i praktycznych w dostępnych publicznie materiałach edukacyjnych. Za przykład takiego materiału może posłużyć film Podkarpackiego Centrum Edukacji Nauczycieli w Rzeszowie: <https://youtu.be/JqcgTU9MSR0>

Polecenie: Obejrzyj film, zanotuj błędy w prowadzeniu i opisie doświadczenia, które widzisz. Uzasadnij dlaczego uważasz wskazany element filmu za błąd.

Przykładowe odpowiedzi:

- *W problemie badawczym doświadczenia określono dwie zmienne niezależne na raz: „Czy fotosynteza zależy od dwutlenku węgla i światła”. W prawidłowym problemie badawczym lepiej skupić się na jednej zmiennej niezależnej.*
 - *W hipotezie odniesiono się tylko do jednego czynnika: „Fotosynteza zachodzi szybciej w obecności dwutlenku węgla”. Brakuje drugiej hipotezy dla drugiego badanego czynnika określonego w problemie badawczym.*
 - *Użycie wody demineralizowanej jako wody pozbawionej CO_2 w próbie kontrolnej. Woda zdemineralizowana stanowi nieprzyjazne środowisko do życia rośliny. Wcale też nie oznacza, że pozbawiona jest gazów rozpuszczonych z powietrza, w tym CO_2 .*
 - *Użycie wody gazowanej w próbie badawczej. Woda mocno gazowana widoczna na filmie uniemożliwia obserwację wydzielanych bąbelków tlenu przez roślinę.*
 - *Nieprawidłowy układ badawczy. Porównywane są dwie próby różniące się (teoretycznie) zawartością dwutlenku węgla dostępnego dla rośliny. Nie uwzględniono prób badających wpływ światła na intensywność fotosyntezy, zawarty w problemie badawczym.*
 - *Rośliny ułożono nieprawidłowo – ucięte łodygi dotykają do powierzchni wody. Sposób ułożenia uniemożliwia obserwację uwalniania pęcherzyków tlenu z obciętej łodyżki.*
 - *Wniosek jest nieuprawniony: „dwutlenek węgla zawarty w wodzie gazowanej zwiększa ilość wydzielania się pęcherzyków tlenu”. W tak przeprowadzonym doświadczeniu nie da się tego stwierdzić. Widoczne pęcherzyki to przede wszystkim pęcherzyki dwutlenku węgla z wody.*
 - *Wniosek jest nieprawidłowy w stosunku do problemu badawczego. Problem odnosił się do dwóch badanych czynników – światła i dwutlenku węgla, a wniosek odnosi się tylko do dwutlenku węgla.*
9. Autorzy podręcznika do biologii prowadzili doświadczenie zgodnie z poniższym opisem. Problem badawczy: Jak ilość dwutlenku węgla wpływa na tempo fotosyntezy moczarki kanadyjskiej? Hipoteza: Im więcej dwutlenku węgla w wodzie, tym proces fotosyntezy u moczarki kanadyjskiej zachodzi intensywniej. Układ badawczy przedstawiony jest na rysunku:



Źródło: Anna Jasnos, licencja: CC BY 3.0. <https://zpe.gov.pl/a/fotosynteza/D8Os1wJXg>

Zanotowano następujące wnioski: Liczba pęcherzyków zliczonych w ciągu 5 minut w zestawie z wodą gazowaną była wyraźnie wyższa od liczby pęcherzyków zliczonych w tym samym czasie w zestawie z wodą niegazowaną. Możemy wnioskować, że intensywność fotosyntezy u moczarki kanadyjskiej zależy od zawartości dwutlenku węgla w wodzie.

Podaj jedno ulepszenie przedstawionego układu badawczego, dzięki któremu zebrane wyniki będą bardziej wiarygodne. Odpowiedź uzasadnij.

W odpowiedzi można wskazać kilka różnych ulepszeń przedstawionego układu. W odpowiedzi uczniów wystarczy, aby wskazany był jeden element do poprawy wraz z adekwatnym uzasadnieniem. Np.

- Wodę gazowaną należy zastąpić wodą wzbogaconą w rozpuszczony CO_2 , ponieważ w wodzie gazowanej liczone pęcherzyki gazu nie muszą świadczyć o zachodzeniu fotosyntezy.
- Gałązki należy ułożyć łodyżką do góry, ponieważ liczenie pęcherzyków jest wtedy łatwiejsze.

ĆWICZENIA ROZUMIENIE PROCESU FOTOSYNTETY

1. Wyjaśnij, dlaczego rośliny nie mogą żyć w zielonym świetle.
Przykładowa odpowiedź: *Barwniki fotosyntetyczne rośliny nie pochłaniają światła zielonego, tylko je odbijają. Dlatego roślina jest widziana jako zielona.*
2. Kiedy jemy ziemniaki, zdobywamy energię dla naszego organizmu. Skąd bierze się energia zgromadzona w ziemniaku i jaką ma formę?
Przykładowa odpowiedź: *Bulwa ziemniaka gromadzi produkty fotosyntezy – cukry proste powstałe w liściach są transportowane i magazynowane w postaci skrobi, wielocukru zapasowego. Energia w roślinach jest magazynowana w formie energii chemicznej.*

3. Wyjaśnij, skąd roślina bierze jedzenie.

Przykładowa odpowiedź: *Rośliny są samożywne, czyli w procesie fotosyntezy same wytwarzają zarówno związki organiczne budulcowe potrzebne do budowy ich ciała, jak i związki energetyczne (pożywienie) zużywane w procesach oddychania komórkowego dostarczającego energię do wszystkich procesów metabolicznych rośliny.*

ZADANIA DO POSZUKIWANIA INFORMACJI:

1. Uzasadnij, dlaczego zimą, kiedy większość roślin w środowisku na naszej półkuli nie ma liści i nie fotosyntetyzuje, nie brakuje nam tlenu do oddychania.
Odpowiedzi powinny odnosić się do przynajmniej jednego z czynników: tlen produkowany przez organizmy fotosyntetyzujące jest rozprowadzany po całym globie dzięki prądom powietrza i cyrkulacji atmosferycznej i jego stężenie w powietrzu jest stałe; wysokie stężenie tlenu w atmosferze stanowi wystarczający rezerwuar dla lokalnych zmian jego stężenia; większość tlenu atmosferycznego (50-80%) jest produkowana przez fitoplankton w oceanach, produkcja ta jest ciągła i niezależna od pór roku; regiony tropikalne pokryte lasami produkują tlen przez cały rok, a cyrkulacja atmosferyczna rozprowadza go po całym globie.
2. Niektóre osoby negujące szkodliwe skutki współczesnego ocieplenia klimatu wskazują, że współczesny wzrost stężenia CO₂ w atmosferze jest korzystny ze względu na możliwość uzyskania większych plonów. Oceń, na ile mają rację, podaj argumenty za swoim stanowiskiem, odnoszące się do warunków funkcjonowania roślin. Danych do odpowiedzi można poszukać np. tu: <https://naukaoklimacie.pl/fakty-i-mity/mit-im-wiecej-co2-tym-lepiej-dla-roslin-47/> <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/nawozenie-roslin-co2-jest-ok-sa-jednak-ale-liczne-ale-203/>
3. Opisz, jaki związek mają złoża paliw kopalnych z procesem fotosyntezy.
Przykładowa odpowiedź: *Paliwa kopalne to przekształcone resztki organizmów roślinnych, które miliony lat temu przetwarzały energię słoneczną na związki organiczne. Te związki, po pogrzebaniu pod warstwami osadów, przekształciły się w węgiel, ropę naftową i gaz ziemny, stanowiąc rezerwuar węgla i energii.*
4. Opisz, skąd wziął się tlen w atmosferze Ziemi i jaki to miało wpływ na rozwój życia na naszej planecie. Danych do odpowiedzi można poszukać np. tu: <https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/nauka/1931318,1,skad-sie-wzial-tlen.read> <https://ciekawe.org/2017/03/09/tlen-z-oceanu-skad-sie-bierze-tlen/>
5. Na podstawie wiedzy o wpływie stężenia CO₂ na intensywność fotosyntezy określ, w jaki sposób w uprawach szklarniowych można zwiększyć obfitość plonów (przyrost biomasy roślin). Sprawdź, czy takie rozwiązania są stosowane w rzeczywistości.

Przykładowa odpowiedź: Stężenie CO_2 w atmosferze ziemskiej wynosi około 0,04%. Punkt wysycenia dwutlenkiem węgla niektóre rośliny lądowe osiągają przy stężeniu około 0,4% w atmosferze. Zatem sztuczne zwiększenie zawartości CO_2 w powietrzu, w którym rosną rośliny będzie skutkowało szybszym przyrostem biomasy. Takie rozwiązanie rzeczywiście stosowane jest masowo w hodowlach szklarniowych.

ŹRÓDŁA DODATKOWYCH MATERIAŁÓW O FOTOSYNTEZIE:

Karta informacyjna gatunku inwazyjnego: Moczarka kanadyjska, GDOŚ 2018 (dostęp 07.2023): http://projekty.gdos.gov.pl/files/artykuly/127054/Elo-dea-canadensis_moczarka-kanadyjska_KG_WWW_icon.pdf

Poradnik: Zrób to sam – systemy uzdatniania wody w CO_2 w akwarium (dostęp 07.2023): <https://www.roslinyakwariowe.pl/artykuly/akwarium-co2/894-bimbrownia-sposob-dozowania-co2-dla-poczatkujacych.html>

Procedura badania fotosyntezy przy użyciu immobilizowanych jednokomórkowych glonów: <https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/235/algal-balls-photosynthesis-using-algae-wrapped-in-jelly-balls/> (dostęp 02.2025)

Artykuł fotosynteza w probówce Marka Plesa: <https://weirdscience.eu/Fotosynteza%20w%20prob%C3%B3wce.html>

Film edukacyjny o fotosyntezie roślin wodnych „Photosynthesis with bubbling pondweed - biology experiment” Science and Plants for Schools https://youtu.be/2_0isgPU4bQ

Film edukacyjny o izolacji i rozdziale chromatograficznym barwników fotosyntetycznych oraz obserwacja produkcji skrobi w liściu: „Magiczne moce roślin, czyli kilka słów o fotosyntezie”, Wydział Biologii Uniwersytetu Warszawskiego <https://youtu.be/SAh9ScrZYPk>

Symulacja pozwalająca na obserwację i badanie rozdziału chromatograficznego barwników fotosyntetycznych z różnych liści <http://amrita.olabs.edu.in/?sub=79&brch=17&sim=124&cnt=4>

Film edukacyjny o fotosyntezie roślin wodnych „#Kopernikwdomu – Fotosynteza w probówce” Centrum Nauki Kopernik <https://youtu.be/32mYmtU4KZU>

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE:

Opracowano na podstawie brytyjskich protokołów Science and Plants for Schools:

- Demonstrating oxygen evolution during photosynthesis using pondweed. (dostęp 07.2023) <https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/190/demonstrating-oxygen-evolution-during-photosynthesis-using-pondweed/>
- Investigating photosynthesis with leaf disc. (dostęp 07.2023) <https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/284/student-sheet-3-investigating-photosynthesis-with-leaf-discs/>
- April N. W., *Student Misconceptions about Plants – A First Step in Building a Teaching Resource*. Journal of Microbiology & Biology Education, Vol. 18, No. 1, 2017. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v18i1.1253>

BADANIE OBECNOŚCI SKROBI W LIŚCIACH

OPRACOWANIE: JOANNA LILPOP

Obserwacja obecności skrobi w tkankach roślin może być uzupełnieniem lekcji badawczych poświęconych fotosyntezie. Ten wielocukier wytworzony w wyniku procesu fotosyntezy pełni rolę podstawowego materiału zapasowego i może być gromadzony w różnych tkankach. Jego synteza zachodzi z cząsteczek glukozy już w liściach. Wybarwienie skrobi za pomocą jodiny (tzw. próba jodynowa) jest prostą czynnością i znaną ze szkolnych badań produktów spożywczych w poszukiwaniu tych, które zawierających skrobię. Metoda identyfikacji skrobi za pomocą specyficznej reakcji barwnej w kontakcie z roztworem jodu w jodku potasu jest bardzo prosta i tania. Rzadziej natomiast stosuje się ją do wybarwiania organów roślinnych w poszukiwaniu miejsc magazynowania tego wielocukru.

PODSTAWA PROGRAMOWA PRZEDMIOTU BIOLOGIA W SZKOLE PONADPODSTAWOWEJ WSKAZUJE:

„Uczeń przedstawia budowę węglowodanów, rozróżnia polisacharydy, w tym skrobię oraz planuje i przeprowadza doświadczenie wykazujące obecność polisacharydów w materiale biologicznym (treści nauczania I.2.1).

Pytania badawcze dotyczące wytwarzania skrobi w liściach mogą dotyczyć różnych aspektów tego procesu, od fizjologii roślin, przez wpływ czynników środowiskowych, aż po adaptacje ewolucyjne. Odpowiedzi na te pytania mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia przez uczniów roli i dynamiki procesu fotosyntezy w życiu roślin oraz sposobów wytwarzania i magazynowania cukrów w organach roślinnych. Klasyczne doświadczenia obserwacji wydzielania tlenu przez fotosyntetyzującą roślinę może pozostawić uczniów w błędnym przekonaniu, że najważniejszym lub jedynym produktem tego procesu jest tlen. Natomiast obserwacja dynamiki powstawania skrobi pod wpływem światła jest doskonałym uzupełnieniem tego fragmentu uczniowskiej wiedzy o procesie fotosyntezy, który stworzy pełniejszy obraz funkcjonowania roślin i obiegu węgla w przyrodzie.

BŁĘDNE PRZEKONANIA NA TEMAT SKROBI I FOTOSYNTETY

1. Skrobia jest transportowana z liści i magazynowana w organach zapasowych, np. bulwach ziemniaka.
2. Skrobia nie występuje w liściach.
3. Skrobia jest cukrem zapasowym występującym również w komórkach zwierzęcych.
4. Skrobia jest wielocukrem, więc jest słodka.
5. Głównym produktem fotosyntezy jest tlen.

MOŻLIWE PROBLEMY BADAWCZE

- Porównanie obecności skrobi w liściach rosnących na słońcu i w ciemności.
- Porównanie zawartości skrobi w liściach różnych gatunków roślin.
- Gdzie zachodzi fotosynteza w liściach odmian roślin mozaikowych (odmiany *variegata*)
- Badanie wpływu różnych warunków środowiska na wytwarzanie skrobi w liściach.
- W których częściach liścia jest magazynowana skrobia?
- Jakie są zmiany w poziomie skrobi w liściach w ciągu doby?
- Jak szybko po zaciemnieniu liści znika z nich skrobia?
- Jak szybko jest produkowana skrobia w liściach na świetle słonecznym?
- Jak zmiany intensywności światła wpływają na syntezę skrobi w liściach?
- Jakie są różnice w ilości i strukturze skrobi między liśćmi jednoliściennych i dwuliściennych?

MOŻLIWE ZMIENNE ZALEŻNE: PARAMETR MIERZONY LUB OBSERWOWANY W DOŚWIADCZENIU

Obserwacja obecności skrobi w liściach jest możliwa po kilkuetapowej procedurze odbarwiania liści z barwników fotosyntetycznych i barwienia ich roztworem jodiny. Zmiana koloru liści na granatowy świadczy o obecności skrobi w tkankach. W wyniku zastosowanej metody wybarwiania skrobi możliwe jest zbieranie danych tylko jakościowych – o obecności zabarwienia i miejscach na liściu, gdzie ono występuje. Otrzymaną barwę można porównać z umowną skalą barwną wysycenia, aby otrzymać względne wartości liczbowe w badaniu. W celu otrzymania pomiaru ilościowego potrzebny jest spektrofotometr lub kolorymetr, dzięki którym można mierzyć wartości absorbancji homogenizowanych próbek wybarwionych liści.

PRZYGOTOWANIE:

- Dobę (nie mniej niż 24 godziny) przed doświadczeniem jedną z badanych roślin należy umieścić w ciemności (np. w szafce), aby zużyła zmagazynowaną w liściach skrobię.
- Opcjonalnie: dobę przed doświadczeniem na jednej roślinie stojącej na świetle można część liści szczelnie owinąć folią aluminiową, aby ograniczyć do nich dostęp światła.
- Jodynę z apteki bezpośrednio przed doświadczeniem można rozcieńczyć w wodzie w proporcji około 1:20.

BEZPIECZEŃSTWO:

Szczególną ostrożność należy zachować przy gorącej łaźni wodnej i odbarwianiu liści w gorącym etanolu – zagrożenie poparzeniem. Czynności należy wykonywać w rękawicach ochronnych.

Etanol jest substancją łatwopalną, unikaj kontaktu z ogniem. Opary etanolu są trujące – nie wdychaj i nie spożywaj Ekstrakcję barwników z liści prowadź w przewiewnym pomieszczeniu lub pod wyciągiem, naczynie z gorącym etanolem przykryj, ale nie zakręcaj. Roztwór jodyny jest silnie brudzący – należy chronić blaty stołów, skórę oraz ubrania.

Procedura. Badanie obecności skrobi w liściach

ODCZYNNIKI I MATERIAŁY:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Świeże liście badanych roślin,• Słoik z gorącą wodą• 100 ml etanolu 70% - 96%• Jodyna | <ul style="list-style-type: none">• Gorąca łaźnia wodna• Zlewka lub słoik• Szalka lub talerz• Pęseta• Pipetka• Folia aluminiowa |
|--|--|

PRZEBIEG PROCEDURY BARWIENIA SKROBI:

1. Oderwij liście od łodygi i zanurz je na kilkanaście sekund we wrzącej wodzie.
2. Za pomocą pęsety umieść liście w słoiku z etanolem stojącym w gorącej łaźni wodnej. Przykryj słoik pokrywką, ale nie zakręcaj.
3. Inkubuj liście w gorącym etanolu, od czasu do czasu mieszając przez 5 -10 minut, do momentu, aż etanol stanie się intensywnie zielony, a liście bladezielone.

4. Przemyj liście wodą i przełóż na szalki lub talerz.
5. Na każdy liść nałóż za pomocą pipety kilka kropli roztworu jodyny.
6. Po minucie obejrzyj liście w mocnym świetle. Obserwuj, w których miejscach liście zyskały granatowe zabarwienie.
7. Zrób dokumentację zdjęciową lub rysunek wyników w zeszycie laboratoryjnym. Zanotuj wszystkie obserwacje i spostrzeżenia.

Wytłumaczenie obserwowanego zjawiska

Znaczenie kolejnych kroków procedury:

Zanurzenie liścia w gorącej wodzie służy rozpuszczeniu i spłukaniu woskowej, pokrywającej liść kutykuli, a także pozbyciu się gazów z wnętrza liścia i zmiękczeniu tkanek dla łatwiejszej penetracji etanolu i jodyny.

Inkubacja liścia w gorącym etanolu ma na celu ekstrakcję barwników fotosyntetycznych – chlorofili i karotenoidów, aby nie zaciemniały obrazu z wybarwioną skrobią. Barwniki te są substancjami łatwiej rozpuszczalnymi w rozpuszczalnikach mniej polarnych, takich jak alkohol, niż w wodzie.

Wybarwienie jodyną jest właściwym badaniem – amyloza wchodząca w skład ziaren skrobi obecnych w komórkach liścia tworzy barwne, granatowe kompleksy z jodem.

Skrobia jest materiałem zapasowym, który kojarzy się głównie z dużymi ziarnami gromadzonymi w tkankach spichrzowych roślin. Jednak jest wytwarzana także w miękiszu fotosyntetyzującym, gromadzona w przekształconych plastydach zwanych amyloplastami. Służy komórkom liścia jako materiał zapasowy rozkładany do glukozy w okresach braku dostępu do światła. Dlatego w doświadczeniu można obserwować dużą dynamikę rozkładu oraz powstawania ziaren skrobi na przestrzeni kilku – kilkunastu godzin. Obserwacja granatowego zabarwienia w liściach jest świadectwem funkcjonalności chloroplastów i zachodzenia fotosyntezy.

Dobre praktyki:

Jakich gatunków roślin użyć: do badania nadaje się każda dostępna roślina doniczkowa o liściach niepokrytych woskiem bądź grubą kutykulą. Dobrze sprawdzi się bazylia czy pelargonja.

Przechowanie rośliny w ciemności: zabieg ten prowadzi się w celu zużycia skrobi zmagazynowanej w liściach i porównania efektu wybarwienia skrobi z próbą kontrolną bez skrobi. Zwykle wystarcza przechowanie roślin przez 24 godziny przed doświadczeniem w zamkniętej szafce lub pudełku, w temperaturze pokojowej, normalnie podlanych i bez dostępu do światła.

Rozcieńczenie jodyny: Jodynę z apteki (alkoholowy roztwór jodu w jodku potasu) bezpośrednio przed doświadczeniem można rozcieńczyć w wodzie w proporcji około 1:20. Dzięki temu mniej brudzi, a w kontakcie ze skrobią wybarwia się bardziej kontrastowo. Roztworu wodnego jodyny nie należy przechowywać, ponieważ jod rozkłada się dość szybko w tych warunkach i w dostępie do światła.

Wybarwienie liści jodyną: wybarwienie na granatowo jest możliwe po uprzednim odbarwieniu liści zielonych barwników. Jodynę na liściu warto potrzymać kilka minut, a następnie spłukać czystą wodą. Jeśli wystawiony na słońce (bogaty w skrobię) liść nie barwi się – należy sprawdzić odczynnik (czy jodyna jest świeża i zabarwia czystą skrobię), powtórzyć próbę na innym liściu, a czasem wystarczy obejrzeć wybarwiony liść w mocnym świetle lub pod światło, żeby zobaczyć efekt granatowego zabarwienia.

Badanie produkcji skrobi na krążkach liści: zamiast całych liści, do procedury można użyć krążków wyciętych z liści za pomocą słomki do napojów. Krążki należy umieścić w zlewce z wodą, aby zachowały turgor i świeżość. Aby krążki z liści przechowywanych w ciemności (pozbawione skrobi) wytworzyły skrobię, należy je położyć na powierzchni wody grzbietem liści do dołu (zapewni to dostęp powietrza do aparatów szparkowych umiejscowionych po spodniej stronie liścia) i pozostawić na silnym świetle przez około 4 godziny lub dobę. Po tym czasie należy przeprowadzić standardowe kroki służące wykryciu skrobi: odbarwić w gorącym etanolu i zabarwić jodyną. Zastosowanie metody na krążkach wyciętych z liści w stosunku do całych liści: można użyć kilku krążków w każdej próbie, co zapewnia powtarzalność oraz zachęca do powtórzeń eksperymentu,

Badanie produkcji skrobi w liściu rośliny mozaikowej (odmiany *variegata*): Wiele ozdobnych roślin doniczkowych ma odmiany, na których liściach znajdują się obszary różnokolorowe. To zjawisko jest określane jako „wariegacja”. Liście takich roślin nie są jednolicie zielone, lecz mają plamy, paski, obrzeża, a czasem także większe obszary białe, żółte lub kremowe. Obszary te pozbawione są barwników fotosyntetycznych, a zatem wykazują zmniejszoną efektywność fotosyntezy. Można to uwidocznić, wybarwiając liść jodyną wg proponowanej procedury i zaobserwować, w których obszarach liścia skrobia jest magazynowana, a w których nie. Przed odbarwieniem liści w etanolu pamiętaj, aby zrobić dokumentację zdjęciową wzoru na liściu. Będzie to potrzebne do porównania miejsc i wzorów wybarwionych jodyną.

SPRÓBUJ TAKŻE:

Sprawdź, jak szybko będzie się wytwarzała skrobia w liściu pozbawionym skrobi (roślina zużyje zapasy skrobi trzymana w ciemności jeden – dwa dni). Sprawdź, czy mechanizm powstawania skrobi jest uruchamiany tylko w oświetlonych miejscach liścia.

dni w ciemności, aby zużyła skrobię z liści. Następnie nałóż na liść folię z wiadomością i oświetlaj liść mocnym światłem przez około 4 godziny. Po tym czasie wykonaj procedurę zabarwiania skrobi zgodnie z przepisem. Czy na liście widać wiadomość?

SPRÓBUJ TAKŻE:

Etanolowy wyciąg barwników fotosyntetycznych z liści może posłużyć do rozdzielania chromatograficznego barwników. Aby rozdział barwników był wyraźny, ekstrakt powinien mieć barwę ciemnozieloną. By ją osiągnąć użyj niewielkiej objętości etanolu i dużej liczby liści w tym samym roztworze. Możesz także zagęścić ekstrakt przez odparowanie nadmiaru etanolu. Ekstrakt może być przechowany w szczelnym pojemniku kilka dni w lodówce lub zamrażalniku.

PYTANIA O ROZUMIENIE PROCEDURY BADAWCZEJ

1. Wymień kluczowe warunki, o które należy zadbać w badaniu, aby zaobserwować skrobię w liściach?
Odpowiedź powinna uwzględniać przynajmniej kilka ważnych składowych całej procedury, m.in.: pozbawienie liści barwników fotosyntetycznych, użycie barwnika specyficznie wybarwiającego skrobię.
2. Wyjaśnij, dlaczego pierwszym etapem procedury jest pozbawienie liści barwników fotosyntetycznych?
Przykładowa odpowiedź: Obecność zielonych barwników utrudniałaby obserwacje zabarwienia skrobi na granatowo.
3. Wyjaśnij, o czym świadczy granatowe zabarwienie liścia pod wpływem jodiny?
4. Jakie znaczenie w badaniu miało pozostawienie jednej z badanych roślin w ciemności przez kilka dni?
Przykładowa odpowiedź: Jest to istotne, aby pokazać różnicę między liściem, w którym jest skrobia i liściem, w którym nie ma skrobi. Stanowi to próbę kontrolną.
5. Jak można inaczej przeprowadzić doświadczenie, aby wyniki były bardziej wyraźne? Co można ulepszyć w procedurze?

PYTANIA O ROZUMIENIE WYNIKÓW OBSERWACJI

6. Czy wyniki są jednoznaczne? Czy wszystkie powtórzenia badania dają podobne wyniki?
7. Czy wyniki wszystkich grup w klasie potwierdzają Twoje wnioski?
8. Czy wykonana procedura i test były prawidłowe, nie popełniono błędu i zebrano odpowiednie obserwacje, wystarczające do sformułowania wniosku?

9. W jaki sposób można rozpoznać, czy granatowy obraz na liściu jest wynikiem fotosyntezy?
10. Oceń, na ile powtarzalna i wiarygodna jest Twoja obserwacja w stosunku do innych roślin na Ziemi?
11. Wyjaśnij, dlaczego na liściach uprawianych w ciemności możliwe jest zostawienie tajnej wiadomości poprzez naświetlenie go przez foliowy negatyw slajdu z wiadomością.

ZADANIA DO POSZUKIWANIA INFORMACJI:

1. W jaki sposób skrobia gromadzi się w bulwach ziemniaka, jeśli jest pod ziemią i nie prowadzi fotosyntezy?
2. Czy liść jest w stanie prowadzić syntezę skrobi w ciemności?
Odpowiedzi możesz znaleźć w opisanym tutaj doświadczeniu: <https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/285/student-sheet-20-can-plants-make-starch-in-the-dark/>

Źródła dodatkowych materiałów:

Film „Magiczne moce roślin, czyli kilka słów o fotosyntezie” Wydziału Biologii UW, przedstawiający w końcowej części materiału eksperyment „3. Fotografia fotosyntetyczna” obrazujący procedurę wybarwiania skrobi w liściach: <https://www.youtube.com/watch?v=SAh9ScrZYPk>

Protokół opracowany przez SAPS: Photosynthesis: testing a variegated leaf for starch <https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/1222/photosynthesis-testing-a-variegated-leaf-for-starch/>

OBSERWACJA BARWNIKÓW ROŚLINNYCH

OPRACOWANIE PROCEDURY: JAN GOLDSTEIN

OPRACOWANIE MATERIAŁÓW TEKSTOWYCH: JOANNA LILPOP

Obserwacja rozdzielania barwników zawartych w liściach roślin za pomocą chromatografii jest doskonałym uzupełnieniem lekcji o fotosyntezie i funkcjonowaniu roślin. Chromatografia barwników roślinnych nie należy do obowiązkowego zestawu doświadczeń wskazanych przez podstawę programową biologii, jest za to wymieniona jako jedno z obowiązkowych doświadczeń w podstawie programowej na chemii w szkole ponadpodstawowej zarówno w zakresie podstawowym jak i rozszerzonym. Prowadzenie tej obserwacji stanowi więc przykład

Podstawa programowa przedmiotu biologia w szkole ponadpodstawowej wskazuje:

„Uczeń przedstawia rolę barwników i fotosyntemów w procesie fotosyntezy” (treści nauczania III.4.2).

Podstawa programowa przedmiotu chemia w szkole ponadpodstawowej:

„Wskazuje się następujący minimalny zestaw doświadczeń do wykonania samodzielnie przez uczniów lub w formie pokazu nauczycielskiego: (...) rozdzielanie mieszaniny niejednorodnej i jednorodnej na składniki (np. ekstrakcja i rozdzielanie chromatograficzne barwników roślinnych)”

nauczania między-przedmiotowego, gdzie treści dwóch przedmiotów uzupełniają się. Dla biologii z zakresu rozszerzonego obserwacja ta będzie pogłębieniem punktu Chemiczne podstawy obserwowanego procesu umożliwią jego zrozumienie i wyciąganie wniosków dotyczących fizjologii roślin.

Ze względu na wysoką jakość rozdziału, proces ten najlepiej wykonać na płytkach ze złożem krzemionkowym, tak zwanych płytkach TLC (ang. *Thin-Layer Chromatography*), jednak płytki te są trudno dostępne dla szkół i dość drogie. Dlatego proponujemy wybór kredy szkolnej, stanowiącej doskonałą alternatywę do profesjonalnych materiałów, jako

fazy stacjonarnej w chromatografii. Inną alternatywą używaną w szkołach są różne rodzaje bibuły oraz filtry do kawy, jednak celulozowe złoża chromatograficzne mają słabą rozdzielczość – fazy różnych barwników przechodzą jedna w drugą bez wyraźnego rozgraniczenia, trudno zaobserwować więcej niż 2-3 różne barwniki. Wyniki chromatografii na bibule potrafią być efektowne, ale wartość naukową mają niewielką – wyniki różnych chromatografii są ze sobą

mało porównywalne. Proponowana procedura również stawia przed młodymi badaczami pewne wyzwania, a osiągnięcie wyników podobnych do tych z płytek TLC wymaga pewnej wprawy oraz wyboru odpowiedniej kredy. W naszych badaniach przeprowadziliśmy doświadczenia na pięciu rodzajach kredy szkolnej, przy czym trzy z nich dały oczekiwane efekty (zdjęcia nr 1, 2 i 5).



Zdjęcia przedstawiające przetestowane rodzaje kredy szkolnej oraz wyniki rozdziału barwników z liści pietruszki na poszczególnych kredach. Testy wykazały, że kreda nr 3 oraz 4 nie nadaje się do prowadzenia tego doświadczenia.

BŁĘDNE PRZEKONANIA NA TEMAT BARWNIKÓW FOTOSYNTETYCZNYCH W ROŚLINACH

1. Rośliny zielone posiadają jeden rodzaj barwnika – chlorofil.
2. W czasie jesieni w kolorowych liściach pojawiają się nowe, inne barwniki zamiast chlorofilu.
3. Rośliny o czerwonych liściach nie posiadają chlorofilu.
4. Rośliny prowadzą fotosyntezę w zielonym świetle (pochłaniają zielone spektrum światła), ponieważ posiadają zielony barwnik.

MOŻLIWE PROBLEMY BADAWCZE

- Badanie składu barwników u różnych gatunków roślin.
- Jaki jest skład barwników u roślin o liściach w kolorze czerwonym?
- Jak zmienia się skład barwników w liściach jesienią?
- Wpływ hodowli rośliny w ciemności na skład barwników fotosyntetycznych.
- Porównanie składu barwników młodych, jasnozielonych i starych ciemnozielonych listków u danego gatunku. Poszukiwanie, które barwniki odpowiadają za różnicę koloru.

- Porównanie składu barwników u kilku blisko spokrewnionych gatunków: selera, marchwi, pietruszki etc.
- Obserwacja beta-karotenu marchwi z różnych jej organów: liści, korzenia, soku z marchwi. Porównanie ze wzorcem z kupnego preparatu beta-karotenu.
- Identyfikacja luteiny z różnych źródeł.
- Podpowiedź: Żółtko jajka zawdzięcza swój żółty kolor luteinie, należącej do ksantofili. Czy luteina z żółtka mogłaby stanowić wzorzec odniesienia ułatwiający identyfikację tego samego barwnika w mieszaninie barwników fotosyntetycznych z liści? Czy ta sama luteina jest odpowiedzialna za żółte zabawienie oleju roślinnego? Czy luteinę z preparatu aptecznego także da się zobaczyć na chromatogramie?
- Badania związane z optymalizacją i działaniem procedury rozdzału: Wpływ składu eluentu na jakość rozdzału barwników fotosyntetycznych.
- Podpowiedzi: W procedurze proponujemy skład eluentu benzyna-aceton w proporcji 10:1. Jak zmiana tych proporcji wpłynie na jakość rozdzału? Co zmieni się, jeśli eluentem będzie etanol czy inne niepolarne lub polarne związki?
- Badania związane z optymalizacją i działaniem procedury rozdzału: Porównanie przebiegu rozdzału ekstraktu barwników z tej samej rośliny na dwóch różnych złożach: bibule oraz kredzie. Jakie są zalety i wady stosowania obu technik?
- Z jakich barw składają się kolory flamastrów? Obserwacja rozdzału chromatograficznego kolorowych tuszy prowadzony w etanolu.

MOŻLIWE ZMIENNE ZALEŻNE: PARAMETR MIERZONY LUB OBSERWOWANY W DOŚWIADCZENIU

Wynikiem prowadzonej obserwacji jest charakterystyczny układ różnokolorowych prążków na złożu. Ich kolejność oraz względna droga, którą przebył każdy z barwników od linii startu, stanowią wynik charakterystyczny dla danego układu badawczego (zestawu barwników obecnych w badanej roślinie, składu chemicznego eluentu i rozdzielacza). Miarą liczbową, którą warto określić wyniki, jest wyliczenie współczynnika R_f dla każdego z widocznych barwników. Współczynnik R_f to droga, jaką przebył pasek barwnika od miejsca nałożenia próbki w stosunku do całej drogi, którą przebył eluent.

Procedura. Obserwacja barwników roślinnych

ODCZYNNIKI I MATERIAŁY:

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Kreda szkolna,• 10 ml acetonu w szczelnym pojemniku• 10 ml mieszaniny benzyna-aceton w proporcji 10:1 w szczelnym pojemniku• 10 g liści pietruszki | <ul style="list-style-type: none">• Nożyczki• Moździerz z tłuczkiem• Słoik 100-250 ml• Opcjonalnie: filtr do kawy• Pipetka pasteurowska• Szczelnie zamykany pojemnik chromatograficzny – najlepiej probówka typu Falcone 50 ml• Ołówek, linika• Aparat fotograficzny• Opcjonalnie: Lampka UV |
|---|--|

PRZYGOTOWANIE:

- Za pomocą linijki i ołówka zaznacz na kredzie poziom 1 cm od płaskiej podstawy kredy. Za pomocą nożyka delikatnie natnij kredę na tej linii, na szerokość słupka kredy, równoległe do podstawy. Nacięcie ma być płytkie na głębokość ok 1 mm. Na nacięcie będzie nakładana mieszanina barwników.
- Przygotuj eluent: mieszaninę benzyna-aceton w proporcji 10:1. W zależności od wielkości pojemnika służącego za komorę chromatograficzną, na jedną kredę potrzeba będzie 3-5 ml mieszaniny. Warto przygotować mieszaninę w objętości, która starczy na kilka doświadczeń. Do przygotowania 110 ml mieszaniny odmierz 100 ml benzyny ekstrakcyjnej i 10 ml acetonu. Zmieszaj i zamknij w szczelnym naczyniu (np. szklany słoik), które włóż do zamrażalnika. Mieszaninę przygotuj pod wyciągiem lub w przewiewnym pomieszczeniu. Staraj się nie wdychać oparów.
- Wszystkie materiały służące do izolacji barwników przed rozpoczęciem pracy należy zmrozić w zamrażalniku: moździerz, aceton, słoik, filtr, kredę, eluent, komorę chromatograficzną. Dzięki temu barwniki nie rozkładają się, a aceton mniej paruje.

PRZEBIEG PROCEDURY:

IZOLACJA BARWNIKÓW

1. Oderwij listki od łodyg. Odważ około 10 gramów liści.
2. Nożyczkami pokrój listki na drobne fragmenty i umieść w zmrożonym moździerzu.
3. Utrzymaj listki na papkę w zmrożonym moździerzu.

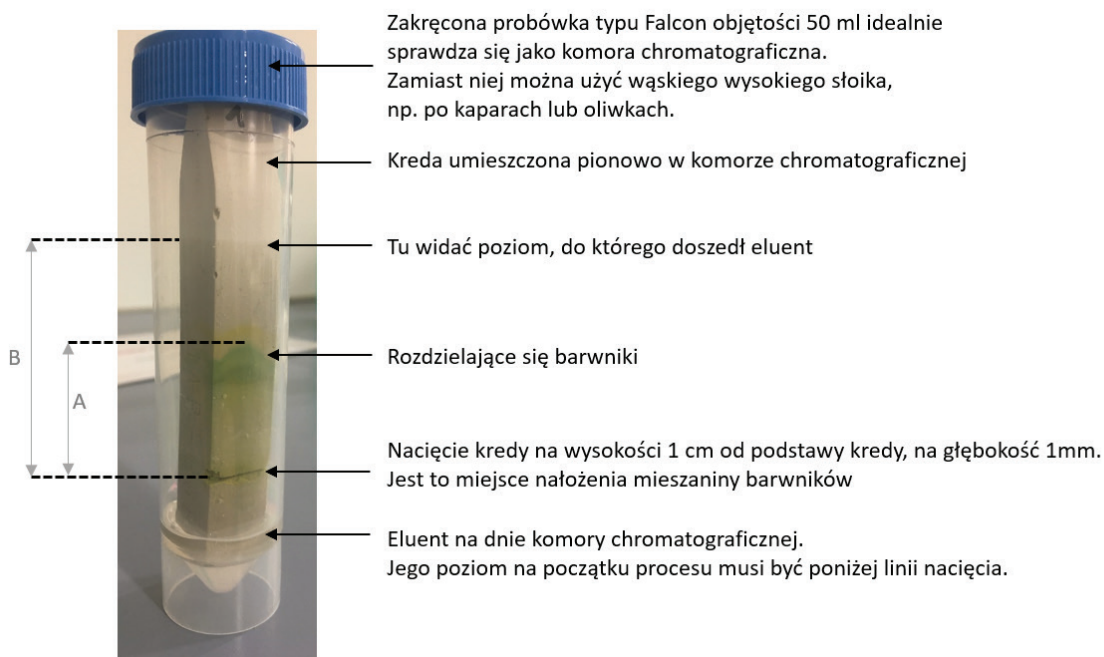
4. Dodaj 10ml zmrożonego acetonu i ucieraj jeszcze przez minutę, aż płyn w papce przyjmie głęboki ciemno-zielony kolor, zażółcony na brzegach.
5. Przełóż zawartość moździerza na filtr do kawy osadzony na zmrożonym słoiku.
6. Odczekaj minutę, aż na dnie słoika pojawi się ciemnozielony przesącz.
7. Przesącz, czyli mieszaninę barwników rozpuszczoną w acetonie, możesz przechować w szczelnie zamkniętym słoiku w zamrażalniku przez kilka dni.

ROZDZIAŁ CHROMATOGRAFICZNY BARWNIKÓW

1. Za pomocą pipety nałóż ok. 3ml mieszaniny barwników na nacięcie kredy, równo na całym nacięciu. Mieszanina nie powinna się rozlewać, tylko utworzyć równy ciemno-zielony pasek. Słoik z mieszaniną zakręć, żeby opary acetonu nie wydostawały się na zewnątrz.
2. Do komory chromatograficznej nalej eluent do poziomu około 5-7mm. Pamiętaj, że wysokość eluentu nie może przekroczyć 1cm – wysokości nałożonych barwników na kredę.
3. Do komory chromatograficznej wstaw pionowo kredę z nałożonymi barwnikami. Zakręć komorę.
4. Obserwuj, jak eluent jest wchłaniany przez kredę. Jeśli cały zostanie wchłonięty, co zdarza się w wąskich pojemnikach, dolewaj go ostrożnie po ściance, żeby utrzymać poziom ok 0,5cm ponad dnem.
5. Zatrzymaj chromatografię, kiedy eluent dotrze do ok 0,5cm poniżej szczytu kredy. Zajmuje to około 1 – 5 minut. Wyciągnij kredę z pojemnika.

OBSERWACJA WYNIKU ROZDZIAŁU BARWNIKÓW

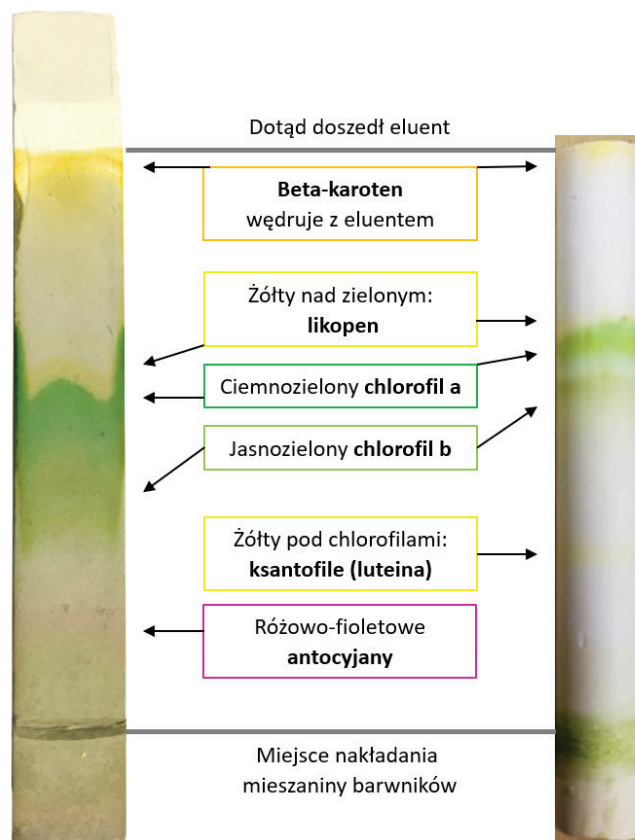
1. Oglądaj kredę od razu, w jasnym świetle. Zrób dokumentację zdjęciową.
2. Układ prążków porównaj ze wzorcem na rysunku. Spróbuj zidentyfikować, który prążek to który barwnik.
3. Za pomocą linijki zmierz odległość, jaką przebył każdy z barwników od linii nałożenia barwników oraz odległość, jaką przeszło czoło eluentu od linii startu.
4. Oblicz wartości współczynnika R_f dla każdego z barwników, wg wzoru $R_f = A/B$. Dzięki temu będzie można porównać wyniki z różnych doświadczeń. Zanotuj wyniki w dzienniku laboratoryjnym.
5. W ciemności przy użyciu lampy UV możesz też zobaczyć czerwoną fluorescencję chlorofili.



Na zdjęciu odległość oznaczona jako A to odległość, jaką przeszedł zielony barwnik od miejsca nałożenia, odległość oznaczona jako B to odległość, jaką przebyło czoło eluentu od miejsca nałożenia próbki.

Wytłumaczenie obserwowanego zjawiska

Barwniki fotosyntetyczne, zarówno chlorofile jak i karotenoidy, są związkami lipidowymi, niepolarnymi, a więc źle rozpuszczają się w wodzie, natomiast bardzo dobrze w rozpuszczalnikach takich, jak aceton, benzyna, chloroform czy etanol. Dlatego do ekstrakcji barwników z liści w doświadczeniu używamy acetonu. Wyizolowane barwniki fotosyntetyczne można rozdzielić metodą chromatografii cienkowarstwowej adsorpcyjnej (TLC – ang. *Thin Layer Chromatography*). W proponowanej procedurze zamiast profesjonalnej płytki pokrytej tlenkiem krzemu, jako fazy stacjonarnej używamy kredy o podobnych właściwościach - może ona wiązać (adsorbować) różne cząsteczki. Im związek jest bardziej polarny, tym lepiej będzie przywiązany do złoża z kredy. Mało polarne związki słabo wiążą się z kredą i „wędrują” wraz z niepolarnym rozpuszczalnikiem (eluentem), który używany jest do rozdziału chromatograficznego. Jako eluent stosowana jest silnie niepolarna mieszanina benzyna–aceton w proporcji 10:1. Dlatego barwniki fotosyntetyczne, które są najbardziej niepolarne, będą przemieszczać się wraz z eluentem, a te bardziej polarne będą lepiej „trzymać się” kredy i będą wolniej przesuwane się w górę od miejsca, w którym zostały nałożone. Przesuwanie się eluentu do góry złoża następuje za pomocą sił kapilarnych. Eluent przemieszcza się w górę fazy stacjonarnej dzięki siłom kapilarnym, które są wynikiem interakcji między molekułami eluentu a porowatą strukturą kredy.



Zdjęcia wyników rozdzielu chromatograficznego barwników z liści pietruszki na dwóch rodzajach kredy szkolnej.

Współczynnik R_f , czyli współczynnik przesunięcia, określa właściwą dla każdej substancji zdolność przesuwania się w danym układzie złoże-eluent. Oblicza się go, dzieląc odległość przebyta przez substancję rozdzielaną przez odległość przebyta przez czoło eluentu.

R_f = odległość przebyta przez substancję od miejsca nakładania próbki / odległość przebyta przez czoło eluentu od miejsca nakładania próbki.

Współczynnik R_f przybiera wartości między 0 a 1. Substancja o $R_f=0$ nie poruszyła się na złożu, pozostała w miejscu nałożenia próbki, jest substancją o wysokim powinowactwie do złoża. Substancja o $R_f=1$ wędruje równo z czołem eluentu. W stosowanym w procedurze układzie złoże-eluent barwniki o wartości R_f bliskiej 1 są substancjami najbardziej niepolarnymi.

Zastosowanie: dla danej substancji, w danym układzie rozwijającym, na danej fazie rozdzielczej, w określonych warunkach jest to wartość stała, zatem może służyć do charakteryzowania analizowanej w chromatografii substancji.

Dobre praktyki:

Wybór kredy: W naszych testach przeprowadziliśmy doświadczenia na pięciu rodzajach kredy szkolnej, przy czym trzy z nich dały oczekiwane efekty.

- Należy unikać kredy o szarym odcieniu, ponieważ rozdzielone na niej barwniki są bardzo słabo widoczne. Im bielsza kreda tym lepiej.
- Należy unikać kredy niepylącej, ponieważ często jest zmieszana z substancjami ulepszającymi, które zapobiegają wsiąkaniu w nie roztworów. Wtedy nie sposób nałożyć mieszaninę barwników na kredę.

Lepsze wyniki mieliśmy na kredach, które dobrze wchłaniały płyn, co jest pierwszą wskazówką przy doborze materiału. Kształt kredy – okrągłe lub kwadratowe w przekroju poprzecznym – nie miał wielkiego znaczenia. Próbkę łatwiej się nakłada na kredę sześcienną, ale ze względu na jej większą objętość, podczas chromatografii chłonie dużo więcej eluentu niż kreda okrągła. Zwykle wymaga więc dolania eluentu w trakcie wędrówki barwników. Przed pracą z uczniami rekomendujemy wcześniejsze przetestowanie własnych kred. Chromatografie danego roztworu warto powtórzyć, bo zdarza się, że dany pasek barwnika nie pojawi się z powodu błędu technicznego.

Wybór badanych roślin: Dobre efekty są widoczne przy użyciu ciemnozielonych listków natki pietruszki lub innych selerowatych, które zawierają również dużą ilość karotenoidów. Im większa ilość liści, tym lepiej, bo wtedy stężenie barwników jest większe, choć ograniczeniem jest wielkość moździerza i ilość wody, którą dostarczają listki. Należy unikać roślin o mięsistych liściach (np. kapusta), gdyż zawierają one dużo wody w tkankach, która niekorzystnie wpływa na jakość rozdziału. Listki należy oderwać od łodyg, bo największe stężenie barwników znajduje się właśnie w tej części rośliny, a od możliwie dużego stężenia barwników zależy sukces tej metody.

Mrożenie używanych materiałów: Podczas pracy należy użyć zmrożonych materiałów, żeby do minimum ograniczyć degradację barwników. Efektem degradacji i zabrudzeń próbki będzie rozmycie się chlorofili i przykrycie zielonym kożuchem barwników, które „wędrują” wolniej (np. luteiny) i zniekształcenie prążków pozostałych barwników. Efektem degradacji chlorofili będzie pojawienie się dodatkowych szaro-oliwkowych prążków feofityny (produkt rozpadu chlorofilu, pozbawionego jonów magnezu) w obszarze między czołem eluentu a zielonymi chlorofilami. Praca na schłodzonych odczynnikach powoduje, że mniej parują, a zatem jest bezpieczniejsza.

Izolacja barwników z liści: Należy rozetrzeć listki w moździerzu, żeby zwiększyć powierzchnię działania acetonu na komórki roślin. Aceton jest dobrym rozpuszczalnikiem dla niepolarnych barwników fotosyntetycznych. Należy dodać go także w celu denaturacji białek i uwolnienia barwników do roz-

tworu. Od tej pory barwniki robią się niestabilne i łatwo degenerują w wyniku temperatury i światła.

Nacięcie na kredzie do nakładania: Poziome stożkowate nacięcie na kredzie powoduje, że największe stężenie roztworu jest zgromadzone na kredzie w linii poziomej, bo osiadająca kropla roztworu powinna przyjąć kształt nacięcia. Dzięki temu barwniki podążające z eluentem w górę kredy również tworzą poziome kreski. Rozlanie się roztworu barwników po kredzie podczas nakładania może powodować nierówny kształt paska na wyniku chromatografii. To zjawisko niestety zdarza się także na kredach z nacięciami, co można zaobserwować na prezentowanych zdjęciach.

Ilość nałożonych barwników: Tu zasada jest prosta – im ciemniejszy pasek nałożonych barwników tym lepiej. Granicą jest objętość płynu, jaką może wchłonąć kreda. Zadbaj o to, aby mieszanina barwników była nałożona precyzyjnie, a nie rozlała się po dużej powierzchni kredy.

Suszenie próbki: Wiele procedur chromatografii cienkowarstwowej wymaga suszenia próbek podczas nakładania. W przypadku opisanej procedury nie jest to konieczne ze względu na sporą pojemność kredy jako złoża. Rozpuszczalnikiem dla barwników jest aceton, obecny także w układzie eluentu, więc suszenie próbki w celu pozbycia się resztek rozpuszczalnika nie ma takiego znaczenia. W procesie suszenia pozbywamy się także wody (obecnej w mieszaninie z tkanek roślinnych), która przeszkadza w rozdziale chromatograficznym, ale jednocześnie suszenie wydłuża proces i powoduje większą degradację barwników. Pozostaje więc do obserwacji w praktyce, czy w danych warunkach prowadzenia eksperymentu suszenie przynosi lepszy efekt.

Oglądanie wyników: Barwniki blakną z czasem, więc należy wykonać dobrą dokumentację wyników doświadczenia. Zdjęcie, obliczenia współczynnika R_f , poglądowy rysunek w dzienniku laboratoryjnym należy wykonać bezpośrednio po zakończeniu chromatografii. Omówienie wyników i wnioskowanie można przeprowadzić na podstawie zgromadzonej dokumentacji w późniejszym czasie (na innej lekcji).

Jakich błędów unikać, prowadząc to doświadczenie

Rozkład barwników: Wydłużanie procedury izolacji barwników, ich sączenia i nakładania na złożo, prowadzenie jej w wysokiej temperaturze, czy na słońcu – będą powodowały stopniowy rozkład barwników. W związku z tym wynik będzie mniej wyraźnie widoczny.

Poziom eluentu: wlanie zbyt dużej ilości eluentu do komory chromatograficznej spowoduje niewyraźny rozdział barwników. Miejsce nałożenia barwników na kredzie nie może znajdować się równo z poziomem eluentu ani poniżej jego poziomu.

Poruszanie komorą chromatograficzną podczas rozdziału: Po wstawieniu kredy do komory chromatograficznej należy ją zamknąć i nie ruszać do momentu wyjęcia kredy. Każde poruszenie poziomem eluentu będzie wpływać negatywnie na jakość rozdziału.

Zatrzymanie rozdziału w odpowiednim momencie: Zbyt późne przerywanie chromatografii powoduje, że eluent dochodzi do samego czubka kredy, związku z czym najwyższe pomarańczowe paski karotenu skupiają się na szczycie kredy i są trudne do zaobserwowania.

Bezpieczeństwo:

- Aceton oraz benzyna ekstrakcyjna są łatwopalne. Są truciznami - w przypadku spożycia należy niezwłocznie skontaktować się z lekarzem. Rozpuszczalniki należy przechowywać w szczelnie zamkniętych naczyniach, osłonięte od światła i źródeł ciepła. Przy wszystkich czynnościach należy zachować szczególną ostrożność. W przypadku kontaktu ze skórą zmyć ciepłą wodą z mydłem.
- W sali, w której używamy odczynników chemicznych, powinny znajdować się karty charakterystyk tych substancji. Karty dostępne w Internecie np. na stronach producentów i dystrybutorów odczynników:
http://chempur.pl/pliki/karty_charakterystyk/aceton.pdf
https://chempur.pl/pliki/karty_charakterystyk/benzyna_ekstrakcyjna.pdf
- Opary acetonu oraz benzyny mogą być w dużych stężeniach toksyczne. W związku z tym pojemnik chromatograficzny powinien być szczelny, żeby opary nie wydostawały się na zewnątrz. Użycie zmrożonych substancji przed chromatografią i szybkie przeprowadzenie procedury zmniejsza ryzyko zatrucia się oparami do minimum. Mimo wszystko eksperyment należy przeprowadzać pod wyciągiem lub w przewiewnej sali, w miarę możliwości przy otwartych oknach. Wrażliwe osoby mogą mieć na ustach i nosie maseczkę.
- Podczas przeprowadzania procedury należy mieć na sobie fartuchy laboratoryjne i rękawiczki ochronne, żeby ochronić odzież. Chociaż barwniki fotosyntetyczne da się wywabić z odzieży choćby za pomocą acetonu, ale niektóre ubrania mogą tego nie tolerować. Dotyczy to szczególnie sztucznych i słabo barwionych tkanin.

Zadania pogłębiające rozumienie

PYTANIA O ROZUMIENIE PROCEDURY BADAWCZEJ

1. O jakie kluczowe warunki w badaniu należy zadbać, aby zaobserwować rozdzielone barwniki roślinne?
Odpowiedź powinna uwzględniać przynajmniej kilka ważnych składowych całej procedury, m.in.: ochłodzenie próbki, stężenie izolatu barwników, skład eluentu, czas rozdzielania.
2. Dlaczego barwniki z liści należy izolować niepolarnym rozpuszczalnikiem, takim jak aceton, a nie wodą?
Przykładowa odpowiedź: Potrzeba zastosować niepolarny rozpuszczalnik ze względu na niepolarną naturę barwników takich jak chlorofil i karotenoidy, zgodnie z chemiczną zasadą „podobne rozpuszcza podobne”.
3. Jakie znaczenie w procedurze miało schłodzenie próbek i naczyń oraz szybka praca?
Przykładowa odpowiedź: Jest to istotne ze względu na rozkład wyizolowanych barwników w cieple.
4. Dlaczego pojemnik do chromatografii nie może być w całości wypełniony roztworem - eluentem, w którym zanurzałoby się kredę?
Przykładowa odpowiedź: ponieważ selektywny rozdział barwników opiera się na siłach kapilarnych, które mogą działać tylko na granicy fazy stałej i płynnej układu.
5. Jak mógłby wyglądać wynik rozdzielania barwników, gdyby złożo (kreda) miało większe powinowactwo do barwników niż eluent?
Przykładowa odpowiedź: prawdopodobnie barwniki nie rozdzieliłyby się, tylko pozostały blisko miejsca nałożenia próbki, ponieważ nie „wędrowałyby” wraz z fazą ruchomą do góry.
6. Jak mógłby wyglądać wynik rozdzielania barwników, gdyby roztwór eluentu był bardziej lub mniej polarny od tego zastosowanego w Twoim badaniu?
Przykładowa odpowiedź: inne właściwości eluentu będą wpływać na tempo migracji poszczególnych barwników w kredzie, powodując mniej wyraźny rozdział poszczególnych frakcji, np. wspólne przemieszczanie i zachodzenie na siebie kilku barwników.

PYTANIA O ROZUMIENIE WYNIKÓW OBSERWACJI

6. Czy wyniki są jednoznaczne? Czy wszystkie powtórzenia badania dają podobne wyniki?
7. Czym jest wartość R_f obliczana w wynikach?
8. Dlaczego dzięki wartości R_f można porównywać ze sobą wyniki na różnych próbkach?
9. Dlaczego różne barwniki fotosyntetyczne mają różną wartość R_f ?
10. Czy wyniki wszystkich grup w klasie potwierdzają Twoje wnioski?
11. Jak można by inaczej przeprowadzić doświadczenie, aby wyniki były bardziej wyraźne? Co można ulepszyć w procedurze?
12. Czy wykonana procedura i test były prawidłowe, nie popełniono błędu i ze-

- brano odpowiednie obserwacje, wystarczające do sformułowania wniosku?
13. W jaki sposób można rozpoznać, który widoczny po rozdziale barwnik jak się nazywa?
 14. Oceń, na ile powtarzalna i wiarygodna jest Twoja obserwacja, w stosunku do innych roślin na Ziemi?

ZADANIA DO POSZUKIWANIA INFORMACJI:

1. Jakie znaczenie dla fizjologii różnych gatunków roślin ma inny skład i proporcje zawartości poszczególnych barwników fotosyntetycznych?
2. Po oświetleniu światłem UW rozdzielonych barwników paski z chlorofilem świecą na czerwono. Dlaczego tak się dzieje?
3. Poznaj widma absorpcji różnych barwników roślinnych (wykresy dostępne w większości podręczników). Które barwniki pochłaniają najwięcej światła z czerwonego końca widma? Jakiego są koloru i dlaczego?

Źródła dodatkowych materiałów:

Film „Magiczne moce roślin, czyli kilka słów o fotosyntezie” Wydziału Biologii UW, przedstawiający izolację i rozdział barwników fotosyntetycznych na kredzie.
<https://www.youtube.com/watch?v=SAh9ScrZYPk>

Ekstrakcja barwników lipidowych z glonów i roślin, Chromatografia lipidowych barwników fotosyntetycznych oraz Interpretacja chromatografii barwników fotosyntetycznych – trzy filmy z laboratorium przygotowane przez zespół Komitetu Głównego Olimpiady Biologicznej
https://www.youtube.com/playlist?list=PLmwyRvAX2F_YIjEqLxvQjTG-Z9xRKNqpeA

Science and Plants for Schools – chromatografia na płytkach TLC
<https://www.saps.org.uk/teaching-resources/resources/181/student-sheet-10-thin-layer-chromatography-for-photosynthetic-pigments/>

Fluorescencja chlorofilu:
<https://www.weirdscience.eu/Fluorescencja%20chlorofilu.html>

PODZIĘKOWANIA

Dziękujemy absolwentkom, mentorkom, tutorkom i tutorom Szkoły Edukacji za zapał w prowadzeniu doświadczeń i testowaniu procedur podczas zajęć z dydaktyki biologii oraz we własnych klasach, dociekliwość i entuzjazm we wspieraniu projektu.

Doktorowi Marcinowi Chrzanowskiemu za wieloletnie rozmowy i inspiracje o uczeniu metody naukowej, szalone pomysły oraz odwagę zadawania pytań i testowania.

Doktor Monice Klejman za talent porządkowania i twórczy wkład w układ treści i szatę graficzną.

Publikacja „Lekcja doświadczalna” jest dostępna na licencji Creative Commons

Uznanie autorstwa 3.0 Polska. Publikacja powstała w ramach Programu Szkoła Edukacji Polsko-Amerykańskiej Fundacji Wolności i Uniwersytetu Warszawskiego realizowanego przez Fundację Dobrej Edukacji.

Autorka: Joanna Lilpop

Autor procedury chromatografii: Jan Goldstein

Ilustracje na str. 36, 42: dr Monika Klejman

Korekta: dr Monika Klejman, Magdalena Swat-Pawlicka

© Copyright by Fundacja Dobrej Edukacji, Warszawa 2025

Opracowanie graficzne i skład:  RZECZYOBRAZKOWE

ISBN 978-83-968025-3-8

Prezentowane procedury były wielokrotnie przetestowane przez Joannę Lilpop, Jana Goldsteina oraz zespół absolwentek, absolwentów, tutorek i tutorów Szkoły Edukacji PAFW i UW w ramach projektu Fundacji Dobrej Edukacji: *„Od teorii do praktyki i z powrotem: kształtowanie rozumowania naukowego na lekcjach biologii i przyrody”* finansowanego przez Polsko-Amerykańską Fundację Wolności.

Szkoła Edukacji Polsko-Amerykańskiej Fundacji Wolności i Uniwersytetu Warszawskiego to jedyne w Polsce bezpłatne dzienne studia podyplomowe dla przyszłych i już aktywnych nauczycieli. Przygotowuje dydaktyków czterech specjalności: język polski, matematyka, historia i WOS oraz biologia z przyrodą. Szczegóły dotyczące studiów i programu stypendialnego można znaleźć na stronie www.szkolaedukacji.pl.

PRZEWODNIKI SZKOŁY EDUKACJI



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

POLSKO-AMERYKAŃSKA
FUNDACJA WOLNOŚCI



POLISH-AMERICAN
FREEDOM FOUNDATION



SZKOŁA
EDUKACJI

POLSKO-AMERYKAŃSKIEJ FUNDACJI
WOLNOŚCI I UNIWERSYTETU
WARSZAWSKIEGO