

## KARTA EKSPONATU nr 2 T3

### Nazwa ekspozycji (robocza):

## Fotosynteza

### Przekaz merytoryczny/cel edukacyjny ekspozycji:

Rozumiem, na czym polega proces fotosyntezy, do czego jest potrzebny i jakie ma znaczenie. Ekspozycja pod względem edukacyjnym, koresponduje z nauczaniem o fotosyntezie na poziomie szkoły średniej i wychodzi poza najprostszą definicję podawaną dzieciom w szkole podstawowej.

### Opis ekspozycji:

#### 1. O czym jest/czemu służy ekspozycja:

Ekspozycja tłumaczy przebieg procesu fotosyntezy, jego złożoność, znaczenie w przyrodzie oraz wpływ m.in. na człowieka. Proces fotosyntezy został pokazany w możliwie dokładny sposób, z uwzględnieniem:

- sposobu w jaki energia światła słonecznego (fotonów) jest przekształcana w energię chemiczną,
- roli wody,
- zmian jakie zachodzą we wnętrzu tylakoidu (lumenie),
- zmian jakie zachodzą poza tylakoidem (w stromie chloroplastu).

Ekspozycja tłumaczy również następujące pojęcia:

- Chlorofil – fotoaktywny organiczny zielony barwnik, obecny w roślinach, zdolny do absorpcji fotonów.
- Chloroplast – ciało zieleni, część komórki roślinnej, w której zachodzi proces fotosyntezy
- Tylakoid – błoniaste pęcherzyki wypełnione chlorofilem, znajdujące się w chloroplastach
- Lumen – przestrzeń wewnątrz tylakoidu
- Stroma – przestrzeń wewnątrz chloroplastu
- Fotoukład – kompleks barwnikowo-lipidowo-białkowych związków chemicznych, absorbujący kwanty światła (fotony). Składa się z centrum reakcji oraz towarzyszących mu układów antenowych absorbujących kwanty światła i przekazujących ich energię do centrum reakcji. W centrum reakcji fotoukładu dochodzi do wybicia elektronu.
- Faza jasna fotosyntezy – proces, w którym energia kwantów światła (fotonów) zmieniana jest w energię zgromadzoną pod postacią związków chemicznych ATP i NADPH<sub>2</sub>. Zachodzi w błonie tylakoidów.
- Faza ciemna fotosyntezy- proces, w którym energia zgromadzona w ATP i NADPH<sub>2</sub> jest uwalniana i wykorzystywana w Cyklu Calvina do syntezy cukrów z dwutlenku węgla.

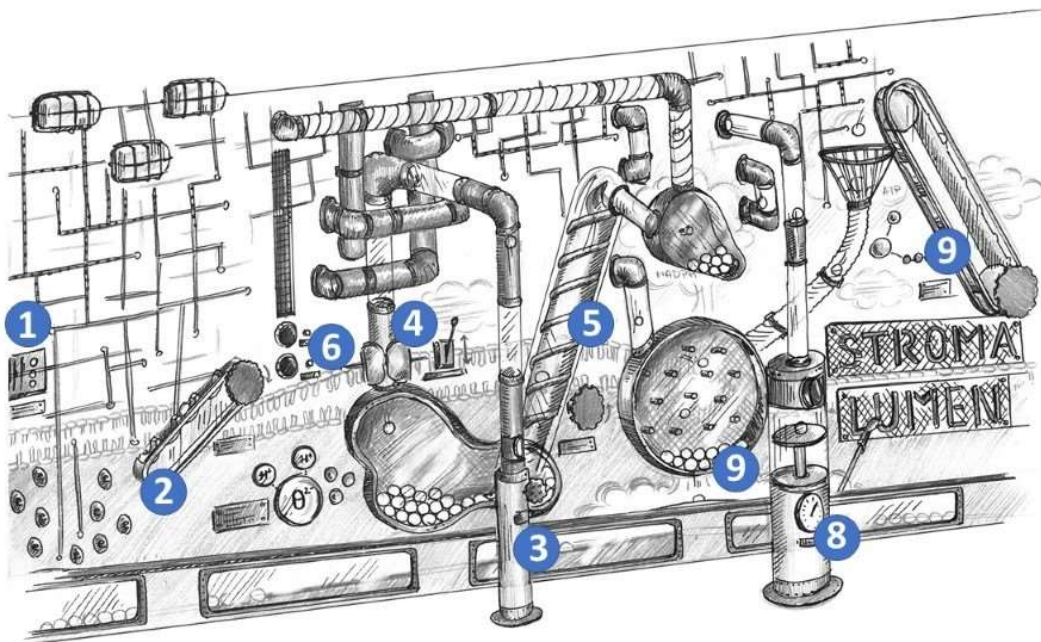
Szczegółowy spis kolejnych, powiązanych ze sobą procesów, które zachodzą w czasie fotosyntezy i które uwzględnia ekspozycja:

- foton wybija elektron z cząsteczki chlorofilu, znajdującej się w fotoukładzie PS II (w przedstawionym fragmencie tylakoidu),
- cząsteczka wody, pochodząca z otoczenia, jest dostarczana do chlorofilu,
- elektron wybity z chlorofilu, jest uzupełniany elektronem z dostarczonej cząsteczki wody, przy tym z tej samej cząsteczki wody uwalnia się tlen (który jest wypuszczany na zewnątrz chloroplastu) oraz jon wodorowy (inaczej proton H<sup>+</sup>), który zwiększa stężenie protonów po tej stronie błony tylakoidu (czyli w jego lumenie),
- wybity z PS II elektron wędruje przez system przekaźników, znajdujących się na błonie tylakoidu,
- jeden z tych przekaźników (kompleks cytochromowy b6f) przy okazji przekazywania elektronu, przepuszcza przez błonę protony w kierunku: z zewnątrz tylakoidu (ze stromy) do wewnątrz tylakoidu (do lumenu), co dodatkowo zwiększa stężenie protonów we wnętrzu tylakoidu

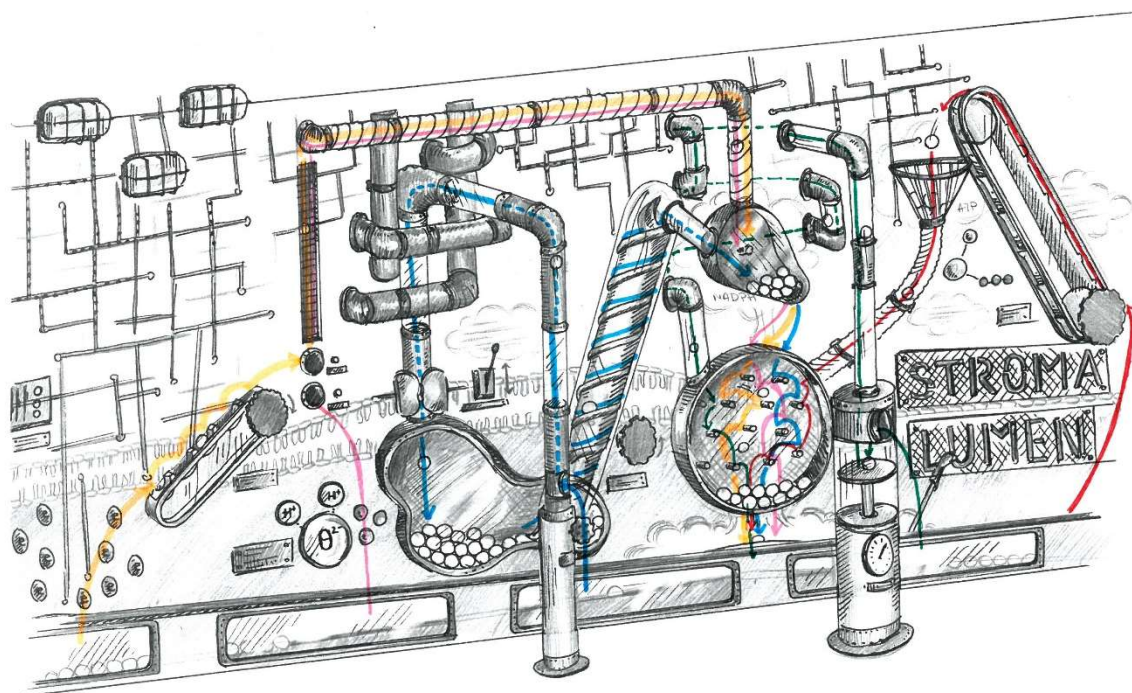
- na końcowym odbiorniku elektronu (fotoukład PS I) wybity uprzednio elektron jest przekazywany do NADP czekającego w stromie, na skutek czego powstaje NADPH<sub>2</sub> (do jego powstania wykorzystywany jest również proton, co zmniejsza stężenie protonów od strony stromy i potęguje różnice stężeń protonów po obu stronach błony)
- nadmiar protonów wewnątrz tylakoidu jest wypompowywany przez syntazę-ATP, przy okazji czego powstaje związek wysokoenergetyczny ATP
- ATP i NADPH<sub>2</sub> są transportowane do stromy, gdzie są wykorzystywane w cyklu Calvina do produkcji cukru (glukozy) z dwutlenku węgla

## 2. Rysunek:

Rysunek poglądowy, nie nieuwzględniający końcowego kształtu obudowy, a jedynie ukazujący rozlokowanie kluczowych elementów eksponatu



Rys. 1 – oznaczenia poszczególnych modułów eksponatu



Rys. 2 – tory ruchu piłek (kolorystyka na rysunku nie odpowiada zastosowanej w finalnej wersji eksponatu)

### 3. Opis elementów eksponatu:

Eksponat jest interaktywną instalacją – machinarium (maszyną Goldberga). Jego zasadnicza część zainstalowana jest na ścianie, a jej tło stanowi grafika zawierająca treści merytoryczne, uzupełniające interakcję. Niektóre przestrzenne elementy instalacji są umieszczone w jej bezpośrednim sąsiedztwie na podłodze.

Eksponat składa się z:

- zestawu kulek
- elementów scenograficznych
- elementów graficznych
- 9 modułów odpowiadających (w przybliżeniu) poszczególnym etapom procesu fotosyntezy

#### 3.1 Zestaw kulek:

- Kulki są elementami mobilnymi, mającymi kluczowe znaczenie w trakcie interakcji.
- Za ich pomocą obrazowany jest przebieg procesu fotosyntezy – przepływ cząstek elementarnych, związków i substancji chemicznych.
- Kulki podzielone są na 6 grup, z których każda jest oznaczona innym kolorem i symbolizuje:
  - kolor żółty: elektrony
  - kolor błękitny: protony (wodoru)
  - kolor biały: dwutlenek węgla
  - kolor popielaty: związki ADP
  - kolor grafitowy: fosforany nieorganiczne  $P_i$
  - kolor granatowy: związki NADP

- Zwiedzający pobierają kulki z zasobnika znajdującego się na podłodze, przed instalacją i umieszczają w odpowiednich miejscach instalacji.
- System uniemożliwia wrzucenie kulek innego koloru niż jest wymagany w danym miejscu

### 3.2 Elementy graficzne:

- Głównym elementem graficznym ekspozycji, jest wielopowierzchniowa grafika dostarczona przez Wykonawcę przedstawiająca wnętrze chloroplastu.
  - Grafika ta stanowi tło dla całej instalacji i znajduje się bezpośrednio za nią, zajmując całą powierzchnię ścian o wymiarach 4750-5000mm szerokości, 2850-3000mm wysokości.
  - Na grafice dobrze widoczne są: stroma, lumen oraz rozdzielająca je błona tylakoidu.
  - Poszczególne elementy interaktywne instalacji są zintegrowane z grafiką, tj. są zamontowane w miejscach, w których w rzeczywistości w komórce zachodzą przedstawione przy ich pomocy procesy.
- Wymagane elementy graficzne, opatrzone informacją merytoryczną:
  - uzupełnianie wytrąconego w fotoukładzie PS II elektronu przez elektron pozyskany z dostarczonego z wody atomu wodoru (przekładnia wielostopniowa, punkt 2),
  - skład chemiczny cząsteczki wody (labirynt hydrauliczny, punkt 3),
  - cytochrom b6f przepuszcza do lumenu tylko proton wodoru (zawór suwakowy, punkt 4),
  - powstawanie związku NADPH z NADP i protonu wodoru z wykorzystaniem wytrąconego elektronu, opatrzone graficznym schematem reakcji (pojemnik równoważny, punkt 6),
  - powstawanie związku ATP z ADP i fosforanu nieorganicznego, opatrzone graficznym schematem reakcji (lej przy taśmociągu, punkt 7),
  - oddawanie niewykorzystanych w cyklu Calvina związków ADP i NADP do przestrzeni stromy (tarcza obrotowa, punkt 9),
  - produkcja glukozy z dostarczonych do cyklu Calvina składowych: NADPH, ATP i CO<sub>2</sub>, opatrzone graficznym schematem reakcji (tarcza obrotowa, punkt 9).

### 3.3 Elementy scenograficzne:

- Oprawa scenograficzna ekspozycji jest utrzymana w stylistyce industrialnej, nawiązującej do wnętrza fabryki, rafinerii, cukrowni itp.
- Dodatkowym atutem wizualnym są materiały i elementy wykończeniowe takie jak nity, widoczne spawy, siatka stalowa, blacha perforowana, szkło laminowane, nakrętki sześciokątne, головки wkrętów i gwoździ.
- W dobrze widocznych i wyeksponowanych miejscach znajdują się: szyld z napisem FOTOSYNTeza, a także oznaczenia STROMA i LUMEN zamocowane we właściwych miejscach na planszy znajdującej się w tle instalacji.
- Preferowanym jest, aby podpisy poszczególnych stanowisk (nazwy białek, związków chemicznych i procesów) zostały wybite w blasze nierdzewnej.
- W sąsiedztwie mechanizmów odpowiadających za transport danego związku, powinny znaleźć się zlicowane ze ścianą wypukłe półkule oznaczone odpowiednią nazwą (e<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, ADP, P<sub>i</sub>, NADP) i adekwatnym kolorem. Elementy te mają za zadanie przedstawić kumulowanie się związków w przestrzeniach stromy i lumenu oraz naprowadzać Zwiedzającego, w których mechanizmach wykorzystywane są poszczególne związki.

### 3.4 Moduł I – dostarczanie światła:

- Na całej powierzchni tła instalacji znajdują się źródła światła. Są one umieszczone w wąskich, podłużnych zagłębieniach. Ich układ tworzy siatkę, która stopniowo zagęszcza się u dołu.
- Wgłębienia w których znajdują się elementy oświetleniowe od zewnątrz są zabezpieczone przed dostępem Zwiedzających za pomocą osłon wykonanych z bezbarwnego materiału.
- W miejscu, w którym fotony docierają do lumenu, siatka elementów oświetleniowych jest najszersza - sięga dolnej granicy stanowiska, gdzie przymocowane są półkule symbolizujące elektrony.
- Półkule stanowią zlicowane ze ścianą elementy scenograficzne, o wymiarach i kolorze odpowiadających elektronom w formie mobilnych kulek.
- Każdy z elementów symbolizujących elektron jest oznaczony symbolem „e<sup>-</sup>”.



- Do uruchamiania elementów oświetleniowych służą łączniki, nawiązujące formą do urządzeń tego typu stosowanych w zastosowaniach przemysłowych (łączniki hebelkowe, krzywkowe, obrotowe, odłączniki itp.).
- Każdy łącznik odpowiada za włączanie osobnej grupy elementów oświetleniowych.
- Elementy oświetleniowe pogrupowane są w taki sposób, że przełączanie kolejnych łączników stwarza efekt stopniowego rozświetlania się kolejnych fragmentów siatki (od góry do dołu).
- Rozświetlanie się kolejnych elementów oświetleniowych zrealizowane jest stopniowo. Jasność elementów stopniowo narasta lub zmniejsza się.
- Po 30 sekundach od włączenia, oświetlenie w schemacie siatki gaśnie.
- Łączniki do obsługi elementów oświetleniowych stanowią, niezależnie od pozycji w jakiej się znajdują służą jedynie do włączania oświetlenia. Wygaszanie elementów świetlnych następuje automatycznie i bez udziału Zwiedzających.

### 3.5 Moduł II – wytrącenie elektronu, przemieszczanie elektronów po przekątnych na błonie tylakoidu:

- Głównym elementem modułu jest przekładnia wielostopniowa w formie fali, wprowadzana w ruch pokrętle, znajdującym się w osi napędu.
- Po umieszczeniu mobilnej kulki stymulującej elektron na pierwszym stopniu przekładni, wprowadzając mechanizm w ruch, kulka przemieszcza się po kolejnych skokach.
- Z ostatniego poziomu elektrony spadają do pojemnika, skąd rozpoczną dalszą podróż.
- Przekładnia usytuowana jest wzdłuż zaznaczonej graficznie błony tylakoidu, a skokowe przemieszczanie kulki symbolizuje drogę elektronów po przekątnych na powierzchni błony.

### 3.6 Moduł III – dostarczanie wody:

- Naprzeciw ściany interaktywnej znajduje się stanowisko przeznaczone do dostarczania wody do chloroplastu.
- W odległości nie mniejszej niż 900 mm od ściany znajduje się statyw wyposażony w pokrętło uruchamiające ciąg powietrza (centralne sprężone powietrze)
- Pokrętło nawiązuje stylistyką do zaworów hydraulicznych starego typu - kształt kwiatka.
- W statywie widnieje otwór przeznaczony do umieszczenia w nim kulki.
- Przedłużeniem statywu jest transparentna rura z metalowymi okuciami i kolankami, prowadząca do ściany interaktywnej.
- Rura funkcyjna, odpowiadająca za transport cząsteczki wody, przymocowana jest do płaszczyzny stanowiska pomiędzy instalacją rur scenograficznych.
- Całość tworzy złudzenie hydraulicznego labiryntu.
- Rura funkcyjna ma swój początek w oddalonym od eksponatu statywie wyposażonym w zawór, natomiast kończy się w pojemniku na kulki pod zaworem suwakowym (punkt 4).

### 3.7 Moduł IV – cytochrom B<sub>6</sub>F:

- Głównym elementem modułu jest zawór suwakowy obudowany formą przypominającą białko cytochromu b<sub>6</sub>f, stanowiący zakończenie rury transportującej wodę.
- Mechanizm umiejscowiony jest na wysokości zaznaczonej graficznie błony tylakoidu.
- Poprzez pociągnięcie dźwigni zawór otwiera się, przepuszczając kulki z rury do pojemnika umieszczonego pod jej ujściem.
- Zarówno zawór jak i dźwignia powracają samoczynnie do położenia początkowego po zakończeniu zadania.
- Szczelina w zakresie ruchu dźwigni nie powinna być większa niż 12 mm, ze względu na ryzyko zakleszczenia palca.
- Należy wykluczyć możliwość zgniatania kulek przez zawór suwakowy. W przypadku dużej awaryjności proponowanego rozwiązania, dopuszczalne jest zastosowanie śluzy innego typu po konsultacji z Zamawiającym.
- Pojemnik zbiorczy, do którego trafiają kulki jest zabezpieczony przed dostępem Zwiedzających za pomocą tafli wykonanej z przezroczystego materiału. Umożliwia ona swobodną obserwację wnętrza pojemnika.
- Zarówno ujście rury jak i obudowa śruby Archimedes'a (punkt 5) są zlicowane z obudową pojemnika.
- Kształt pojemnika zapewnia opadanie kulek w miejsce pobierania ich przez kolejny mechanizm.

### 3.8 Moduł V – pompa protonowa:

- Głównym elementem modułu jest śruba Archimedesza, symbolizująca działanie pompy protonowej.
- Śruba jest wprawiana w ruch ręcznie przez Zwiedzającego za pomocą pokrętła i służy do transportu w górę kulek znajdujących się w pojemniku pod modułem IV. Transport kulek ku górze symbolizuje wyrównanie gradientu protonowego pomiędzy lumenem a stromą.
- W zależności od umiejscowienia śruby Archimedesza, pokrętło może znajdować się bezpośrednio na niej lub na ścianie obok (przełożenie ruchu) - ważnym jest, aby wysokość umiejscowienia pokrętła była wygodna dla Zwiedzających, a jednocześnie, aby śruba Archimedesza przechodziła przez graficzną granicę pomiędzy lumenem a stromą.
- Mechanizm należy opatrzyć obudową z transparentnego materiału, która zlicowana zostanie z obudową komory na kulki.
- Śruba ma swój początek w pojemniku zbiorczym pod modułem IV, natomiast zakończona na jej końcu znajduje się rura odprowadzająca kulki do wychyłowego zasobnika (punkt 6).

### 3.9 Moduł VI – tworzenie związku NADPH<sub>2</sub>:

- Centralnym elementem modułu jest wychyłowy zasobnik na kulki. Symuluje on reakcję, w wyniku której na skutek połączenia związków NADP z protonami wodoru przy wykorzystaniu energii elektronu, powstaje dinukleotyd nikotynoamidoadeninowego (NADPH<sub>2</sub>).
- Zasobnik wychyłowy:
  - Ma asymetryczny kształt zbliżony do krzywki.
  - Jest przymocowany do ściany za pomocą pojedynczej osi umieszczonej w taki sposób, że zasobnik samoczynnie utrzymuje się w stanie równowagi, natomiast a po wypełnieniu odpowiednią ilością kulek samoczynnie przechyla
  - Maksymalny wychył zasobnika jest ograniczony ogranicznikiem.
  - Gdy zasobnik znajduje się w stanie równowagi znajdujące się w jego wnętrzu kulki nie mają możliwości wypadnięcia.
  - W ścianie bocznej zasobnika znajdują się 3 otwory:
    - dwa dostarczające kulki: w miejscu przylegania przewodu z wodorem oraz w miejscu przylegania przewodu z e<sup>-</sup> i NADP
    - jeden przez który kulki wysypują się do kolejnego modułu: w węższej części krzywki.
  - Gdy poziom kulek wewnątrz zasobnika osiągnie określony poziom, wychyla się on a kulki z jego wnętrza przesypują się do kolejnego modułu (punkt 9 na rys. 1) przez otwór w węższej części krzywki.
  - Po opróżnieniu pojemnik samoczynnie powraca do stanu równowagi.
- Do zasobnika trafiają kulki symbolizujące:
  - cząsteczki wodoru, dostarczane z modułu V (punkt 4 na rys. 1).
  - Elektrony i związek NADP, dostarczone rurą z wykorzystaniem podciśnienia.
    - Rura ta zaczyna się w bezpośrednim sąsiedztwie przekładni wielostopniowej (moduł II, na rys. 1 punkt 2)
    - Na jej początku znajdują się dwa otwory umieszczone w przestrzeni która na grafice symbolizuje stromą. Oba otwory posiadają wzmocnione okuciami krawędzie. Są także wyposażone w czytelne opisy: ELEKTRON i ZWIĄZEK NADP.
    - Przy oznaczeniach tekstowych znajdują się źródła światła, zapalające się przemiennie co np. 3 sekundy (dokładny czas zostanie ustalony na etapie prototypownia). Symbolizują one, którą kulkę i w jakim czasie powinno się umieścić w otworze.
    - Każda z wrzuconych kulek trafia do tego samego, zamaskowanego przewodu.
    - W ścianie eksponatu nad otworami wrzutowymi znajduje się przysłonięty stalową siatką pionowy szyb.
    - Zwiedzający obserwują przez niego ruch umieszczonych w przewodzie kulek.
    - Otwory w siatce nie mogą być większe niż 8 mm, ze względu na ryzyko zakleszczenia palca.

- Dalsza część trasy jaką pokonują kulki zrealizowana jest jako wykonana z przezroczystego materiału rura wychodząca ze ściany na zewnątrz eksponatu.
- Preferowane jest wykorzystanie zbrojonego przewodu odciągowego, wzmocnionego metalowymi okuciami.
- Trasa kulek ma zakończenie na granicy pojemnika równoważnego.
- Zakończenia wszystkich przewodów: doprowadzającego kulki symbolizujące wodór, odpowiadający za transport NADP i elektronu, są sztywne a ich kształt dopasowany do krzywizny zasobnika w taki sposób by nie blokował się on w momencie wychylania. Dodatkowo zakończenia przewodów wyposażone są w szczotki zabezpieczające i uszczelniające połączenie.

### 3.10 Moduł VII – Fosforylacja fotosyntetyczna:

- Głównym elementem modułu jest taśmociąg służący do transportowania kulek z oznaczeniami ADP i  $P_i$  do cyklu Calvina (punkt 9).
- Taśmociąg jest napędzany ręcznie przez Zwiedzającego za pomocą pokrętła,
- Cały mechanizm umiejscowiony jest nad oznaczoną graficznie błoną tylakoidu.
- W przypadku ustawienia przekładni pod kątem, należy wyposażyć taśmę w ograniczniki.
- Boczna obudowa taśmy powinna być wykonana z transparentnego materiału oraz wzmocniona metalowymi okuciami.
- Bezpośrednio pod górnym końcem taśmociągu znajduje się lej, do którego spadają przetransportowane kulki symbolizujące ADP i fosforan nieorganiczny P. Do leja kulki wpadają z poprzedniego mechanizmu w tym module tj. z taśmociągu. A na taśmociąg użytkownik kładzie kulki pobrane z pojemnika zbiorczego
- Lej ukształtowany i umiejscowiony jest w sposób, który powoduje, że wpadającego do niego kulki poruszają się ruchem spiralnym po jego ściankach co symbolizuje tworzenie się związku ATP (adenozynotrifosforan).
- Z leja wyprowadzona jest transparentna rura, transportująca kulki do tarczy obrotowej (punkt 9).

### 3.11 Moduł VIII – Doprowadzanie dwutlenku węgla:

- Naprzeciw ściany interaktywnej znajduje się stanowisko przeznaczone do dostarczania dwutlenku węgla do chloroplastu.
- W odległości nie mniejszej niż 900 mm od ściany znajduje się statyw z siłownikiem napędzanym wajchą.
- W górnej części komory, w której umieszczone są tłok i tłoczysko, znajduje się otwór wykończony metalowym okuciem.
- Do ściany bocznej statywu przymocowana jest wajcha, której ruch odpowiada przełożeniu siły na tłoczysko.
- Wajcha zakończona jest ergonomicznym uchwytem.
- Przedłużeniem statywu jest transparentna rura z metalowymi okuciami i kolankami, prowadząca do ściany interaktywnej.
- Przewód prowadzi ze statywu do tarczy obrotowej symbolizującej cykl Calvina (punkt 9).
- Rura częściowo jest ukryta w ekspozycji - a jej fragmenty wystają ze ściany interaktywnej i są widoczne dla Zwiedzających.
- W rurze następuję transport piłeczki w strudzę powietrza
- Do szczytu tłoczyska przymocowana jest platforma.
- Wrzucając kulkę przez otwór, opada ona na platformę. Następnie pociągając wajchą, siłownik unosi platformę, wypychając kulkę w ciąg powietrza.

### 3.12 Moduł IX – Cykl Calvina, produkcja glukozy ( $C_6H_{12}O_6$ ):

- Centralnym elementem modułu jest okrągły pojemnik
- Obudowa pojemnika jest nieruchoma, podczas gdy tarcza wyposażona w prostopadłe do płaszczyzny ściany wypustki posiada możliwość obrotu.
- Do pojemnika prowadzą:
  - przewód leja doprowadzający kulki ADP i  $P_i$ , tworzące razem związek ATP (punkt 7),
  - rura doprowadzająca kulki  $CO_2$  (punkt 8).

- Dodatkowo w obudowie znajdują się dwa otwory:
  - W górnej części otwór, przez który po przeważeniu pojemnika równoważnego (punkt 6) wpadają kulki wodoru, elektrony i NADP, symbolizujące razem powstały związek NADPH<sub>2</sub>,
  - W dolnej części otwór, przez który wszystkie zebrane kulki wypadają na rampę.
- Przednia ściana obudowy jest wykonana z transparentnego materiału - preferowane szkło laminowane.
- Za obudową znajduje się tarcza wyposażona w wystające kołki (ustawione prostopadle do płaszczyzny ściany).
- Wpadające kulki odbijają się od wypustek sprawiając wrażenie ruchu chaotycznego.
- W dolnej części obudowy pojemnika znajduje się zapadnia, po otwarciu której wszystkie kulki wypadają z tarczy, co symbolizuje tworzenie i uwalnianie związku C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (glukozy) z dostarczonych składowych (NADPH, ATP, CO<sub>2</sub>).
- Należy zaproponować intuicyjny, możliwie nieawaryjny system zwalniania blokady zapadni.
- Kulki wpadają do pojemnika zlicowanego ze ścianą eksponatu, umieszczonego na posadzce wzdłuż całego stanowiska.
- Podstawa pojemnika ułożona jest pod kątem względem płaszczyzny posadzki (rampa), zapewniając swobodne toczenie kulek do początkowej stacji eksponatu.

#### 4. Przebieg interakcji:

- Z eksponatu może korzystać jednocześnie dziewięć użytkowników.
- Do interakcji można dołączyć w dowolnym momencie.
- Pojemnik zbiorczy jest pojemnikiem początkowym i końcowym zarazem, tj. użytkownik wyciąga z niego kulki, żeby umieścić je w odpowiednich miejscach w eksponacie, a jednocześnie po końcowej interakcji (cykl Calvina) kulki z powrotem do niego wpadają. Rozwiązanie ma na celu ograniczenie konieczności sprzątania po zabawie i odkładania kulek na konkretne miejsce
- Brak płynności podejmowanych działań, a także niezachowanie ich właściwej kolejności nie umniejsza przebiegowi interakcji.
- Niestosowanie się do właściwej kolejności lub pominięcie któregoś etapu spowoduje zastój w przewodach prowadzących kulki lub Zwiedzający nie otrzyma wszystkich składników niezbędnych do przeprowadzenia procesu fotosyntezy.
- Ewentualne zastoje mają walor edukacyjny, gdyż pokazują jak skomplikowanym procesem jest fotosynteza i ile zależności zachodzi w jej trakcie.

##### 4.1 Moduł I:

- Zwiedzający podchodzi do tablicy rozdzielczej.
- Za pomocą manipulatorów powoduje rozświetlenie siatki elementów oświetleniowych – symbolizujących dostarczanie fotonów do wnętrza chloroplastu.

##### 4.2 Moduł II:

- Zwiedzający podnosi z pojemnika kulkę oznaczoną jako elektron.
- Kulka zostaje umieszczona w wyznaczonym miejscu, na dole przekładni wielostopniowej.
- Zwiedzający kręci pokrętkę wprawiającą w ruch przekładnię – jeden obrót pokrętki powoduje podniesienie kulki o jeden poziom.
- Należy wykonywać pracę do momentu aż kulka przekroczy widoczną na grafice w tle przekładni granicę lumenu i wpadnie do pojemnika w stromie.

##### 4.3 Moduł III:

- Zwiedzający za pomocą pokrętki otwiera kanał, w którym w wyznaczonym miejscu umieszcza kulkę symbolizującą wodę.
- Ciąg powietrza zasysa kulkę i przeprowadza przez instalację z rur i doprowadza do miejsca, w którego tle na grafice znajduje się granica stromy i lumenu



- W tle instalacji z rur znajduje się grafika przedstawiająca budowę cząsteczki wody oraz jej rozpad na części składowe.
- Infografika sugeruje, że na kolejnym etapie do wnętrza lumenu transportowany jest jedynie proton pochodzący z cząsteczki wodoru

#### 4.4 Moduł IV:

- Zwiedzający pociągając za wajchę rozszerza zawór suwakowy symbolizujący białko cytochromu b6f.
- Kulki podążając zgodnie z kolejnością przedstawioną na rysunku poglądowym, czyli po otworzeniu śluzu kulki wpadają do pojemnika w lumenie, oczekując na uruchomienie pompy protonowej, w celu wyrównania poziomu gradientu protonowego.

#### 4.5 Moduł V:

- Zwiedzający kręcąc pokrętle wprowadza w ruch śrubę Archimedesesa.
- Infografika w tle śruby tłumaczy działanie i cel pracy pompy protonowej.
- Stale napędzany przez Zwiedzającego wirnik pobiera kulki z opisanego wyżej pojemnika i transportuje je do pojemnika działającego na zasadzie równoważni. Dopiero po napełnieniu odpowiednią ilością kulek przechyla się on i kieruje kulki dalej.

#### 4.6 Moduł VI:

- Zwiedzający ma za zadanie umieścić w wyznaczonym czasie w odpowiednich otworach kulki symbolizujące NADP i elektrony.
- Kolejność umieszczania kulek w buforach jest dyktowana przez sygnalizację świetlną.
- Kulki symbolizujące elektrony są dostępne w pojemniku zrzutowym z zadania 2, natomiast kulki oznaczające związek NADP należy pobrać z pojemnika głównego.
- Po włożeniu kulek do otworów, Zwiedzający obserwuje ich trasę do pojemnika równoważnego, w którym znajdują się już kulki z oznaczeniem protonów wodoru.
- Infografika w sąsiedztwie pojemnika równoważnego przedstawia powstawanie związku NADPH z połączenia NADP i protonu wodoru, przy wykorzystaniu energii elektronu.
- Następnie Zwiedzający obserwuje przeciążenie pojemnika równoważnego i przesypanie wszystkich zgromadzonych kulek do tarczy obrotowej, symbolizującej cykl Calvina.

#### 4.7 Moduł VII:

- Zwiedzający z pojemnika głównego pobiera kulki z oznaczeniami ADP i P<sub>i</sub>, a następnie umieszcza je na taśmie przekładni.
- Taśmociąg napędzany obracany przez Zwiedzającego pokrętle transportuje piłki w stronę leja.
- Piłki spadają z taśmy do leja zakończonego transparentną rurą i grawitacyjnie przemieszczają się do tarczy obrotowej, symbolizującej cykl Calvina.
- Grafika w sąsiedztwie leja objaśnia proces syntezy ATP.

#### 4.8 Moduł VIII:

- Zwiedzający z pojemnika głównego pobiera kulkę symbolizującą dwutlenek węgla i umieszcza ją we wskazanym otworze.
- Kulka opada na platformę siłownika wewnątrz statywu.
- Zwiedzający pociągając za wajchę podnosi platformę, wpychając kulkę w ciąg powietrza.
- Kulka przemieszcza się wewnątrz przewodu częściowo ukrytego w ścianie.
- Zwiedzający obserwuje bieg kulki aż do jej wpadnięcia do tarczy obrotowej, symbolizującej cykl Calvina.

#### 4.9 Moduł IX:

- Zwiedzający ma za zadanie obrócić tarczą, co symbolizuje reakcje zachodzące w cyklu Calvina.
- Wewnątrz obudowy tarczy obrotowej zgromadzone są piłki oznaczone jako ADP,  $P_i$ , NADP, H,  $e^-$ ,  $H^+$  i  $CO_2$ , które znalazły się w środku w wyniku poprzednich działań.
- Infografika w tle tarczy przedstawia zachodzące w cyklu procesy, powstawanie związku  $C_6H_{12}O_6$  (glukozy) oraz wydalenie do stromy składników niewykorzystanych do jej produkcji.
- Zwiedzający ma za zadanie zwolnić blokadę i uwolnić z tarczy obrotowej wszystkie kulki, co symbolizuje uwalnianie glukozy.
- Infografika w tle sugeruje, jaki produkt właśnie wyprodukowano w fabryce FOTOSYNTeza.
- Wypuszczone kulki wpadają do pojemnika głównego, wracając tym samym do położenia początkowego.

#### 5. Informacje dodatkowe:

- Wymiary elementów funkcjonalnych (pokręta, uchwyty, chwytaki) powinny być ergonomiczne i dostosowane do antropometrycznej budowy dłoni użytkowników z grupy docelowej.
- Rozmieszczenie elementów funkcjonalnych powinno być zgodne z opisaną merytoryką, ale jednocześnie znajdować się na wysokościach dostępnych dla użytkowników grupy docelowej.
- Przewody i rury powinny mieć średnicę i być ułożone w sposób uniemożliwiający blokowanie kulek. Przypadek wpadania kulki w rezonans jest dopuszczalny i będzie traktowany jako walor interakcyjny, jeżeli kolejna kulka będzie w stanie przepchnąć poprzednią.
- Kulki powinny być w standardowym ogólnodostępnym rozmiarze
- Miejsca, gdzie użytkownik wkłada kulki powinny być oznaczone kolorami tak by w intuicyjny sposób użytkownik wiedział którą kulkę (o jakim kolorze ma włożyć)
- Elementy pneumatyczne powinny być możliwie wyciszone, aby nie utrudniały komfortu przebywania na ekspozycji przez wiele godzin.
- Stanowiska znajdujące się przed ścianą interaktywną powinny być oddane od niej o przynajmniej 900 mm, umożliwiając przejazd wózka inwalidzkiego.
- Elementy ruchome oparte na ruchu sprężynowym, powinny wracać do pozycji początkowej w sposób kontrolowany, powolny.
- Infografika stanowiąca tło ekspozycji powinna być wykonana trwałą, odporną na czyszczenie i uszkodzenia mechaniczne techniką. Przedstawione elementy powinny być odzwierciedlone realistycznie, sugerując wnętrze komórki, ale jednocześnie nawiązując do industrialnej stylistyki ekspozycji.
- Wszystkie elementy stanowiska, a w szczególności szczeliny i otwory, powinny wykluczać możliwość zakleszczenia części ciała i być wykonane zgodnie z normą PN-EN 1176.

#### 6. Szacunkowe wymiary ekspozycji:

Szerokość: 4750-5000mm

Wysokość: 2850-3000mm

Głębokość: od 350 do 1500 mm.

#### 7. Szacunkowy czas interakcji:

min. 5 minut

#### 8. Źródła:

[1] <https://pl.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-dependent-reactions>