Svetelná fáza fotosyntézy

Fotosyntéza je zložitý, viacstupňový biochemic͏ký proces, cez ktorý auto-trofné orga͏nizmy – najmä vyššie rastliny, ri͏asy a ni͏ektoré baktérie a protisty – zachy͏távajú slnečnú energiu a menia ju na chemickú energiu͏ vo forme glukózy. To je jednoduchý cukor, čo služí ͏ako energetic͏ká zásoba i ako stavebný materiál͏ pre bunky. K tejto premen͏e dochádza s pomo͏cou oxi͏du uhličitého (CO͏₂) z atmosféry͏ a vody͏ (͏H₂O), ktorú rastliny prijí͏majú zo svojho prostred͏ia cez koreňový systém pričom dôležitú úlohu ͏v cel͏om procese má zelený fotosyntetický pigment – chlorofyl - schopný absorbovať svetelné žiarenie špecifických vlnový͏ch dĺžok. Výsledok tejto premeny je nielen tv͏orba organickej látky͏ ale i uv͏oľnenie͏ ͏mole͏kulového kyslíka (O₂), kt͏orý sa stáva kľúč͏ovým produkto͏m pre životné͏ funkcie aerób͏nych organizmov. Zjednodušená rovnica fotosyntézy znie:

oxid uhličitý + voda → glukóza + kyslík

Chlorofyl a chloroplasty

Premena energie slnečného žiarenia na energiu chemických väzieb je nerozlučne spätá s prítomnosťou a funkciou chlorofylu, ktorý sa nachádza v tylakoidových membránach chloroplastov. Chlorofyl ako molekula má pomerne zložitú chemickú štruktúru, pričom u rôznych skupín fotosyntetizujúcich organizmov existujú viaceré modifikácie tohto pigmentu. Základným typom, ktorý sa nachádza u všetkých fotosyntetických organizmov, je chlorofyl a, no okrem neho existujú aj tzv. pomocné alebo akcesórne pigmenty, ktoré absorbujú svetlo v oblastiach spektra, ktoré chlorofyl a nevyužíva efektívne. Medzi tieto pigmenty patria chlorofyl b (a u rias a protistov aj c, d a e), xantofyly a karotenoidy, napríklad β-karotén.

Z chemického hľadiska každá molekula chlorofylu pozostáva z dvoch hlavných častí: hydrofóbneho, v tukoch rozpustného uhľovodíkového chvosta (C₂₀H₃₉-) a planárnej, hydrofilnej hlavičky, v ktorej centre sa nachádza atóm horčíka (Mg²⁺). Rôzne formy chlorofylu sa líšia postrannými skupinami naviazanými na túto hlavičku. Tieto dve časti sú navzájom spojené esterkovou väzbou, čím vzniká funkčný pigment schopný zapájať sa do fotosyntetických reakcií.

  Základnou štruktúrnou jednotkou fotosyntézy je tylakoid, plochý mechúrik s membránou obsahujúcou fotosyntetické pigmenty a enzýmy. Kým prokaryotické organizmy majú tylakoidy voľne uložené v cytoplazme, eukaryoty ich majú usporiadané v chloroplastoch, organelách obalených dvojitou membránou. Tylakoidy sú usporiadané do stohov nazývaných grana (jedn. číslo: granum), medzi ktorými sa nachádza vnútorné prostredie chloroplastu nazývané stroma. Na rozdiel od mitochondrií, ktoré majú dve membrány a dva oddelené priestory, chloroplasty obsahujú tri membránové systémy a zodpovedajúce tri kompartimenty, čo im umožňuje vysoko špecializované metabolické funkcie.

Fyzikálny základ fotosyntetického žiarenia

Svetlo je forma elektromagnetického žiarenia, ktorá sa šíri ako vlny, ale správa sa aj ako častice – fotóny. Každý fotón nesie určitú dávku energie, a čím kratšia je vlnová dĺžka svetla, tým viac energie má fotón. Najdôležitejšie pre fotosyntézu sú vlnové dĺžky svetla od 400 do 700 nanometrov (nm). Túto časť svetelného spektra označujeme ako fotosynteticky aktívne žiarenie (PAR), a zodpovedá viditeľnému svetlu – teda tomu, ktoré vnímame našimi očami ako farebné.

Modré a fialové svetlo (kratšie vlnové dĺžky) majú viac energie ako červené svetlo (dlhšie vlnové dĺžky). Táto energia je dôležitá, pretože sa používa na "nakopnutie" elektrónov v pigmentových molekulách – proces nazývaný excitácia. Pigmenty pohlcujú iba určité vlnové dĺžky svetla – ostatné odrážajú, a práve tieto odrazené farby vidíme. Napríklad chlorofyl absorbuje najmä modré a červené svetlo, ale odráža zelené, preto sa rastliny javia zelené.

Pigmentový aparát chloroplastov

Rastliny využívajú rôzne pigmenty na zachytávanie svetla:

* Chlorofyl a: Je základným pigmentom, ktorý sa nachádza vo všetkých fotosyntetizujúcich organizmoch (rastliny, riasy, cyanobaktérie). Pohlcuje svetlo najmä v modrej (~430 nm) a červenej (~662 nm) oblasti spektra. Má štruktúru porfyrínového kruhu s centrálnym atómom horčíka (Mg²⁺), ktorý hrá kľúčovú úlohu pri absorpcii svetla.
* Chlorofyl b: Pomocný pigment, ktorý rozširuje spektrum zachytávaného svetla. Absorbuje svetlo hlavne v modrozelených (~455 nm) a žltooranžových (~640 nm) oblastiach. Je veľmi podobný chlorofylu a, ale má mierne odlišnú chemickú skupinu v molekule.
* Karotenoidy: Ide o skupinu žltých, oranžových a červených pigmentov (napr. beta-karotén, luteín), ktoré absorbujú svetlo v modrej a modrozelenej oblasti (400–500 nm). Chránia chlorofyl pred poškodením nadbytkom svetla a slúžia aj ako pomocné pigmenty. Ich štruktúra je založená na dlhom reťazci s konjugovanými dvojitými väzbami, ktorý dobre absorbuje svetlo.
* Xantofyly: Podskupina karotenoidov, ktoré okrem absorpcie svetla zohrávajú dôležitú úlohu v tzv. xantofylovom cykle – obrannom mechanizme proti nadmernému svetlu. Príkladom je zeaxantín, ktorý pomáha rozptýliť nadbytočnú svetelnú energiu ako teplo.

Pigmenty sú organizované do fotosystémov (PSII a PSI), ktoré sa nachádzajú v tylakoidných membránach. Každý fotosystém obsahuje zberačský (antenový) komplex, ktorý zhromažďuje svetlo a odovzdáva energiu do reakčného centra, kde sa spúšťa prenos elektrónov.

Listy

  Medzi všetkými fotosyntetizujúcimi organizmami sú rastliny jedinečné tým, že disponujú listami, vysoko špecializovanými orgánmi prispôsobenými na efektívne zachytávanie svetla a výmenu plynov. Nie všetky rastliny však musia mať listy. List možno vnímať ako akýsi biologický solárny panel, v ktorom sú vo veľkej hustote usporiadané bunky vybavené chloroplastmi. Do týchto buniek vstupujú základné suroviny fotosyntézy – voda a oxid uhličitý – a z nich vystupujú produkty – glukóza a kyslík.

Voda je do rastliny privádzaná prostredníctvom koreňového systému a transportovaná nahor cez špecializované vodivé bunky známe ako cievy (xylém). Keďže sucho predstavuje pre suchozemské rastliny zásadný problém, vyvinuli si štruktúry ako prieduchy (stomá), ktoré umožňujú riadenú výmenu plynov medzi vnútrom listu a vonkajším prostredím. Oxid uhličitý nemôže preniknúť cez voskovitú kutikulu, ktorá list chráni pred nadmerným odparovaním vody, avšak môže vstupovať cez prieduchové otvory lemované dvoma zatváracími bunkami. Rovnakým spôsobom list opúšťa aj kyslík, ktorý vzniká pri fotosyntéze. Tento proces však má aj nevýhodu – rastliny počas dňa prichádzajú o veľké množstvá vody. Napríklad topole v púštnych oblastiach môžu stratiť až 450 litrov vody za jednu hodinu.

Priebeh svetelnej fázy fotosyntézy

Svetelná fáza fotosyntézy prebieha v membránach tylakoidov v chloroplastoch, kde je svetelná energia absorbovaná chlorofylom a ďalšími fotochemickými pigmentmi. Tento proces má za cieľ transformovať svetelnú energiu na chemickú energiu vo forme ATP (adenozíntrifosfát)</b> a NADPH (redukovaný nikotínamidadenín dinukleotidfosfát)</b>, ktoré budú následne využité v tmavej fáze na fixáciu CO₂.

Taktiež počas tejto fázy dochádza k fotolýze vody, čím sa uvoľňuje kyslík ako vedľajší produkt.

Prevod svetelnej energie na chemickú energiu

Svetelná fáza fotosyntézy prebieha v membránach tylakoidov v chloroplastoch, kde je svetelná energia absorbovaná chlorofylom a ďalšími fotochemickými pigmentmi. Tento proces má za cieľ zmeniť svetelnú energiu na chemickú energiu vo forme ATP (adenozíntrifosfát) a NADPH (redukovaný nikotínamidadenín dinukleotidfosfát). Tieto zlúčeniny slúžia ako energetické konzervy a sú využité v tmavej fáze na fixáciu CO₂.

Okrem toho, vo svetelnej fáze sa deje aj fotolýza vody, čím sa uvoľňuje kyslík ako vedľajší produkt.

1. Absorpcia svetla a excitácia chlorofylu

Proces začína absorpciou svetla pigmentmi v anténovom komplexe, kde sa nachádzajú chlorofyl a ďalšie karotenoidy. Chlorofyl, najmä jeho formy chlorofyl a a chlorofyl b, absorbuje fotóny v modrej a červenej oblasti spektra. Tento proces vedie k excitačnému stavu chlorofylu, čo znamená, že jeden z jeho elektronov je vyvedený na vyššiu energetickú hladinu.

Chlorofyl funguje ako hlavný fotochemický pigment v fotosystémoch (PSI a PSII). Svetlom excitovaný elektron je potom prenosom na primárny akceptor elektrónov stabilizovaný v excitovanom stave. Tento prenos je realizovaný v fotosystéme II (PSII).

2. Fotosystém II (PSII) a fotolýza vody

Excitovaný elektron z chlorofylu je prenosom na primárny akceptor elektrónov v PSII, čím sa vytvorí oxidovaný chlorofyl, ktorý musí byť redukovaný späť. Tento proces vyžaduje získanie elektrónov, ktoré pochádzajú z rozkladu vody v fotolýze.

Fotolýza vody je kľúčovým krokom v svetelnej fáze, pri ktorom sa voda štiepi na protony (H⁺), elektróny (e⁻) a kyslík (O₂). Táto reakcia prebieha pod vplyvom svetla a je katalyzovaná manganovými komplexami prítomnými v PSII:

2H2O→4H++O2+4e−

Uvoľnené elektróny sú následne prenosom na primárny akceptor elektrónov, čo vedie k oxidácii chlorofylu a jeho návratu do redukovaného stavu.

3. Prenos elektrónov a fotofosforylácia

Elektróny uvoľnené fotolýzou vody prechádzajú cez elektrónový transportný reťazec (ETR), ktorý je situovaný na tylakoidových membránach. Tento transport elektrónov je postupný a zahŕňa niekoľko medzistupňov, medzi ktorými sa nachádzajú plastochinóny a cytochróm b6f komplex. Pri prechode elektrónov cez tieto proteíny dochádza k uvoľňovaniu energie, ktorá sa využíva na pumpovanie protónov (H⁺) do vnútra tylakoidov.

Vytvára sa tak elektrochemický gradient protónov, čo je nevyhnutné pre syntézu ATP v ďalších krokoch.

4. Fotosystém I (PSI) a tvorba NADPH

Elektróny zo PSII pokračujú do fotosystému I (PSI). Tu sú opäť excitované svetlom, čím získajú vyššiu energiu, ktorá sa následne prenáša na primárny akceptor elektrónov v PSI. Tento proces sa riadi svetelným excitovaním elektrónov a ich transportom cez fotochemické reakčné centrum PSI, pričom energia uvoľnená pri tomto procese sa využíva na redukovanie NADP⁺ na NADPH:

NADP++2e-+2H+ →NADPH+H+

Takto vzniknutý NADPH je zásobníkom elektrónov a redukčného ekvivalentu, ktorý sa využije v temnostnej fáze fotosyntézy (Kalvinov cyklus) na redukciu CO₂ a tvorbu sacharidov.

5. Fotofosforylácia: Vytvorenie ATP

Kľúčovým mechanizmom tvorby ATP v svetelnej fáze je fotofosforylácia, ktorá sa vykonáva prostredníctvom ATP-syntázy. Tento proces je poháňaný elektrochemickým gradientom protónov vytvoreným cez cytochróm b6f komplex a následným prenosom protónov späť do stromy cez ATP-syntázu. Pri tejto reakcii dochádza k tvorbe ATP zo ADP a inorganického fosfátu (Pi):

ADP+PiATP

Tento ATP je potom využívaný na regeneráciu RuBP v temnostnej fáze, ako aj na ďalšie biosyntetické procesy.

6. Cyklická a necyklická fotofosforylácia

Existujú dve formy fotofosforylácie:

* Necyklická fotofosforylácia: Zahŕňa oba fotosystémy (PSII a PSI). Pri tomto procese dochádza k produkcii ATP aj NADPH, čo je požiadavka pre Kalvinov cyklus. Elektróny prechádzajú z PSII cez elektronový transportný reťazec do PSI a následne sú použité na redukciu NADP⁺.
* Cyklická fotofosforylácia: V tomto prípade elektróny prechádzajú len cez fotosystém I (PSI) a neprejdú do NADP⁺, čím sa produkuje len ATP bez tvorby NADPH. Tento proces sa aktivuje, ak je potrebné doplniť ATP pre energetické potreby rastliny.

Svetelná fáza fotosyntézy mení slnečnú energiu na chemickú formu, ktorá je neskôr použitá na biosyntézu organických zlúčenín v tmavej fáze. Prebieha v membránach tylakoidov a zahŕňa procesy absorpcie svetla, fotolýzy vody, prenosu elektrónov, syntézy ATP a redukcie NADP⁺ na NADPH.