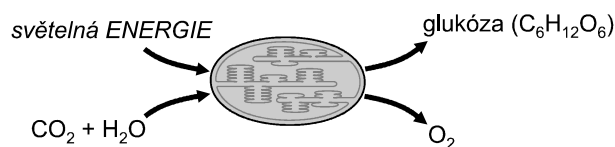


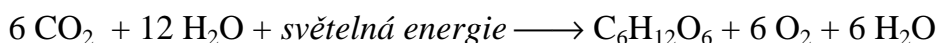
Fotosyntéza

Základní charakteristika fotosyntézy

- autotrofní typ výživy rostlin
- základní anabolický děj, zabezpečující existenci života na Zemi (základní zdroj organických látek v živé přírodě)
- základ koloběhu uhlíku v biosféře, po koloběhu vody druhý největší koloběh látek na Zemi



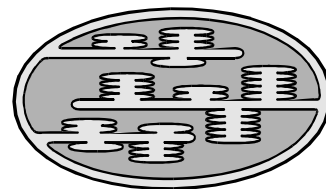
Chemická rovnice fotosyntézy



Chloroplast a jeho složky

Stavba chloroplastu

- tvořen dvěma vrstvami **biomembrány**
- vnější vrstva je hladká; vnitřní vrstva je zvrásněna – tvoří **lamely** (ploché přepážky), z nichž vybíhají **tylakoidy** (ploché měchýřky, často uspořádané do skupin)
 - Skupiny nahlučených tylakoidů uvnitř chloroplastu bývají ve světelném mikroskopu viditelné jako tmavá zrníčka, která se označují jako „grana“ (z dnešního pohledu je tento pojem zbytečný).
- vnitřní hmota se nazývá **stroma**
- má svou vlastní DNA i své vlastní ribozomy (chloroplasty zřejmě kdysi dávno vznikly jako vnitřní symbionti eukaryotických buněk)



Chlorofyl *a* – hlavní fotosyntetické barvivo

Chlorofyl *a* má schopnost se po dopadu světla vhodné vlnové délky uvést do **excitovaného stavu** a **odštěpit energii nabitý elektron**. Tento elektron je ihned přijat vhodnou látkou (přenašečem elektronů). Chybějící elektron je v molekule chlorofylu *a* nahrazen energeticky chudým elektronem odebraným od jiného přenašeče.

Chlorofyl *a* tedy funguje jako "energetická pumpa", která z jedné skupiny látek odsává elektrony, uděluje jim energii a předává je jiné skupině přenašečů.

V rostlinách se vyskytují dva typy chlorofylu *a* ($\text{P}^{\text{I}}_{700}$ a $\text{P}^{\text{I}}_{680}$), které se účastní dvou různých fází fotosyntézy.

Pomocná fotosyntetická barviva

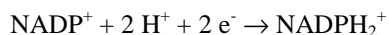
- jejich úkolem je usměrňovat tok fotonů do molekuly hlavního barviva; tím mnohonásobně zvyšují jeho účinnost
- pomocné chlorofyly:** **chlorofyl *b*** (u rostlin zelené vývojové větve – zelených řas a vyšších rostlin), ***c*** (hnědá větev – hnědé řasy), ***d*** (červená větev – červené řasy)
- karotenoidy:** karoteny (oranžové až červené, např. β -karoten) a xantofyly (žluté až žlutohnědé, např. xantofyl, fukoxantin)
- fykobiliny:** vyskytují se pouze u sinic a řas, např. fykocyanin (modrý), fykoerytrin (červený)

Další důležité látky

přenašeče elektronů: látky, které jsou schopny přijmout energii nabitý elektron a předat ho další látce; při některých přenosech se uvolňuje energie využitelná pro syntézu ATP

Mezi přenašeče elektronů patří např. cytochromy, plastochinon, plastokyanin, ferredoxin ap.

přenašeč vodíku: NADP^+ (**n**ikotinamid**a**denin**d**inukleotid**f**osfát); přijetím energeticky bohatých elektronů získá schopnost navázat vodíkové protony a přenést je do dalších fází fotosyntézy



Průběh fotosyntézy

Primární (fotochemická, světelná) fáze

- probíhá **na membránách tylakoidů** (zde jsou umístěna fotosyntetická barviva, přenašeče elektronů a přenašeč vodíku)
- k jejímu průběhu je nutné světlo

vstupy primární fáze: světlo, H_2O , $ADP + P$, $NADP^+$

výstupy primární fáze: $NADPH_2^+$ (vodík navázaný na přenašeči), ATP (uložená energie), O_2 (odpad)

Dvěma hlavními ději primární fáze je **cyklická** a **necyklická fotofosforylace**.

Cyklická fotofosforylace

Elektrony uvolněné z excitované molekuly chlorofylu *a* (P^I_{700}) se kaskádou přenašečů dostávají zpět do této molekuly. Při přenosu elektrony postupně ztrácejí energii, uvolněná energie je využita pro syntézu molekul ATP. Hlavním cílem tohoto cyklického děje je tedy syntéza ATP, jehož energie může být využita v dalších fázích fotosyntézy (i pro další děje v rostlinné buňce).

Necyklická fotofosforylace

Necyklický děj (za účasti P^I_{700} i P^{II}_{680}) během něhož jsou z molekuly vody odebrány 2 elektrony. Elektrony (jimž byla molekulami chlorofylu udělena energie) jsou přijaty látkou $NADP^+$. Odebráním elektronů nastane tzv. **fotolýza vody** - H_2O se rozpadne na kyslík (uniká jako odpad) a 2 vodíkové protony, které jsou (spolu s energeticky bohatými elektrony) ihned navázány na přenašeč $NADP^+$. Tím vznikne přenašeč s navázaným vodíkem $NADPH_2^+$. Hlavním účelem tohoto děje je tedy **uvolnění vodíku z vody a jeho přenos** (pomocí přenašeče) **do další fáze fotosyntézy**.

I při tomto ději vzniká ATP (proto se nazývá "fotofosforylace"), jeho vznik však není hlavním účelem.

Sekundární (syntetická, temnotní) fáze

- hlavní procesy probíhají **ve vnitřní hmotě (stromatu)** chloroplastů
- k jejímu průběhu není nutné světlo

vstupy sekundární fáze: $NADPH_2^+$ (vodík navázaný na přenašeči), ATP (zdroj energie), CO_2 (zdroj uhlíku a kyslíku)

výstupy sekundární fáze: $NADP^+$, $ADP + P$, H_2O , $C_6H_{12}O_6$ (glukóza)

Hlavním dějem sekundární fáze je **cyklická reakce**, během níž je vodík a oxid uhličitý postupně zabudován do molekuly sacharidu. K průběhu reakce je nutná energie (v podobě ATP). Cyklická soustava reakcí sekundární fáze se nazývá **Calvinův cyklus**.

Calvinův cyklus

Při **Calvinově cyklu** je 6 molekul CO_2 je zabudováno do 6 molekul pětiuhlíkaté látky (na schématu označené jako C_5) → vznikne 6 molekul šestiuhlíkaté látky (C_6). Ty se hned rozštěpí na 12 molekul tříuhlíkatých látek (C_3). Dvě z nich opouštějí cyklus a stávají se surovinou pro syntézu jedné molekuly glukózy. Zbývající molekuly se postupně přemění zpět na 6 molekul pětiuhlíkaté látky.

Vodík (přinášený do reakce látkou $NADPH_2^+$) je využit nejen **k zabudování do molekuly sacharidu**, ale také **k odstranění "přebytečných" molekul kyslíku**. V CO_2 je totiž poměr uhlíku a kyslíku 1:2, zatímco ve výsledné molekule glukózy je poměr 1:1. Přebytečný kyslík reaguje s vodíkem za vzniku **vody** (ta je v této fázi "odpadní látkou").

Podle způsobu, jakým je CO_2 přijímán do buněk a podle typu sekundární fáze rozlišujeme tzv. **C_3 , C_4 a CAM rostliny**:

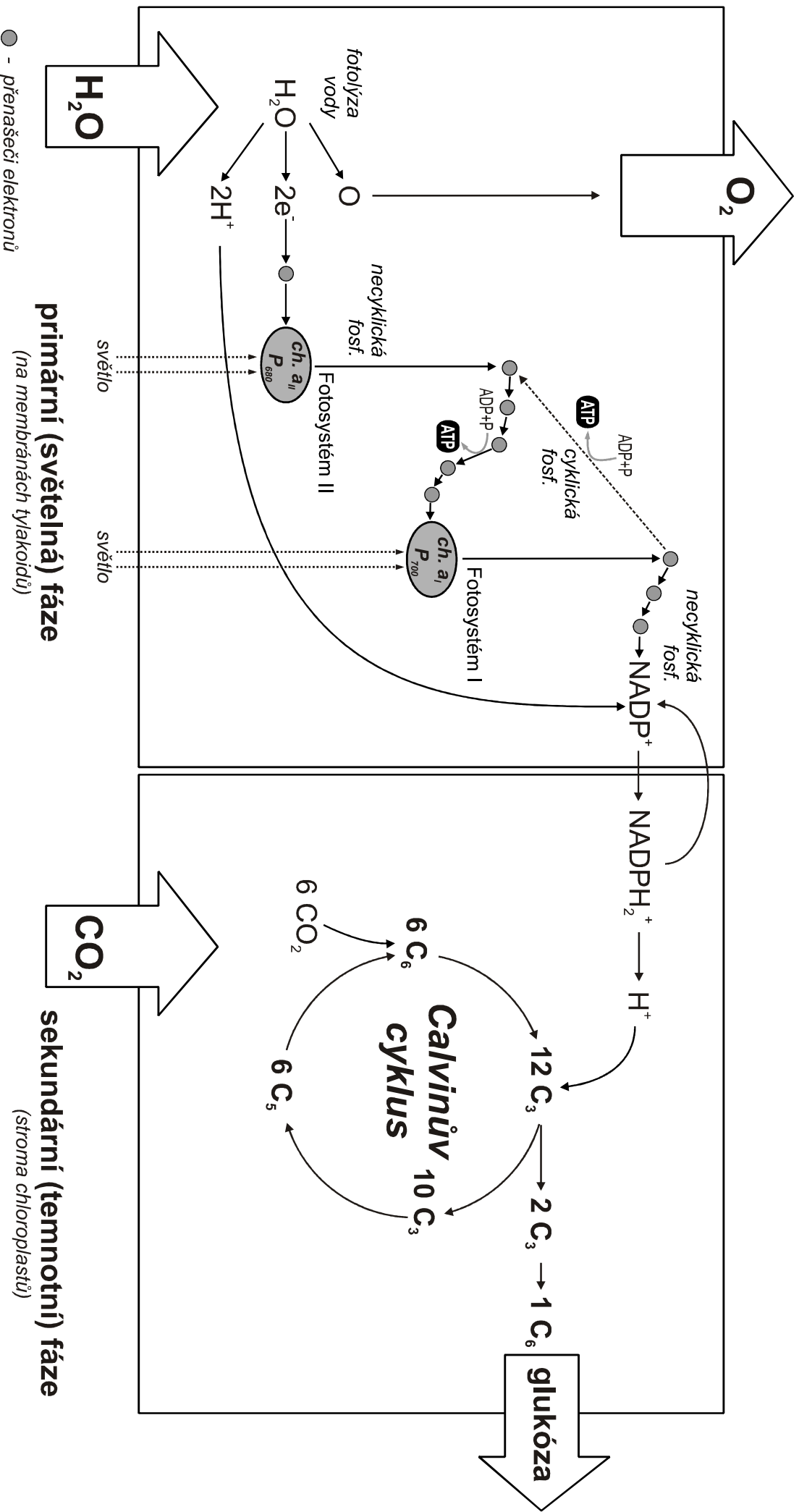
Mezi **C_3 -rostliny** patří převážná většina rostlin (hlavně rostliny mírného pásu). Mají pouze standardní **Calvinův cyklus** (v jehož průběhu se vyskytuje tříuhlíkatá látka, proto " C_3 "). Na jeho děje plynule navazuje tzv. **fotorespirace**, kdy se velké množství vytvořené glukózy (přibližně 30 až 50 %) na světle opět rozloží na H_2O a CO_2 . Fotorespirace nastává především v horkých obdobích dne, kdy má rostlina uzavřené průduchy, a proto nemůže přijímat CO_2 z ovzduší. Fotorespirace se účastní nejen mitochondrie, ale také tzv. **peroxizomy**.

Mezi **C_4 -rostliny** patří mnohé rostliny **subtropů** (např. kukuřice, proso, rýže, cukrová třtina). Žijí v podmínkách, kdy během dne rostlina nemůže mít otevřené průduchy (a proto by vůbec nemohla přijímat CO_2). CO_2 je proto rostlinou absorbován zpravidla v noci, naváže se na speciální přenašeč (tzv. fosfoenolpyruvát) a skladuje se v podobě jablečnanu (malátu) ve zvláštních buňkách. K navázání a opětovnému uvolnění CO_2 slouží soustava reakcí nazývaná **Hatch-Slackův cyklus** (v jehož průběhu se vyskytuje čtyřuhlíkatá látka, proto " C_4 "). Ve dne se z jablečnanu uvolňuje potřebný CO_2 a vstupuje do buněk s Calvinovým cyklem. Tyto buňky ani v nejteplejších obdobích dne netrpí nedostatkem CO_2 , což výrazně potlačuje fotorespiraci a tím i ztráty energie.

Podobně jako u C_4 -rostlin probíhá fixace CO_2 u tzv. **CAM-rostlin** (patří mezi ně např. kaktusy a další sukulenty, název odvozen z termínu "*crassulacean acid metabolism*"). Jejich metabolismus je ještě lépe přizpůsobený extrémně suchým podmínkám (skály, pouště), např. dlouhodobým skladováním jablečnanu ve vakuolách.

Využití glukózy

- pohotový **zdroj energie** pro buněčné dýchání
- surovina pro **syntézu škrobu** (zásobní polysacharid)
- zdroj pro **syntézu dalších organických látek** (bílkovin, lipidů ap.)



primární (světelná) fáze

(na membránách tylakoidů)

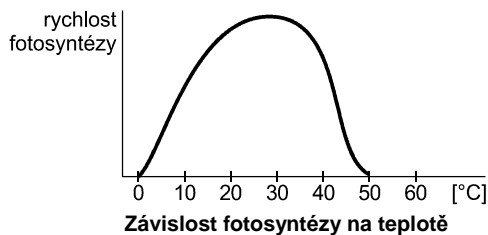
sekundární (temnotní) fáze

(stroma chloroplastu)

Vnější faktory ovlivňující fotosyntézu

Teplota

- od 0° do přibližně 50 až 60 °C (optimální teplota pro většinu rostlin je 25 až 30 °C)

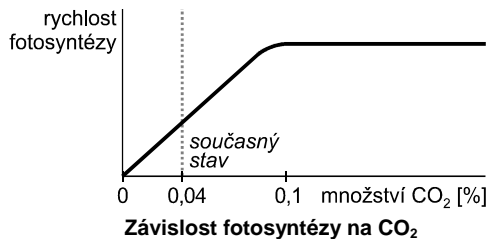


Voda

- zdroj vodíkových protonů
- z pohledu fotosyntézy nebývá limitujícím faktorem (pouze necelé 1 % přijaté vody je využito při fotosyntéze)

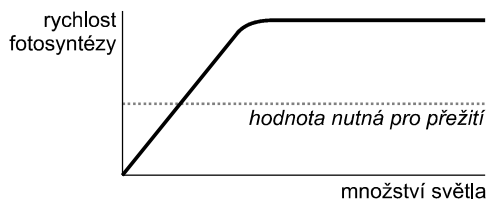
Oxid uhličitý

- zdroj uhlíku a kyslíku pro syntézu glukózy
- v běžných podmínkách fotosyntéza nejrychleji probíhá při koncentracích vyšších než přibližně 0,1 %. V současné atmosféře je koncentrace CO₂ přibližně 0,04 %, takže pro mnohé rostliny je nedostatek CO₂ limitujícím faktorem („brzdí“ je v růstu).
V umělých podmínkách (skleníky, akvária ap.) lze umělým dodáváním CO₂ produkci fotosyntézy podstatně zvýšit.



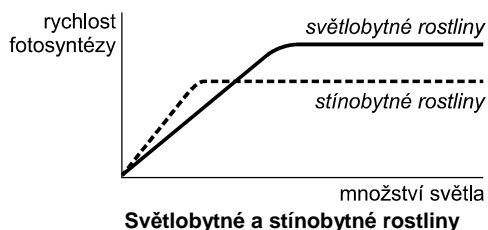
Množství světla

- zpočátku je rychlost fotosyntézy přímo úměrná množství světla, od určitých hodnot ("nasycení světlem") už další zvyšování intenzity světla fotosyntézu neovlivňuje. Při extrémně velkých dávkách světla (na grafu není znázorněno) dochází k poškození fotosyntetického aparátu a produkce fotosyntézy klesá.



stínobytné rostliny – dokážou lépe využít nižší intenzitu světla, k "nasycení světlem" však u nich dochází při nižších hodnotách (viz graf)

světlobytné rostliny – při nižší intenzitě osvětlení mají nižší produkci než stínobytné rostliny, dokážou však lépe využít vyšší hodnoty osvětlení (viz graf)



Kvalita (barva) světla

Pro fotosyntézu rostliny využívají především červenou a modrou část viditelného světelného spektra; ostatní složky (např. zelená, žlutá) rostliny téměř nedokážou využít.

Zdroje pro umělé osvětlení rostlin (např. ve sklenících nebo v akváriích) by měly mít vhodné spektrální složení. Z tohoto pohledu se např. sodíkové výbojky (používané pro svou vysokou účinnost v pouličním osvětlení) pro pěstování rostlin nehodí.

