مجلة المجتهد
دروس شاملة، دقيقة، سهلة الفهم والحفظ

الإصدار الثاني
علوم الطبيعة والحياة
العدد السادس
www.okacha.academy

مراجعة وتدقيق الأستاذ بوالريش أحمد

التركيب الضوئي

تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة

إعداد الأستاذ: بن خريف مصطفى
إثراء الأستاذ: بلمداني جلال

العدد 06

عكاشة BOOKSTORE
أكثر من مجرد دار نشر

بالتعاون مع فريق عكاشة

التحضير الجيد للبكالوريا

نسخة رقمية مجانية مقتبسة من كتاب السلسلة الفضية - جميع الحقوق محفوظة لدار النشر مكتبة عكاشة

مقدمة

تتواجد الطاقة في الطبيعة في عدة أشكال، وتتدفق باستمرار بين الأنظمة البيئية والحيوية متحولة من شكل لآخر. يقوم النبات الأخضر بالتقاط الطاقة الضوئية من مصدرها الأول وهو الشمس، ويُحولها بعملية التركيب الضوئي إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية التي يركبها لنموه.

لفهم هذه الظاهرة الحيوية سندرسها في ثلاثة محاور رئيسية وهي:

- الصانعة الخضراء: مقر التركيب الضوئي.
- اليخضور: جزيئة تلتقط الطاقة الضوئية.
- مرحلتي التركيب الضوئي: مرحلة كيموضوئية ومرحلة كيموحيوية.

مخطط الوحدة

01 مفاهيم أساسية 2
02 شدة التركيب الضوئي 2
03 مقر التركيب الضوئي 3
04 مراحل التركيب الضوئي 5
05 المرحلة الكيموضوئية 5
06 المرحلة الكيموحيوية 7
07 العلاقة بين مرحلتي التركيب الضوئي 9
08 حصيلة التركيب الضوئي 10
09 الخلاصة 10

كلمة فريق عكاشة

*عندما كنا صغارا أحببنا المطر فكنا نلعب تحته ونستمتع به
وعندما كبرنا أحببنا العلم فجمعنا شملنا لأجله، وعقدنا العزم على تسخير أنفسنا له.*

*نحن في البداية فقط، صحيح لسنا كبارا ولكن سنكبر معا
سنحاول...نحاول...ونحاول تقديم المساعدة دوما *

www.okacha.academy

مجلة المجتهد

01. مفاهيم أساسية

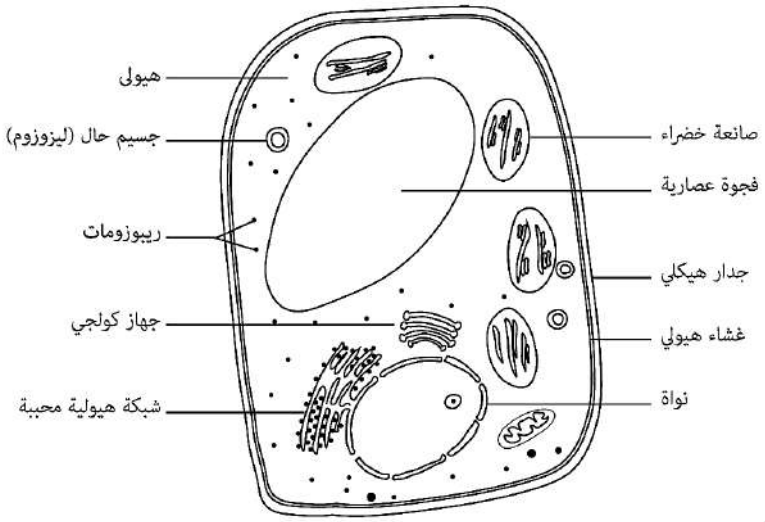
النباتات الخضراء كائنات ذاتية التغذية فهي تُركب المواد العضوية اللازمة لنموها وتكاثرها انطلاقا من مواد أولية (معدنية) تتمثل في الماء (H_2O)، الأملاح وثاني أوكسيد الكربون (CO_2) بواسطة عملية التركيب الضوئي.

التركيب الضوئي ظاهرة حيوية تقوم بها الخلية النباتية على مستوى الصانعة الخضراء يتم فيها تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية.

تتطلب عملية التركيب الضوئي توفر اليخضور والضوء والـ CO_2 والـ H_2O.

تتمثل مظاهر عملية التركيب الضوئي في امتصاص الـ CO_2، طرح ثنائي الأكسجين (O_2)، امتصاص الـ H_2O وتركيب المادة العضوية كالسكريات.

تتميز الخلية النباتية باحتوائها على عضية خاصة تسمى الصانعة الخضراء (بلاستيدة يخضورية) تحتوي جزيئات قادرة على امتصاص الطاقة الضوئية تُسمى اليخضور.



رسم تخطيطي يبين تعضي الخلية النباتية

تتلخص عملية التركيب الضوئي في المعادلة التالية:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O$$

مجلة المجتهد

02. شدة التركيب الضوئي

نُعبر عن شدة التركيب الضوئي إما بكمية الـ O_2 المنطلق أو بكيمة الـ CO_2 الممتص.

1- تأثير ألوان الطيف على شدة التركيب الضوئي

الضوء الأبيض الذي يرى بالعين المجردة مزيج من سبعة أطياف محصورة بين طول الموجة 400 نانو متر (البنفسجي) و700 نانومتر (الأحمر) وهي على الترتيب: البنفسجي، الأزرق، النيلي، الأخضر، البرتقالي، الأصفر والأحمر.

2- طيف الامتصاص وطيف النشاط

أ- طيف الامتصاص: هو شدة امتصاص الضوء بدلالة طول الموجة ويُعبَّر عنه بواسطة منحنى بياني.

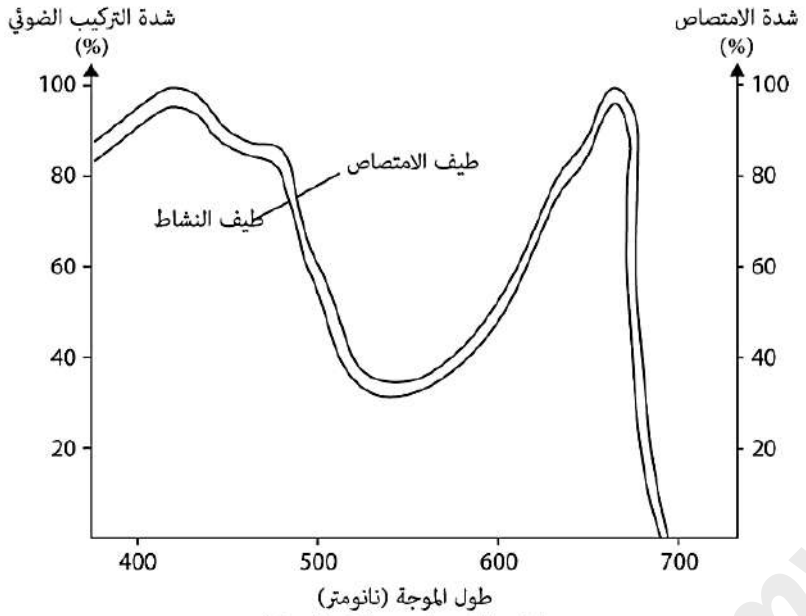
تُقاس شدة الامتصاص باستعمال جهاز المطياف الضوئي.

ب- طيف النشاط: هو تغير شدة التركيب الضوئي بدلالة طول الموجة ويُعبَّر عنه كذلك بمنحنى بياني.

تُقاس شدة التركيب الضوئي باستعمال التجريب المدعم بالحاسوب ExAO.

يوجد تطابق بين طيف الامتصاص وطيف النشاط (تناسب طردي)، بحيث كل منهما كبير على مستوى الإشعاعات الطرفية (الأحمر والبنفسجي)، ضعيف على مستوى الإشعاعات الوسطية، ويكاد ينعدم عند الإشعاع الأخضر. فالإشعاعات الأكثر امتصاصا من طرف اليخضور هي الأكثر نجاعة (فعالية) في عملية التركيب الضوئي.

www.okacha.academy



طيف الامتصاص وطيف النشاط

مجلة المجتهد

03. مقر التركيب الضوئي

تتم عملية التركيب الضوئي على مستوى الصانعة الخضراء. لدراسة أهم تفاعلات عملية التركيب الضوئي يجب التطرق أولا لدراسة مقرها.

1- بنية الصانعة الخضراء

عضية ذات شكل بيضوي يحدها غشائين خارجي وداخلي، يُشكل الغشائين معا غلاف الصانعة. تحتوي على سائل يُسمى الحَشْوة أو ستروما. تحتوي الحَشوة على صفائح حَشَوية تتوضع عليها كُييسات (تِيلاكُويدات) فوق بعضها وتشكل البُذَيرة أو الغُرانا. تحتوي الحشوة كذلك على حُبيبات نَشَوية، جزيئات ADN، وريبوزومات.

تتميز الصانعة الخضراء ببنية حُجَيْرية لأنها مُقسمة إلى ثلاثة فَضوات (حُجَيرات) وهي: المسافة بين الغشائين، التجويف الذي تملأه الحشوة وتجويف الكُييسات.

احتواء الصانعة على ثلاث حجيرات يسمح لها بتوفير ثلاثة أوساط مختلفة من حيث التركيب الكيموحيوي ودرجة الحموضة (pH)، وهذا مهم لنشاط مختلف الإنزيمات فيها.

2- تركيب الصانعة الخضراء

2-1- الحشوة

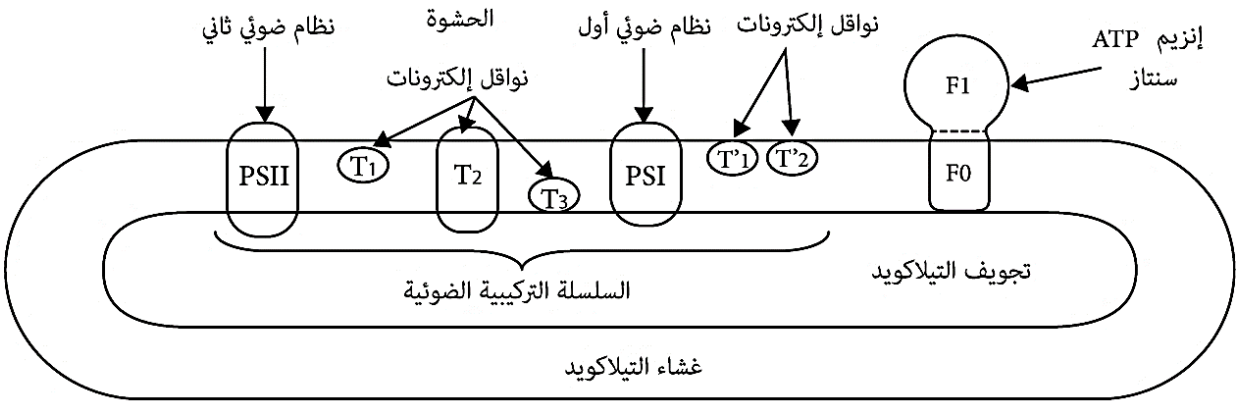
تحتوي على مواد أيضية وسيطة لتركيب الجزيئات العضوية، مرافقات إنزيمية وعدة إنزيمات أهمها الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز (Rubisco)، وهو الإنزيم الأكثر وفرة في الطبيعة.

2-2- التيلاكويد (الكييس)

يتركب غشاء الكييس (التيلاكويد) من طبقة فوسفوليبيدية مُضاعفة تحتوي على نظامين ضوئيين PSI وPSII، خمسة نواقل للإلكترونات (T_1، T_2، T_3، T'_1، T'_2)، الإنزيم NADP ريدوكتاز والإنزيم ATP سنتاز.

التركيب الكيموحيوي لكل من التيلاكويد والحشوة مختلف، وهذا ما يجعل لكل منهما دور مختلف في عملية التركيب الضوئي.

كل ما تحتاجه متوفر في موقعنا
www.okacha.academy

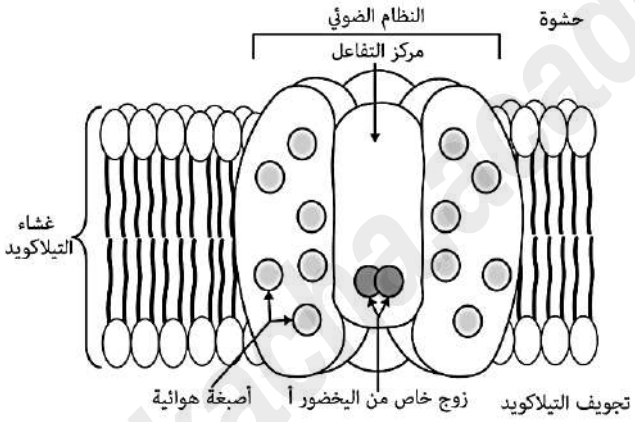


رسم تخطيطي يوضح بنية التيلاكويد

أ- النظام ضوئي

بنية النظام الضوئي

يوجد النظام الضوئي في غشاء الكييس، وهو مُعقد بروتيني يحتوي على عدد كبير من أصبغة التركيب الضوئي (اليخضور وأشباه الجزرين) بحيث الجزء الأكبر منها يشكل أصبغة هوائية، وزوج خاص من اليخضور أ يشكل مركز التفاعل، سنتعرف على دور الأصبغة الهوائية وأصبغة مركز التفاعل في المرحلة الكيموضوئية.



رسم تخطيطي يوضح بنية النظام الضوئي

ب- أصبغة التركيب الضوئي

تتمثل أصبغة التركيب الضوئي في اليخضور أ، اليخضور ب وأشباه الجزرين. هذه الأصبغة لها نفس الدور ويتمثل في امتصاص الفوتونات الضوئية، ولكن نتكلم غالبا عن اليخضور لأنه يمثل النسبة الأكبر. الجدول التالي يوضح أنواع أصبغة اليخضور:

التسمية	نوع الصبغة	عدد الجزيئات في النظام الضوئي	الرمز المستعمل
أصبغة هوائية	يخضور أ يخضور ب	مئات	P1.P2.P3...Pn
	أشباه الجزرين (أصبغة مساعدة)	عشرات	
أصبغة مركز التفاعل	يخضور أ	2 فقط	P_{680} في PSII P_{700} في PSI

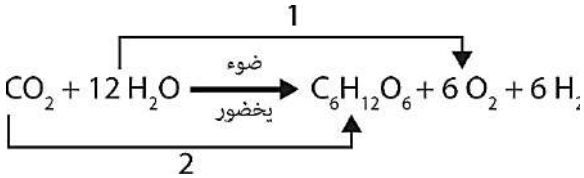
مجلة المجتهد

04. مراحل التركيب الضوئي

تتم عملية التركيب الضوئي وفق مرحلتين:

1- مرحلة كيموضوئية مقرها غشاء التيلاكويد، تشترط وجود الضوء ويتم فيها أكسدة الماء وطرح الـ O_2.

2- مرحلة كيموحيوية مقرها الحشوة، لا تشترط الضوء ويتم فيها إرجاع الـ CO_2.



$$CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow[\text{يخضور}]{\text{ضوء}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2$$

بالاعتماد على المبدأ "التركيب الكيموحيوي يحدد الوظيفة" يمكن تحديد مقر مرحلتي التركيب الضوئي في الصانعة الخضراء بحيث:

- المرحلة الكيموضوئية: يحتوي غشاء التيلاكويد على أنظمة ضوئية بها جزيئات اليخضور القادرة على اقتناص الفوتونات الضوئية. كما يحتوي على نواقل تنقل الإلكترونات خلال تفاعلات الأكسدة، هذا دليل على أنه مقر تفاعلات أكسدة (مرحلة كيموضوئية).

- المرحلة الكيموحيوية: تحتوي الحشوة على مواد الأيض الوسيطة لتركيب المواد العضوية: نواقل البروتونات والـ ATP وعدد من الإنزيمات كـ Rubisco، هذا دليل على أنها مقر تفاعلات إرجاع (مرحلة كيموحيوية).

مجلة المجتهد

05. المرحلة الكيموضوئية

تتلخص هذه المرحلة في التفاعلات التالية:

1- أكسدة الأنظمة الضوئية.

2- الأكسدة الضوئية للماء.

3- إرجاع مستقبل الإلكترونات.

4- الفسفرة الضوئية.

1- أكسدة الأنظمة الضوئية

تستقبل صبغة هوائية فوتونا ضوئيا فتتهيج وينتقل إلكترون أحد ذراتها من مدار داخلي (مدار أصلي) إلى مدار خارجي. يعود الإلكترون إلى مداره الأصلي فتتحرر منه الطاقة المُكتسبَة وتنتقل إلى صبغة هوائية مجاورة فتهيجها وهكذا... تصل الطاقة إلى صبغة مركز التفاعل فتتهيج بدورها وتُحرر إلكترونا غنيا بالطاقة، ويتأكسد النظام الضوئي.

- دور الأصبغة الهوائية: تلتقط الفوتونات الضوئية وتنقل طاقتها لأصبغة مركز التفاعل.

- دور أصبغة مركز التفاعل: تتجمع فيها الطاقة الملتقطة من مختلف الجزيئات الهوائية وتتأكسد محررة إلكترونا غنيا بالطاقة.

إذن، يقتنص النظام الضوئي الطاقة الضوئية ويتأكسد ويحرر إلكترونين غنيين بالطاقة.

- معادلة أكسدة الـ PSII:

$$2P_{680}^{*} \rightarrow 2P_{680}^{+} + 2é$$

- معادلة أكسدة الـ PSI:

$$2P700^{*} \rightarrow 2P700^{+} + 2é$$

2- الأكسدة الضوئية للماء

بعد أكسدة الأنظمة الضوئية في وجود الضوء، يتأكسد الماء وفق المعادلة:

$$H_2O \rightarrow 2H^+ + 2é + ½\ O_2$$

جزيئة الماء هي المصدر الأول للإلكترونات والـ O_2 المنطلق.

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء في السلسلة التركيبية الضوئية ويستقبلها في الأخير مستقبل للإلكترونات على الترتيب التالي:

- مصير إلكترونات أكسدة الماء: تُرجِع النظام الضوئي الثاني PSII المُؤكسَد ضوئيا ليسترجع قابلية التنبيه من جديد.

- مصير إلكترونات الـPSII : تنتقل إلى T_1 ثم T_2 ثم T_3 وتُرجِع النظام الضوئي الأول PSI المؤكسَد ضوئيا، ليسترجع قابلية التنبيه من جديد.

- مصير إلكترونات الـ PSI: تنتقل إلى T'_1 ثم T'_2 وتُرجِع المستقبل الأخير للإلكترونات $NADP^+$.

$$H_2O \rightarrow 2H^+ + 2é + 1/2\ O_2$$
$$2P^*_{680} + 2é \rightarrow 2P$$
$$2P_{680}^* \rightarrow 2P_{680}^+ + 2é$$
$$2P_{700}^+ + 2é \rightarrow 2P_{700}$$
$$2P_{700}^* \rightarrow 2P_{700}^+ + 2é$$
$$NADP^+ + 2H^+ + 2é \rightarrow NADPH,H^+$$

3- إرجاع مستقبل الإلكترونات

في وجود الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء وتوفر البروتونات، يقوم الإنزيم NADP ريدوكتاز بإرجاع مستقبل الإلكترونات $NADP^+$ في الحشوة وفق المعادلة:

$$NADP^+ + 2é + 2H^+ \rightarrow NADPH,H^+$$

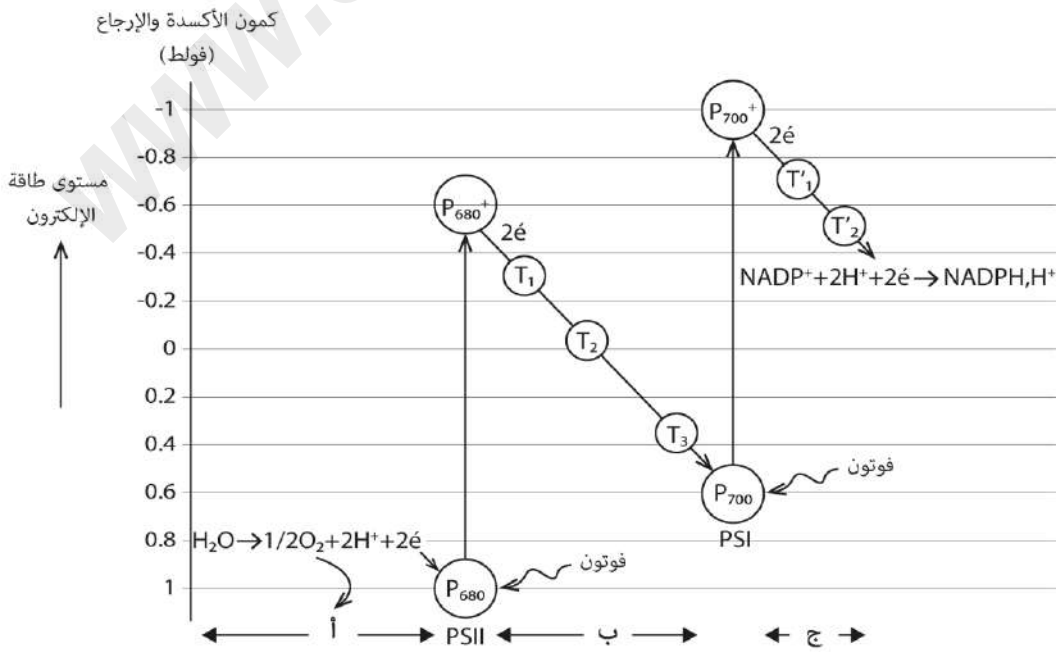
تنتقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء تلقائيا إلى المستقبل الأخير للإلكترونات $NADP^+$ عبر السلسلة التركيبية الضوئية من كمون الأكسدة الإرجاعية المنخفض إلى كمون الأكسدة الإرجاعية المرتفع، بحيث:

- من الـH_2O إلى الـ PSII: تحدث أكسدة ضوئية لجزيء الماء وينتج عنه إلكترونين ينتقلان إلى الـ PSII تلقائيا من كمون أكسدة وإرجاع منخفض (0.8 فولط) إلى كمون أكسدة وإرجاع مرتفع (1 فولط).

- من الـ PSII إلى الـ PSI: يقتنص الـ PSII الفوتونات الضوئية فيتغير كمون أكسدته وإرجاعه من (1 فولط) إلى (0.6 - فولط) فيتأكسد ويُحرّر إلكترونين ينتقلان تلقائيا في نواقل متزايدة كمون الأكسدة والإرجاع T_1، T_2، T_3 وتُرجِع الـ PSI^+ ذو كمون الأكسدة والإرجاع (0.6 فولط).

- من الـ PSI إلى الـ $NADP^+$: يقتنص الـ PSI الفوتونات الضوئية فيتغير كمون أكسدته وإرجاعه من (0.6 فولط) إلى (1- فولط) ويتأكسد مُحرّرا إلكترونين ينتقلان تلقائيا حسب كمون أكسدة وإرجاع متزايد في الناقلين T'_1, T'_2 ، ويستقبلهما في الأخير الـ $NAADP^+$ ذو كمون الأكسدة والإرجاع (0.4- فولط).

يوضح الرسم التخطيطي الموالي آلية انتقال الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية وارجاع مستقبل الإلكترونات.



مخطط يوضح آلية انتقال الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية

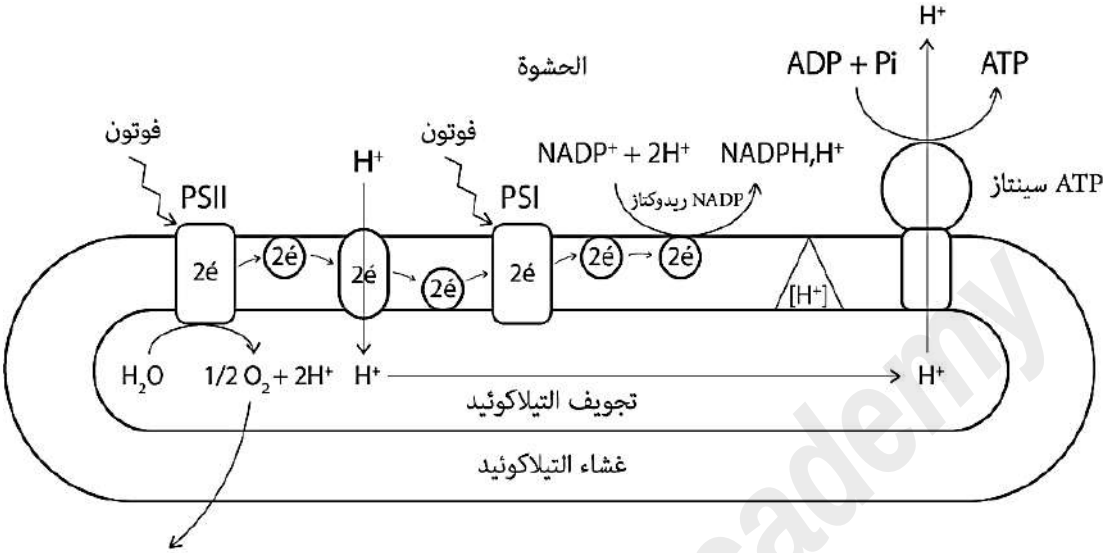
www.okacha.academy

4- الفسفرة الضوئية

يتأكسد الماء ضوئيا وتتراكم البروتونات الناتجة في تجويف الكييس. وعندما يستقبل الناقل T_2 الإلكترون أثناء انتقاله في سلسلة الأكسدة الإرجاعية، فإنه يستعمل طاقته لضخ البروتونات كذلك من الحشوة إلى التجويف. يصبح تركيز البروتونات في التجويف أكبر من الحشوة فتنتشر عبر قناة في الإنزيم ATP سنتاز لتعديل الفرق في التركيز. تسمح الطاقة المتحررة من خروج البروتونات بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي (Pi) وفق المعادلة:

$$ADP + Pi \rightarrow ATP + H_2O$$

يلخص الرسم التخطيطي التالي أهم تفاعلات المرحلة الكيموضوئية.



رسم تخطيطي يمثل المرحلة الكيموضوئية

مجلة المجتهد

06. المرحلة الكيموحيوية

تُسمى المرحلة الكيموحيوية كذلك بحلقة كالفن وبنسون أو مرحلة تثبيت الكربون.

هي سلسلة مغلقة من التفاعلات تحدث في الحشوة، يتم فيها تثبيت الـ CO_2 وتركيب الغلوكوز باستعمال نواتج المرحلة الكيموضوئية.

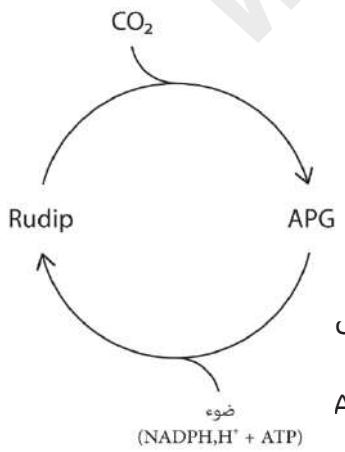
هذه المرحلة لا تشترط الضوء بشكل مباشر، ويمكن أن تحدث في الظلام إذا توفرت شروطها تجريبيا.

1- الجزيئات الأيضية المتشكلة

بعد تثبيت الـ CO_2، فإنه يُدمج في خمس (05) جزيئات أيضية وسيطة (مركبات عضوية) على الترتيب التالي:

- المركب الأول: APG حمض فوسفو غليسريك (مركب ثلاثي الكربون C_3).
- المركب الثاني: ADPG حمض ثنائي فوسفو غليسريك (مركب ثلاثي الكربون C_3).
- المركب الثالث: PGal فوسفو غليسر ألدهيد (سكر ثلاثي الكربون TP).
- المركب الرابع: HP هكسوز (سكر سداسي HP).
- المركب الخامس: RuDip ريبولوز ثنائي الفوسفات (مركب خماسي الكربون C_5).

نكشف عن ظهور هذه المركبات بتقنية التسجيل اللوني (الكروماتوغرافيا).



2- العلاقة بين الـAPG والـ RuDP

- في وجود الضوء والـ CO_2: يتجدد كل من الـ APG والـ RuDP باستمرار، أي يتحولان إلى بعضهما بشكل حلقي وهو ما يسمى بالثبات الديناميكي.
- في وجود الـCO_2 فقط: يتشكل الـ APG انطلاقا من الـ RuDP، فيتراكم الـ APG ويستهلك الـ RuDP.
- في وجود الضوء فقط: يحدث العكس، يتجدد الـRuDP انطلاقامن الـ APG، فيتراكم الـRuDP ويستهلك الـAPG.

3- آلية المرحلة الكيموحيوية

المخطط التالي يوضح أهم تفاعلات المرحلة الكيموحيوية:

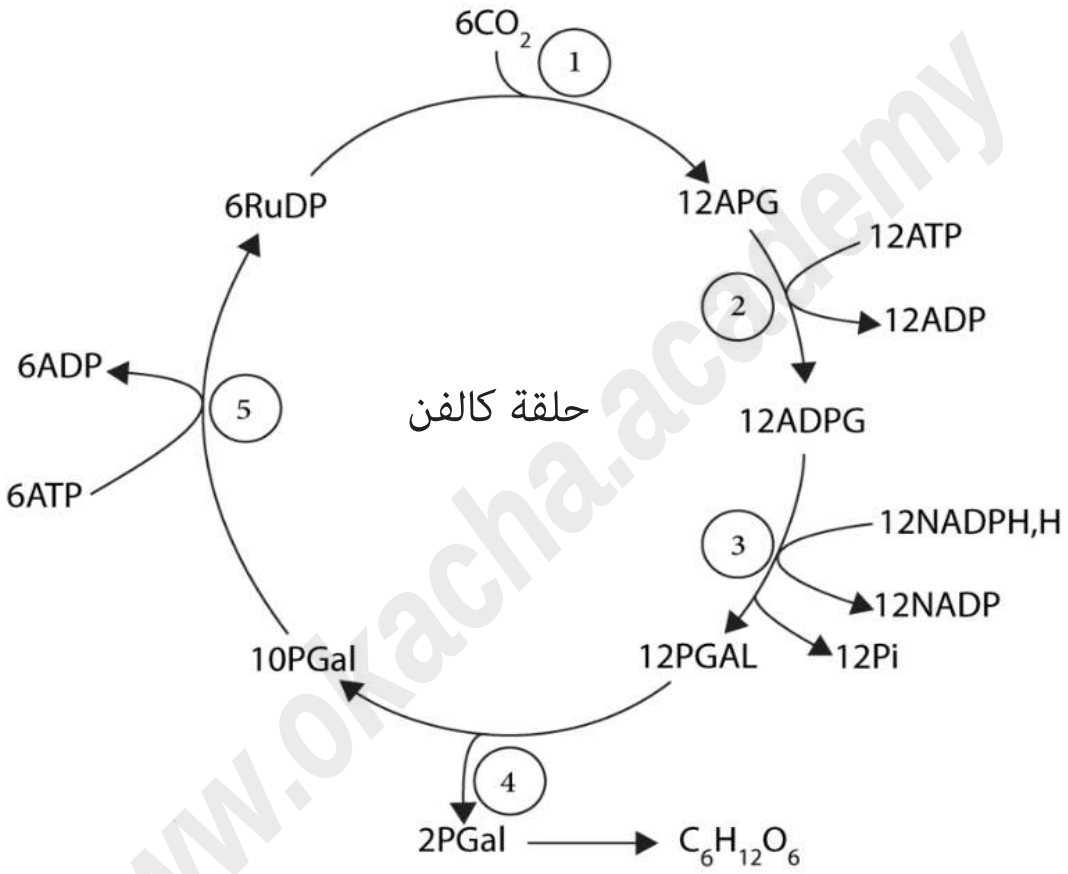
1- تثبيت الـ CO_2: بواسطة الإنزيم Rubisco، يتثبت الـ CO_2 على الـ RudiP ويتشكل مركب سداسي الكربون غير مستقر ينشطر إلى جزيئتين من الـ APG.

2- فسفرة الـ APG: فسفرة الـ APG إلى ADPG مع إماهة ATP.

3- إرجاع الـ ADPG: إرجاع الـ ADPG إلى PGal مع أكسدة $NADPH.H^+$.

4- تركيب الغلوكوز: يستخدم جزء من الـ PGal في تركيب الغلوكوز $C_6H_{12}O_6$.

5- تجديد الـRudiP: يستخدم جزء آخر من الـ PGal في تجديد الـ RudiP.



مخطط يوضح تفاعلات المرحلة الكيموحيوية

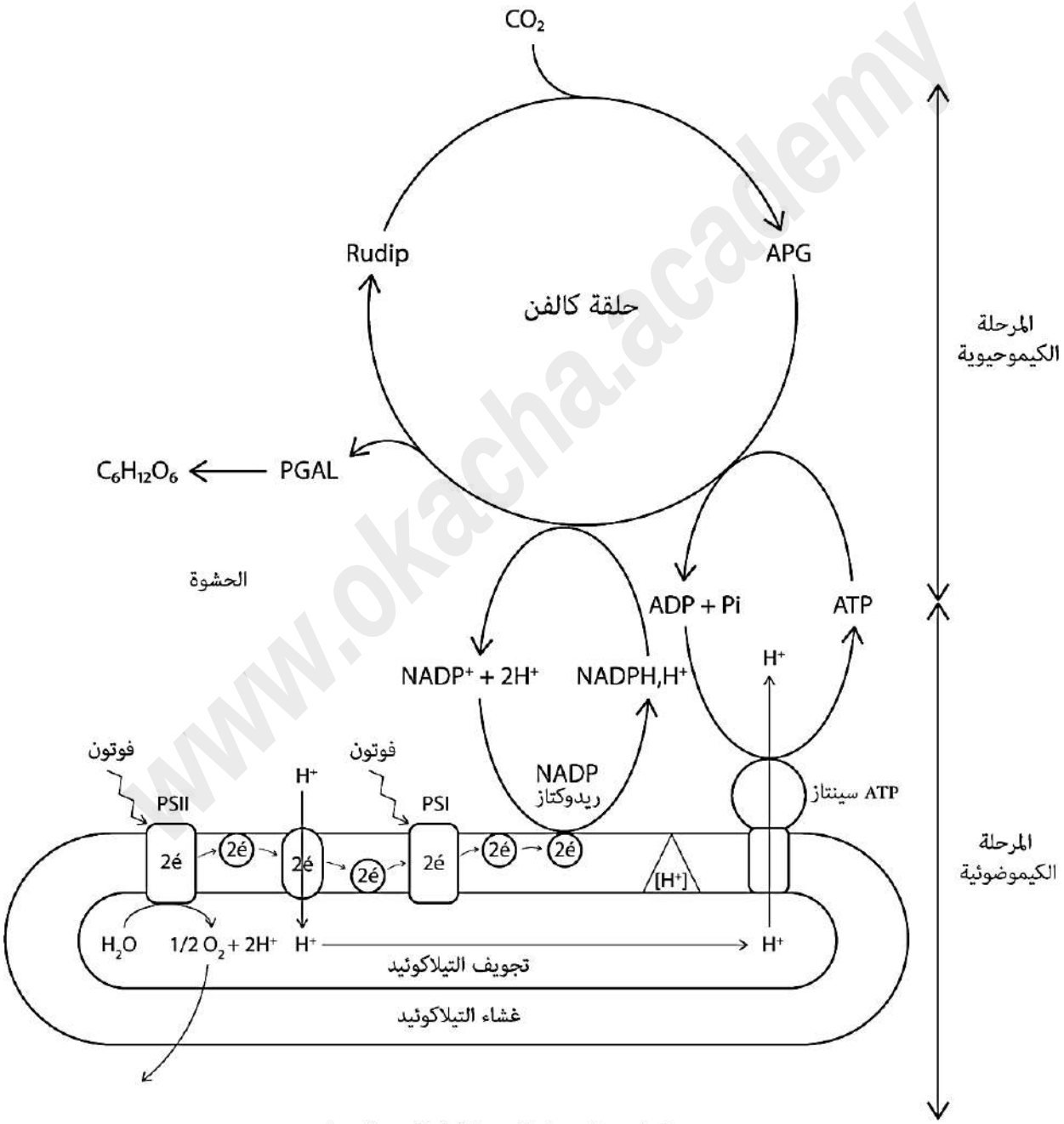
www.okacha.academy

مجلة المجتهد

07. العلاقة بين مرحلتي التركيب الضوئي

مرحلتي التركيب الضوئي مرتبطتين وتحدثان بشكل متواز:

- المرحلة الكيموضوئية تُنتج العناصر الضرورية لحدوث المرحلة الكيموحيوية: ATP و $NADPH,H^+$.
- المرحلة الكيموحيوية تجدد العناصر اللازمة لحدوث المرحلة الكيموحيوية: ADP + Pi و $NADP^+$.



رسم تخطيطي يمثل مراحل عملية التركيب الضوئي

www.okacha.academy

مجلة المجتهد

08. حصيلة التركيب الضوئي

حصيلة المرحلة الكيموضوئية

الأكسدة الضوئية للـ H_2O :

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4\,é$$

إرجاع مستقبل الإلكترونات :

$$2NADP^+ + 4H^+ + 4é \rightarrow 2NADPH,H^+$$

تركيب الـ ATP :

$$nADP + nPi \rightarrow nATP$$

المعادلة الإجمالية

بجمع المعادلات الثلاث السابقة نحصل على المعادلة الإجمالية للمرحلة الكيموضوئية، ونضرب الطرفين في 6 للجمع مع معادلة المرحلة الكيموحيوية (للموازنة) :

$$12H_2O + 12NADP^+ + 18\,ADP + 18Pi \rightarrow 6O_2 + 12NADPH,H^+ + 18ATP$$

حصيلة المرحلة الكيموحيوية

$$6CO_2 + 12NADPH,H^+ + 18ATP \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 12NADP^+ + 18ADP + Pi + 6H_2O$$

الحصيلة الإجمالية

بجمع معادلة المرحلة الكيموضوئية مع معادلة المرحلة الكيموحيوية نتحصل على معادلة التركيب الضوئي:

$$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

مجلة المجتهد

09. الخلاصة

التركيب الضوئي ظاهرة حيوية تحدث في الصانعة الخضراء، تبدأ بامتصاص اليخضور للضوء وتنتهي بتركيب الغلوكوز، ولفهمها تقسم إلى مرحلتين:

مرحلة كيموضوئية

مقرها غشاء التيلاكويد، يتم فيها امتصاص الطاقة الضوئية لإنتاج ATP و$NADPH,H^+$.

مرحلة كيموحيوية

مقرها الحشوة، يتم فيها دمج الـ CO_2 في الجزيئات العضوية الموجودة في الحشوة لتركيب السكريات، وذلك باستعمال نواتج المرحلة السابقة.

إذن، التركيب الضوئي هو تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية.

العبارة تركيب ضوئي هي اختصار للجملة «تركيب المادة العضوية في وجود الضوء»

www.okacha.academy