

الاستاذة جوهري

المجال التعليمي(2): تحويل الطاقة على المستوى ما فوق البنية الخلوية

الوحدة التعليمية(1): آليات تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية كامنة

الوحدة التعليمية(1): آليات تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية كامنة

تقوم النباتات الخضراء بتركيب المادة العضوية بظاهرة التركيب الضوئي، حيث تتم مجموع تفاعلاتها الكيميائية داخل الصانعة الخضراء وفق المعادلة الاحتمالية التالية:



1. **حدّد** شروط عملية التركيب الضوئي.
2. **حدّد** شكل الطاقة المحولة و الناتجة في عملية التركيب الضوئي.

الاجابة:

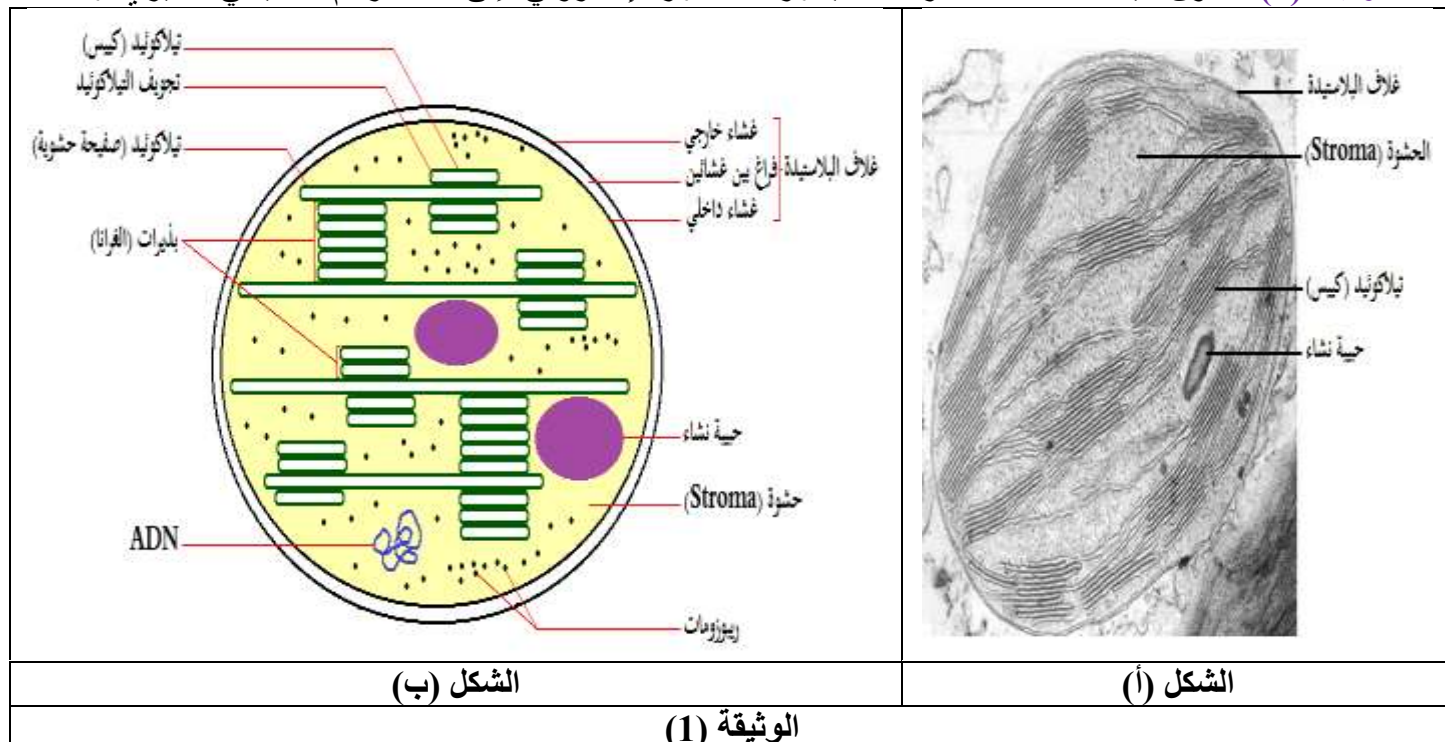
1. شروط عملية التركيب الضوئي هي: الضوء، اليخضور، غاز CO_2 والماء H_2O .
2. شكل الطاقة المحولة هو طاقة ضوئية، وشكل الطاقة الناتجة هو طاقة كيميائية كامنة.

التقصي:

1. مقر التركيب الضوئي، طبيعة تفاعلاته ومراحله:

لتحديد مقر التركيب الضوئي، طبيعة تفاعلاته ومراحله، نُقترح عليك الدراسات التالية:

تمثل الوثيقة (1) ما فوق بنية الصناعة الخضراء كما يظهرها المجهر الإلكتروني، إلى جانب رسم تخطيطي تفسيري لها.



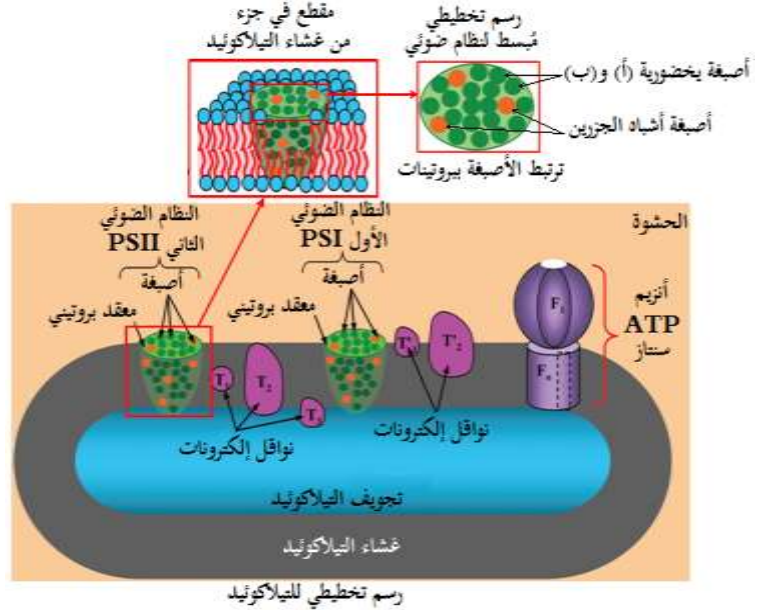
تمثل الوثيقة (2) جدول لمعطيات حول التركيب الكيموحيوى لكل من الأغشية التيلاكويديية والحشوة للصانعة الخضراء.

<p>الأغشية التيلاكويدية</p> <p>- نظامان ضوئيان PSI وPSII بهما أصبغة التركيب الضوئي (أصبغة يخضورية (أ) و(ب)،</p> <p>أشباه الجزرين).</p>	<p>الحشوة</p> <p>- مواد أيضية وسطية لتركيب المواد العضوية.</p> <p>- مرافقات إنزيمية (نواقل بروتونات: NADP^+ و NADPH).</p> <p>- ATP، ADP و P_i.</p>
---	---

- أنزيمات متنوعة (كأنزيم ريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز (Rubisco)).

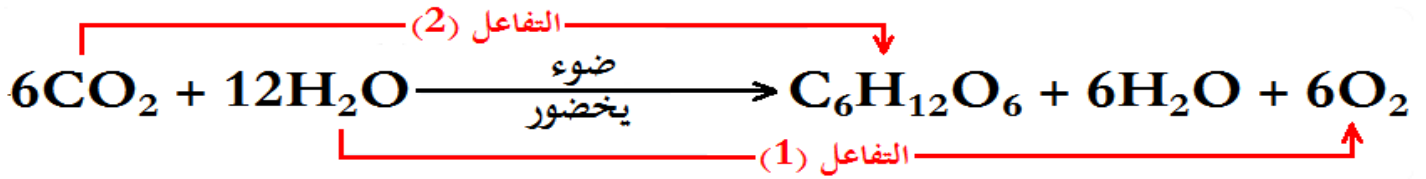
- نواقل إلكترونات.
- أنزيم ATP سنتاز (الكربية المذبذبة).

ملاحظة: يكون تموضع مكونات غشاء التيلاكويد كما هو موضح في الرسم التخطيطي التالي.



الوثيقة (2)

إن تفاعلات الأكسدة والإرجاع هي تفاعلات كيميائية يحدث خلالها إنتقال الإلكترونات بين مُعطٍ للإلكترونات (مُرجع) ومُستقبلٍ للإلكترونات (مُؤكسد)، تمثل **الوثيقة (3)** المعادلة الكيميائية الإجمالية لعملية التركيب الضوئي.



الوثيقة (3)

تمثل **الوثيقة (4)** نتائج حضن صانعات خضراء في وجود وفي غياب الـ CO_2 في الضوء وفي الظلام.

الشروط التجريبية	الحالة (3)	الحالة (2)	الحالة (1)
نتائج التجريبية	إنتقال الـ O_2 وتثبيت الـ CO_2 وتثبيت المادة العضوية بصورة مستمرة	تثبيت الـ CO_2 وتركيب المادة العضوية لمدة زمنية قصيرة	إنتقال الـ O_2 لمدة زمنية قصيرة
الشروط التجريبية	ضوء	ظلام	ضوء في غياب الـ CO_2
الشروط التجريبية	ضوء	ظلام	ضوء
الشروط التجريبية	ضوء	ظلام	ضوء
الشروط التجريبية	ضوء	ظلام	ضوء

الوثيقة (4)

التعليمة:

- بين مقر التركيب الضوئي، طبيعة تفاعلاته ومراحله وذلك بإستغلالك للوثائق (1)، (2)، (3) و(4).

الإجابة:

تبيان مقر التركيب الضوئي، طبيعة تفاعلاته ومراحله:

إستغلال الوثيقة (1): تمثل الوثيقة (1) ما فوق بنية الصانعة الخضراء كما يظهرها المجهر الإلكتروني، إلى جانب رسم تخطيطي تفسيري لها، حيث نلاحظ:

أن الصانعة الخضراء (أو البلاستيدة) عضيّة خلوية يُحيط بها **غلاف بلاستيدي** مُكوّن من **غشائين (خارجي وداخلي)** بينهما **فراغ (فضوة)**، يُحدد الغشاء الداخلي **المادة الأساسية (الحشوة أو ستروما Stroma)** التي تحتوي على تراكيب غشائية داخلية تُشكل أكياس مُسطحة تُعرف **بالتيلاكوييد** والتي تُميّز فيها **(الكبيسات والصفائح الحشوية)**، تصطف الكبيسات فوق بعضها البعض مُكوّنة تراكيب تُدعى **بالبذيرات (أو الغرانا)**، تتكون التيلاكوييدات من **غشاء التيلاكوييد** الذي يحيط بتجويّف يدعى **بتجويّف التيلاكوييد**، كما تحتوي الصانعات الخضراء على **ADN**، **ريبوزومات**، **حبيبات نشاء**.

الإستنتاج:

للصانعة الخضراء **بنية حجيرية منظمة** (بها 3 تجاويف محاطة بأغشية) كالآتي:

تراكيب غشائية داخلية تُشكل أكياس مُسطحة: **التيلاكوييد محاطة بغشاء التيلاكوييد**.

الحشوة مُحددة بغشاء بلاستيدي داخلي

فضوة (فراغ) بين الغشائين ماط بغشائين داخلي و خارجي

إستغلال الوثيقة (2): تمثل الوثيقة (2) جدول لمعطيات حول التركيب الكيموحيوي لكل من الأغشية التيلاكوييدية والحشوة للصانعة الخضراء، حيث نلاحظ:

أن **الأغشية التيلاكوييدية** تحوي نظامين ضوئيين **PSI و PSII** بهما أصبغة التركيب الضوئي (أصبغة يخضورية، أصبغة أشباه الجزرين)، نواقل إلكترونات وأنزيم **ATP سنتاز** (الكرية المذبذبة).

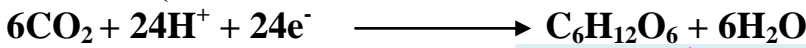
أن الحشوة تحوي مواد أيضية وسطية لتركيب المواد العضوية، نواقل البروتونات (مرافقات أنزيمية)، **ATP** ، **ADP** و **Pi** وأنزيمات متنوعة.

الإستنتاج: تتميز الصانعة الخضراء بتركيب كيموحيوي مُتباين ما يؤكد الدور المختلف لكل من أغشية التيلاكوييد والحشوة.

إستغلال الوثيقة (3): تمثل الوثيقة (3) المعادلة الكيميائية الإجمالية لعملية التركيب الضوئي، حيث نلاحظ:

أن التفاعل (1) هو تفاعل **أكسدة** (أكسدة الماء أدى إلى إطلاق الـ O_2).

وأن التفاعل (2) فهو تفاعل **إرجاع** (إرجاع الـ CO_2 بواسطة هيدروجين الماء أدى إلى تشكل مادة عضوية).



الإستنتاج: طبيعة تفاعلات ظاهرة التركيب الضوئي هي **تفاعلات أكسدة وإرجاع**.

إستغلال الوثيقة (4): تمثل الوثيقة (4) نتائج حضن صانعات خضراء في وجود وفي غياب الـ CO_2 في الضوء وفي الظلام، حيث نلاحظ:

في الحالة 1 (عند تعريض معلق من الصانعات الخضراء للضوء وفي غياب الـ CO_2): إطلاق الـ O_2 لمدة زمنية قصيرة.

في الحالة 2 (عند وضع معلق من الصانعات الخضراء في الظلام وفي وجود الـ CO_2): تثبيت الـ CO_2 وتركيب المادة العضوية لمدة زمنية قصيرة.

في الحالة 3 (عند تعريض معلق من الصانعات الخضراء للضوء وفي وجود الـ CO_2): إطلاق الـ O_2 وتثبيت الـ CO_2 وتركيب المادة العضوية بصورة مستمرة.

الإستنتاج: يتم التركيب الضوئي في مرحلتين:

مرحلة كيموضونية تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها طرح الـ O_2

مرحلة كيموحيوية لا تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها إرجاع (تثبيت) الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية.

الربط:

يتم التركيب الضوئي على مستوى **الصانعات الخضراء** التي لها **بنية حجيرية منظمة**.

طبيعة تفاعلاته **أكسدة وإرجاع**.

يتم التركيب الضوئي في مرحلتين:

- **مرحلة كيموضونية** تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها طرح الـ O_2 ، تحدث على مستوى التيلاكوييد.

- **مرحلة كيموحيوية** لا تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها إرجاع (تثبيت) الـ CO_2 وتركيب جزيئات

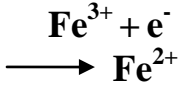
عضوية، تحدث على مستوى الحشوة.

ملاحظة: إن تفاعل الأكسدة يحدث على مستوى غشاء التيلاكوييد، بينما تفاعل الإرجاع فيحدث على مستوى الحشوة.

يتم التركيب الضوئي في مرحلتين تحتاج إلى ، يتم خلالها طرح الـ ، تحدث على مستوى و مرحلة

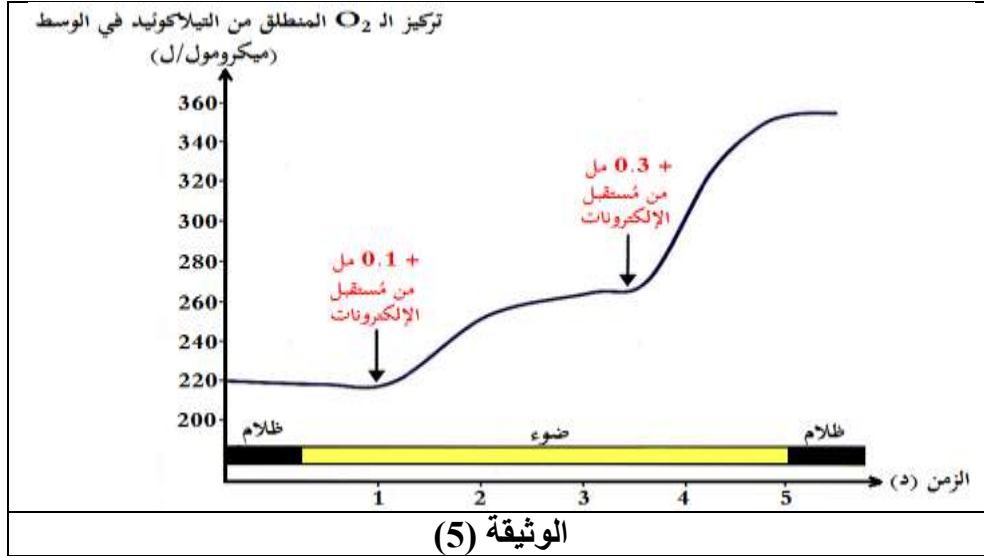
تساؤل :

تجربة هيل (Hill): تم تحضير مُعلق من التيلاكويديات المعزولة في شروط تجريبية مختلفة (ضوء، ظلام)، حيث أضيف للوسط كاشف Hill = فيروسيانور البوتاسيوم $K_3Fe(CN)_6$ بتركيز (0.1 مل ثم 0.3 مل) الذي يقوم بدور **مُستقبل إصطناعي للإلكترونات** بدل المستقبل الطبيعي الموجود داخل الصانعة الخضراء في فترة الإضاءة. يكون لون الكاشف **بنّي مُحمر في الحالة المؤكسدة (Fe^{3+}) وأخضر في الحالة المُرجعة (Fe^{2+})**.



لُوحظ بعد حقن الكاشف تغير لون محلول الوسط من البني المحمر إلى الأخضر حسب التفاعل التالي:

الشروط التجريبية ونتائجها موضحة في الوثيقة (5).



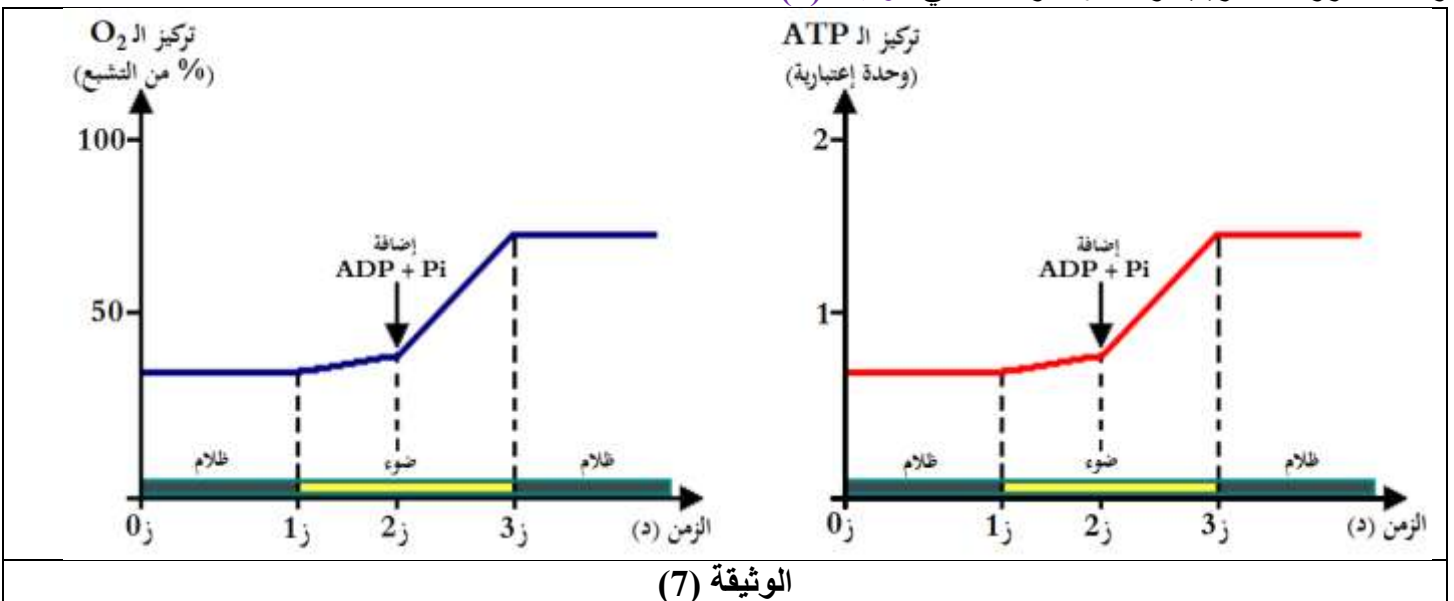
الوثيقة (5)

يُلخّص جدول الوثيقة (6) شروط ونتائج تجريبية لوسطين مختلفين.

النتائج التجريبية	الشروط التجريبية	رقم الوسط
O_2 المنطلق غير مُشع	تزويد طحلب أخضر معرض للضوء بـ CO_2 أو كسجينه O^{18} مشع + H_2O	1
O_2 المنطلق مُشع	تزويد طحلب أخضر معرض للضوء بـ CO_2 عادي + H_2O أو كسجينه O^{18} مشع	2

الوثيقة (6)

تم قياس تركيز كل من O_2 و ATP في معلق من الصانعات الخضراء في شروط تجريبية مناسبة قبل وبعد حقن الـ ADP و P_i ، الشروط التجريبية ونتائجها موضحة في الوثيقة (7).

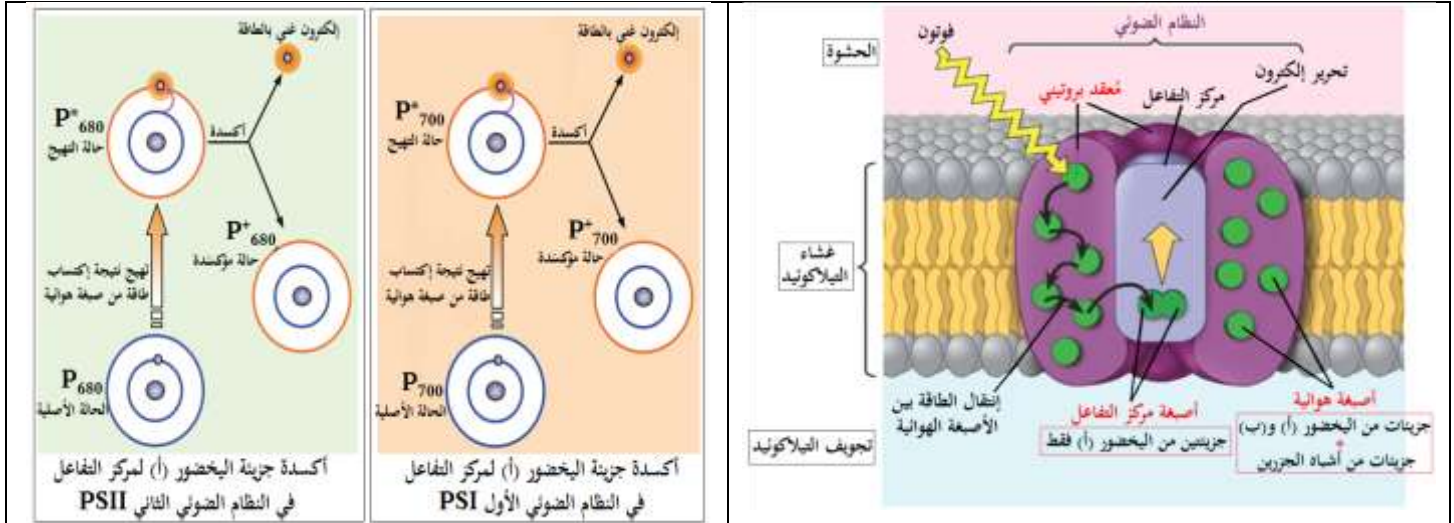


الوثيقة (7)

لتحديد آلية المرحلة الكيموضوئية، تفاعلاته الأساسية ونواتجها، تُقترح عليك الدراسات التالية:

يمثل الشكل (أ) من الوثيقة (8) رسماً تخطيطياً لبنية النظام الضوئي (Photosystème=PS)، حيث يوجد نوعين من الأنظمة الضوئية PSI و PSII.

في كل نظام ضوئي PSI و PSII يتم إقتناص الفوتونات الضوئية (الطاقة الضوئية) من طرف الأصبغة الهوائية (لواقط الفوتونات) التي تسمح لجزيئة اليخضور لهذه الأصبغة بإكتساب طاقة التي تنتقل من صبغة هوائية إلى أخرى (إنتقال طاقة دون إلكترون) حتى تصل إلى جزيئات اليخضور لمركز التفاعل (P_{700} في النظام الضوئي الأول PSI) و (P_{680} في النظام الضوئي الثاني PSII)، يمثل الشكل (ب) من نفس الوثيقة نتائج تأثير الفوتونات المقتنصة على جزيئة اليخضور (أ) لمركز التفاعل (أكسدة اليخضور).

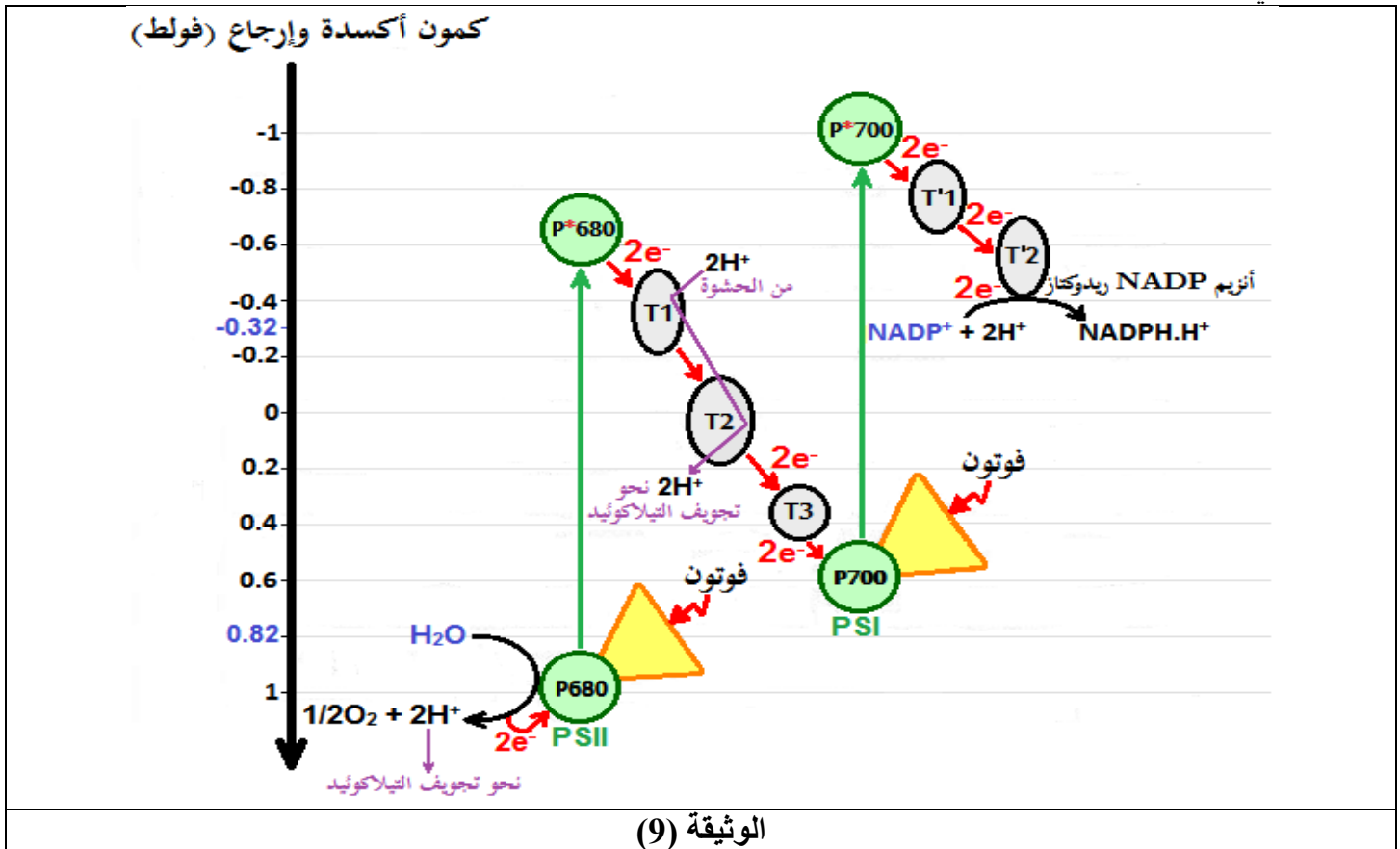


الشكل (ب)

الشكل (أ)

الوثيقة (8)

تمثل الوثيقة (9) مخطط إنتقال الإلكترونات عبر نواقل السلسلة التركيبية الضوئية وفق كمونات الأكسدة والإرجاع ودور اليخضور في ذلك.



التعليمات:

1. يبين شروط عمل التيلاكويد وذلك باستغلالك للوثائق (5)، (6) و (7).
2. اشرح آلية المرحلة الكيموضوئية مُبرِّراً التفاعلات المميزة لها ونواتجها وذلك باستغلالك للوثيقتين (8) و (9).

الإجابة:

1. تبين شروط عمل التيلاكويد:

إستغلال الوثيقة (5): تمثل الوثيقة (5) منحى تغيرات تركيز الـ O_2 المنطلق من التيلاكويد في الوسط بدلالة الزمن في

شروط تجريبية مختلفة، حيث نلاحظ:

- قبل إضافة مستقبل الإلكترونات الاصطناعي، في الظلام وفي وجود الضوء: ثبات تركيز الـ O_2 عند القيمة المنخفضة.
- بعد إضافة 0.1 مل من مستقبل الإلكترونات الاصطناعي (في حالة مؤكسدة) وفي وجود الضوء: تزايد تركيز الـ O_2 ثم ثباته.
- بعد إضافة 0.3 مل من مستقبل الإلكترونات الاصطناعي (في حالة مؤكسدة):
 - في وجود الضوء: تزايد تركيز الـ O_2 ثم ثباته.
 - في الظلام: ثبات تركيز الـ O_2 .

الإستنتاج: إطلاق الـ O_2 من التيلاكوييد يتطلب ضوء ومستقبل إلكترونات مؤكسد (في حالة مؤكسدة).
إستغلال الوثيقة (6): تمثل الوثيقة (6) شروط ونتائج تجريبية لوسطين مختلفين، حيث نلاحظ:

- في الوسط (1):** عند تزويد طحلب أخضر معرض للضوء بـ CO_2 أو كسجينه O^{18} مشع و H_2O عادي كان الـ O_2 المنطلق غير مشع.
- في الوسط (2):** عند تزويد طحلب أخضر معرض للضوء بـ CO_2 عادي و H_2O أو كسجينه O^{18} مشع كان الـ O_2 المنطلق مشع.

الإستنتاج: مصدر الـ O_2 المنطلق خلال عملية التركيب الضوئي هو الماء (H_2O).

إستغلال الوثيقة (7): تمثل الوثيقة (7) منحنيي تغيرات تركيز كل من الـ O_2 و ATP في شروط تجريبية مناسبة قبل وبعد حقن الـ ADP و Pi، حيث نلاحظ:

- قبل حقن الـ ADP و Pi:**
 - في الظلام: ثبات تركيز كل من الـ O_2 و ATP عند القيم المنخفضة.
 - في وجود الضوء: تزايد طفيف وبطيء في تركيز كل من الـ O_2 و ATP.
- بعد حقن الـ ADP و Pi:**
 - في وجود الضوء: تزايد كبير وسريع في تركيز كل من الـ O_2 و ATP.
 - في الظلام: ثبات تركيز كل من الـ O_2 و ATP.

الإستنتاج: إطلاق الـ O_2 على مستوى التيلاكوييد يرافقه تركيب الـ ATP ويتطلب ذلك ضوء، Pi و ADP.

الربط: تتمثل شروط عمل التيلاكوييد في: الضوء، مستقبل إلكترونات مؤكسد، الماء (H_2O)، Pi و ADP.

2. شرح آلية المرحلة الكيموضوئية مع إبراز التفاعلات المميزة لها ونواتجها:
إستغلال الوثيقة (8):

يمثل الشكل (أ) رسم تخطيطي لبنية النظام الضوئي، حيث نلاحظ:

- يتواجد النظام الضوئي ضمن غشاء التيلاكوييد.
- يوجد نوعان من الأنظمة الضوئية هما: النظام الضوئي الأول (PSI) والنظام الضوئي الثاني (PSII).
- أن النظام الضوئي عبارة عن معقد بروتيني به أصبغة هوائية وأصبغة مركز التفاعل، حيث:
 - الأصبغة الهوائية (لواقط الفوتونات) تتركب من جزيئات اليخضور (أ) و (ب)، ومن جزيئات أشباه الجزرين.
 - أصبغة مركز التفاعل تتركب من جزيئين من اليخضور (أ) فقط، يُرمز لكل جزيئة منهما بالرمز P_{700} في الـ PSI وبالرمز P_{680} في الـ PSII.

الإستنتاج: يتكون النظام الضوئي من معقد بروتيني به أصبغة هوائية وأصبغة مركز تفاعل.

يمثل الشكل (ب) نتائج تأثير الفوتونات المقنتصة على جزيئة اليخضور (أ) لمركز التفاعل (أكسدة اليخضور)، حيث نلاحظ:
عند وصول الطاقة الضوئية الممتصة (الفوتونات المقنتصة) من طرف الأصبغة الهوائية إلى جزيئة اليخضور (أ) لمركز التفاعل (P_{700} في الـ PSI)،

(P_{680} في الـ PSII) ثم تتأكسد مُتخلية عن إلكترون غني بالطاقة لتصبح في حالة مؤكسدة.

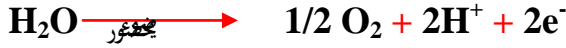


الإستنتاج: تتأكسد جزيئة اليخضور لمركز التفاعل تحت تأثير الفوتونات المقنتصة، مُتخلية عن إلكترون.

إستغلال الوثيقة (9): تمثل الوثيقة (9) مخطط إنتقال الإلكترونات عبر نواقل السلسلة التركيبية الضوئية وفق كمونات الأكسدة والإرجاع ودور اليخضور في ذلك، حيث نلاحظ:

- يؤدي سقوط الفوتونات الضوئية على الأنظمة الضوئية PSI و PSII (التنبيه الضوئي لـ PSI و PSII) إلى تهيج مراكز تفاعلها (جزيئين من اليخضور P_{700} في الـ PSI وجزيئين من اليخضور P_{680} في الـ PSII) وإنخفاض كمون أكسدتها الإرجاعية فتتأكسد مُتخلية عن زوج من الإلكترونات الغنية بالطاقة.

تسترجع جزيئة اليخضور لمركز التفاعل في الـ PSII المؤكسدة حالتها المرجعة وبالتالي قابلية التنبيه إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء (التحلل الضوئي للماء) حسب التفاعل التالي:



تتراكم البروتونات (H^+) داخل تجويف الثيلاكويد وينطلق الـ O_2 .

تسترجع جزيئة اليخضور لمركز التفاعل في الـ PSI المؤكسدة حالتها المرجعة وبالتالي قابلية التنبيه إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن أكسدة مركز التفاعل

لـ PSII والتي تنتقل إليها عبر سلسلة من نواقل الإلكترونات (T1 ، T2 و T3) مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع (الإتجاه الطبيعي لانتقال الإلكترونات).

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة مركز التفاعل لـ PSI عبر سلسلة من نواقل الإلكترونات (T1 و T2) مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع وصولاً للمستقبل الأخير للإلكترونات الموجود في الحشوة يُدعى بـ NADP^+ (حالة مؤكسدة) الذي يُرجع إلى NADPH.H^+ (حالة مُرجعة) بواسطة أنزيم NADP ريدوكتاز حسب التفاعل التالي:

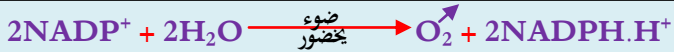
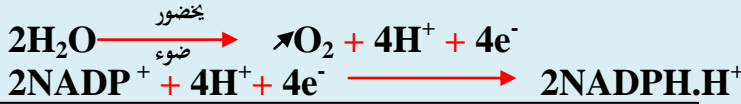


الإستنتاج:

تسترجع جزيئة اليخضور المؤكسدة حالتها المرجعة، وبالتالي قابلية التنبيه إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء.

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن مركز التفاعل عبر سلسلة من النواقل مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع.

إن المستقبل الأخير للإلكترونات الناتجة يدعى النيكوتين أميد أدنين ثنائي النيكليوتيد فوسفات NADP^+ الذي يُرجع بواسطة أنزيم NADP ريدوكتاز حسب التفاعل العام:



الربط:

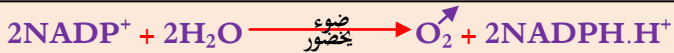
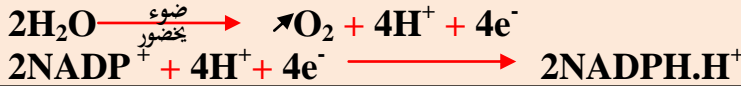
آلية المرحلة الكيموضوئية، التفاعلات المميزة لها ونواتجها:

تتأكسد جزيئة اليخضور لمركز التفاعل تحت تأثير الفوتونات المقتنصة، مُتخلية عن إلكترون.

تسترجع جزيئة اليخضور المؤكسدة حالتها المرجعة، وبالتالي قابلية التنبيه إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء.

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن مركز التفاعل عبر سلسلة من النواقل مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع.

إن المستقبل الأخير للإلكترونات الناتجة يدعى النيكوتين أميد أدنين ثنائي النيكليوتيد فوسفات NADP^+ الذي يُرجع بواسطة أنزيم NADP ريدوكتاز حسب التفاعل العام:



ملاحظة:

الناقل T1 ينقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الـ PSII مع البروتونات (H^+) التي يأخذها من الحشوة، بينما

الناقل T2 ينقل فقط الإلكترونات التي يأخذها من الناقل T1 ويحرر (يضخ) البروتونات في تجويف الثيلاكويد.

أثناء إنتقال الإلكترونات عبر السلسلة التركيبية الضوئية تتحرر طاقة تسمح بانتقال (ضخ) البروتونات (H^+) من

الحشوة الأقل تركيزاً عبر الناقل T2 إلى تجويف الثيلاكويد الأعلى تركيزاً بالنقل الفعال.

يمكن أن نرمز لـ NADP^+ بالرمز R أو T ، وعليه NADPH.H^+ يُرمز له بـ RH_2 أو TH_2 .

يُصحب التحلل الضوئي للماء في تجويف الثيلاكويد بتحرير وتراكمها داخل التجويف، إضافة للبروتونات (H^+)

التي تُنقل (تُضخ) من عبر الناقل T2 إلى أثناء إنتقال الإلكترونات عبر

(السلسلة نواقل الأكسدة والإرجاع) الموجودة على مستوى غشاء الثيلاكويد، بذلك تركيز البروتونات (H^+) داخل

الثيلاكويد محدثاً في تركيز البروتونات (H^+) بين الحشوة وتجويف الثيلاكويد (إنخفاض pH داخل

التجويف)،

صغ المشكل العلمي المطروح بعد ملئ الفراغات

المشكل :

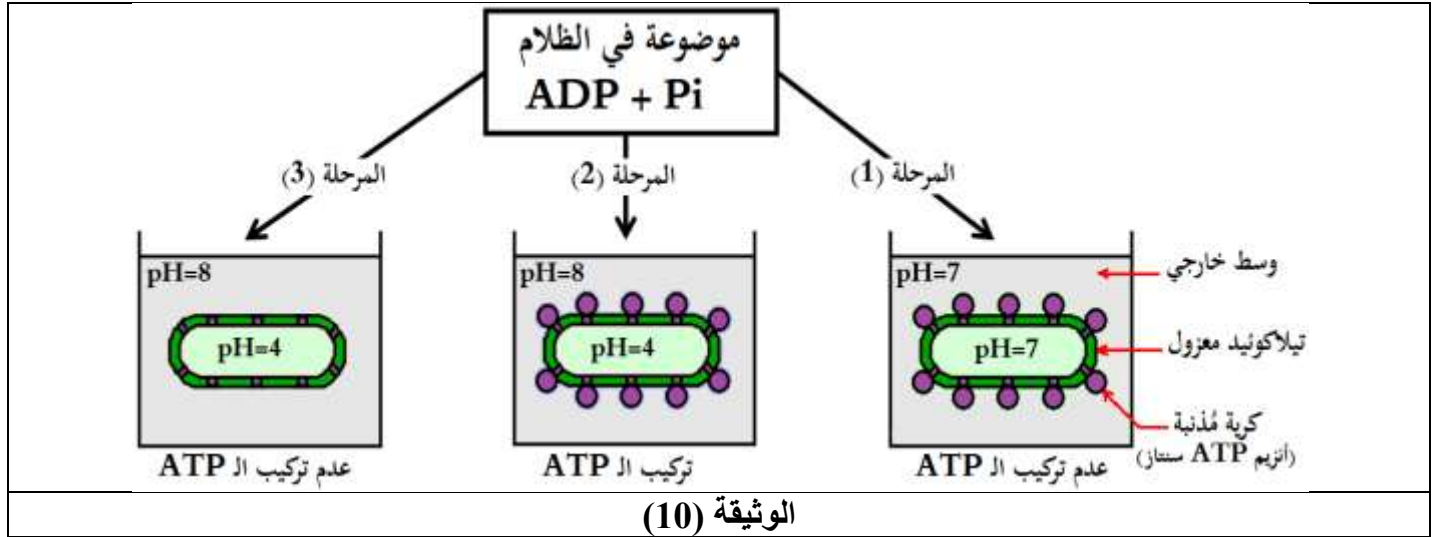
لمعرفة مصير البروتونات (H^+) الناتجة عن التحلل الضوئي للماء والتي تُنقل من الحشوة إلى تجويف الثيلاكويد، تُقترح عليك

الدراسة التالية:

غُزلت تيلاكويدات الطرد المركزي بعد تجزئة الصانعة الخضراء بتعريضها لصدمة حلولية، مراحل التجربة ونتائجها موضحة في الوثيقة (10).

ملاحظة: إن تركيز البروتونات (H^+) يتناسب عكسًا مع الـ pH، حيث:

- عندما يكون تركيز البروتونات (H^+) في الوسط مرتفع يدل على أن الـ pH الوسط منخفض (وسط حامضي).
- عندما يكون تركيز البروتونات (H^+) في الوسط منخفض يدل على أن الـ pH الوسط مرتفع (وسط قاعدي).



التعليمات:

- استخرج شروط وآلية تركيب الـ ATP على مستوى التيلاكويد (الكيس) بإستغلالك للوثيقة (10).
- إقترح نموذجًا تفسيريًا لآلية المرحلة الكيموضونية إنطلاقًا مما توصلت إليه من هذه الدراسات.

الإجابة

1. تحديد شروط وآلية تركيب الـ ATP على مستوى التيلاكويد (الكيس):

إستغلال الوثيقة (10): تمثل الوثيقة (10) مراحل تجريبية ونتائجها، حيث نلاحظ:

- في المرحلة 1:** عند تساوي pH تجويف التيلاكويد والوسط الخارجي لا يتم تركيب الـ ATP.
- في المرحلة 2:** عندما يكون pH تجويف التيلاكويد حامضيًا و pH الوسط الخارجي قاعديًا يتم تركيب الـ ATP.
- في المرحلة 3:** عندما يكون pH تجويف التيلاكويد حامضيًا و pH الوسط الخارجي قاعديًا مع تخريب الكريات المذبذبة لا يتم تركيب الـ ATP.

الإستنتاج:

يتطلب تركيب الـ ATP على مستوى التيلاكويد:

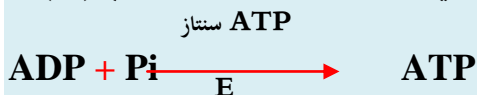
- وجود تدرج في تركيز البروتونات على جانبي غشاء التيلاكويد، حيث تجويف التيلاكويد حامضي (تركيز H^+ مرتفع) وخارجه قاعدي (تركيز H^+ منخفض).
- سلامة الكريات المذبذبة (أنزيم ATP سينتاز).

آلية تركيب الـ ATP على مستوى التيلاكويد:

- يُصاحب نقل الإلكترونات على طول سلسلة الأكسدة الإرجاعية (السلسلة التركيبية الضوئية)، تراكم البروتونات الناتجة عن أكسدة الماء، وتلك المنقولة من الحشوة باتجاه تجويف التيلاكويد.

- إن تدرج تركيز البروتونات المتولد بين تجويف التيلاكويد وحشوة الصانعة الخضراء ينتشر على شكل سيل من البروتونات الخارجة عبر الـ ATP سينتاز.

- تسمح الطاقة المتحررة من سيل البروتونات الخارجة بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي (P_i):



وإثبات أن تركيب الـ ATP من الـ ADP و Pi مرتبط بفرق تركيز H^+ على

2. إقترح نموذج تفسيري لألية المرحلة الكيموضوئية:

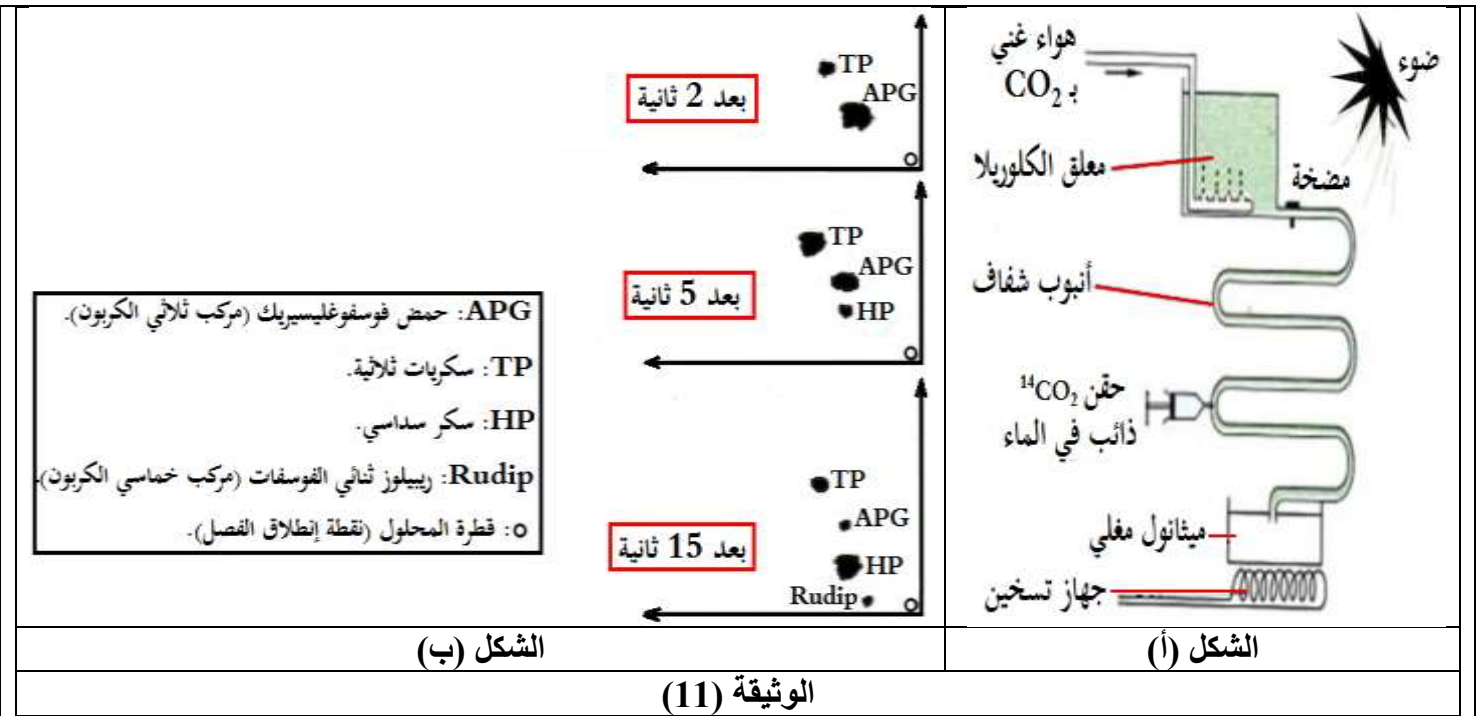


المعادلات الكيميائية لمختلف تفاعلات المرحلة الكيميائية:


$$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NADP}^+ + \text{ADP} + \text{Pi} \xrightarrow[\text{يُخضَر}]{\text{ضوء}} \text{O}_2 + 2\text{NADPH, H}^+ + \text{ATP}$$

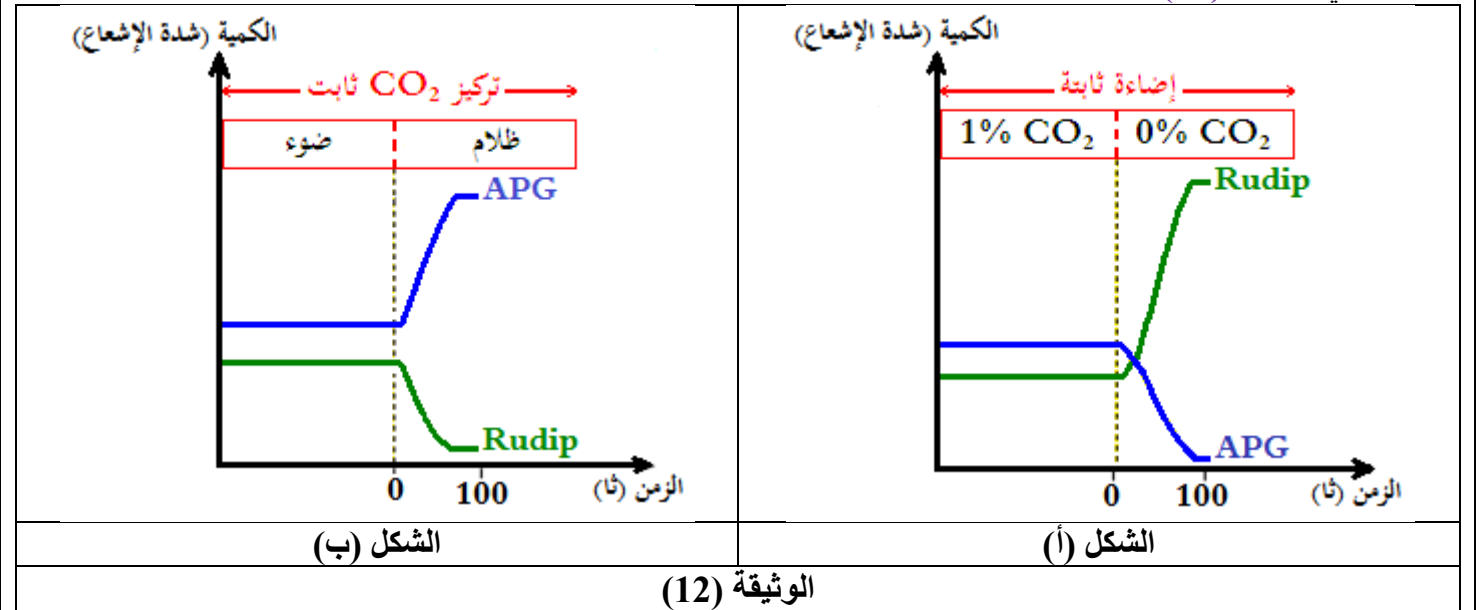
تحدث المرحلة الثانية من التركيب الضوئي (المرحلة الكيموحيوية) على مستوى حشوة الصانعة الخضراء، لا تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها إرجاع الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية، **فما هي آلية إرجاع الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية على مستوى الحشوة؟**

تجربة كالفن: وُضع طحلب أخضر وحيد الخلية (الكلوريل) في وعاء شفاف ضمن محلول معدني بـ CO_2 في شروط ثابتة من الحرارة والإضاءة كما هو موضَّح في الشكل (أ) من الوثيقة (11)، يُحقن المعلق بـ CO_2^{14} المشع على فترات زمنية متتالية ثم يُنجز الفصل عن طريق التسجيل اللوني (الكروماتوغرافي) ذو البعدين متبوعاً بالتصوير الإشعاعي الذاتي لمستخلص الطحلب، النتائج المحصَّلة عليها ممثلة في الشكل (ب) من نفس الوثيقة.



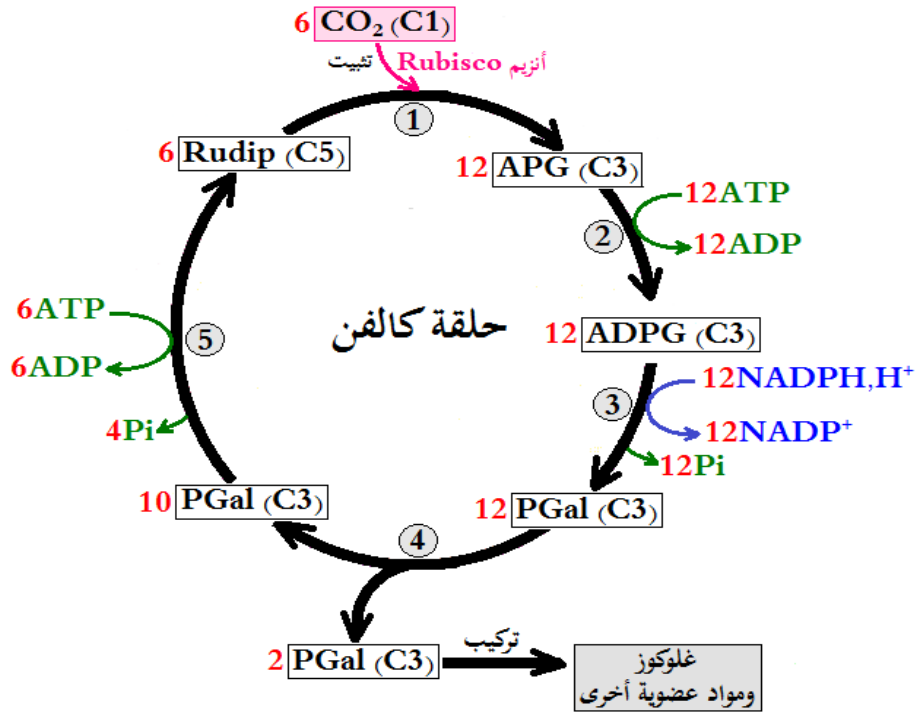
(11) الوثيقة

تم قياس كمية كل من المركبين المشعين APG و Rudip في شروط مختلفة من الإضاءة والـ CO_2 ، النتائج المحصل عليها موضحة في الوثيقة (12).



(12) الوثيقة

توصل كالفن ومساعدوه إلى تحديد تفاعلات تثبيت الـ CO_2 والمركبات الوسيطة الناتجة في شكل حلقة تُعرف بحلقة كالفن، تمثل الوثيقة (13) مخطط حلقة كالفن.



الوثيقة (13)

التعليمات:

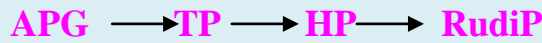
1. وضح آلية إرجاع الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية على مستوى الحشوة وذلك بإستغلالك للشكل (ب) من الوثيقة (11) وشكلي الوثيقة (12).
2. اشرح تفاعلات المرحلة الكيموحيوية وذلك بإستغلالك للوثيقة (13).

الإجابة:

1. توضيح آلية إرجاع الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية على مستوى الحشوة:

- إستغلال الشكل (ب) من الوثيقة (11): يمثل الشكل (ب) نتائج التسجيل اللوني (تجربة كافن)، حيث نلاحظ:
- بعد 2 ثانية: ظهور الإشعاع بنسبة عالية في مركب الـ APG كما يظهر بنسبة أقل في مركب الـ TP.
- بعد 5 ثواني: تناقص نسبة الإشعاع في مركب الـ APG وبالمقابل تزايد نسبته في مركب الـ TP، كما يظهر بنسبة قليلة في مركب الـ HP.
- بعد 15 ثانية: استمرار تناقص نسبة الإشعاع في مركب الـ APG كما تتناقص أيضاً في مركب الـ TP، بينما تزداد نسبة الإشعاع في مركب الـ HP مع ظهور مركب جديد هو الـ Rudip.

الإستنتاج: يُدمج الـ CO_2 في مركبات عضوية وسطيّة مختلفة والتي تظهر وفق التسلسل الزمني التالي:



إستغلال الوثيقة (12):

- يمثل الشكل (أ) منحني تطور كمية الـ APG و Rudip في وجود الضوء وفي وجود غياب الـ CO_2 ، حيث نلاحظ:
- في وجود الضوء والـ CO_2 : ثبات كمية كل من الـ APG و Rudip، يدل على توازن ديناميكي بين سرعة تركيبهما وإستهلاكهما.
- في وجود الضوء وغياب الـ CO_2 : تناقص كمية الـ APG وتزايد كمية الـ Rudip ثم ثباتها، يدل على إستهلاك الـ APG دون تركيبه وتركيب الـ Rudip دون إستهلاكه.

الإستنتاج: يتركب (يتجدد) الـ APG إنطلاقاً من تثبيت الـ CO_2 على الـ Rudip.

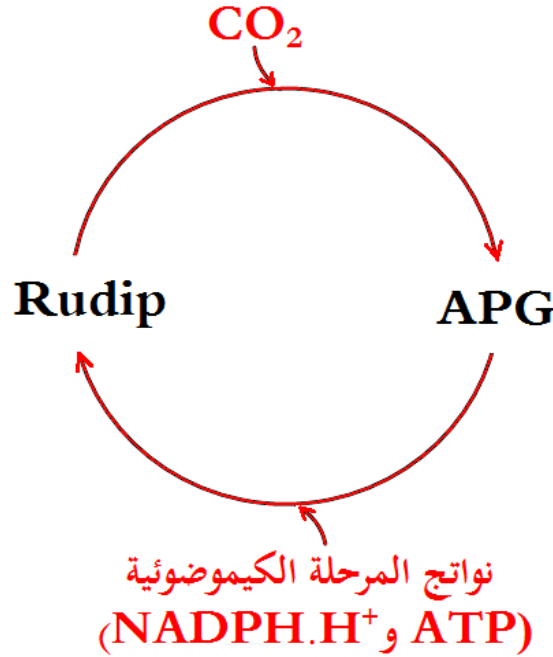
- يمثل الشكل (ب) منحني تطور كمية الـ APG و Rudip في وجود الـ CO_2 وفي وجود غياب الضوء، حيث نلاحظ:
- في وجود الـ CO_2 والضوء: ثبات كمية كل من الـ APG و Rudip، يدل على توازن ديناميكي بين سرعة تركيبهما وإستهلاكهما.
- في وجود الـ CO_2 وفي الظلام (غياب نواتج المرحلة الكيموضوئية): تناقص كمية الـ Rudip وتزايد كمية الـ APG ثم ثباتها، يدل على إستهلاك الـ Rudip دون تركيبه وتركيب الـ APG دون إستهلاكه.

الإستنتاج: يتركب (يتجدد) الـ Rudip إنطلاقاً من الـ APG بإستعمال نواتج المرحلة الكيموضونية.

الربط:

إن المركبين APG و Rudip يتحولان إلى بعضهما ضمن حلقة يتطلب إستمرارها توفر الـ CO_2 ونواتج المرحلة الكيموضونية، بحيث:

الـ APG يتركب إنطلاقاً من تثبيت الـ CO_2 على الـ RudiP، والـ RudiP يتركب إنطلاقاً من الـ APG بإستعمال نواتج المرحلة الكيموضونية ($NADPH.H^+$ و ATP).



2. شرح تفاعلات المرحلة الكيموحيوية:

إستغلال الوثيقة (13): تمثل الوثيقة (13) مخطط حلقة كالفن، حيث نلاحظ:

- يُثبت الـ CO_2 على جزيئة خماسية الكربون: الريبولوز ثنائي الفوسفات (Rudip) مُشكلاً مُركب سداسي الكربون الذي ينشطر سريعاً إلى جزيئتين بثلاث ذرات كربون هو حمض الفوسفو غيليسريك (APG)، يُراقَب دمج الـ CO_2 بأنزيم الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز (أنزيم Rubisco). **(المرحلة 1)**
- ينشط حمض الفوسفو غيليسريك المؤكسد ثم يُرجع بواسطة الـ ATP و $NADPH.H^+$ الناتجين عن المرحلة الكيموضونية. **(المرحلتين 2 و 3)**
- يُستخدم جزء من السكريات الثلاثية المرجعة (TP = PGAL) في تجديد الـ Rudip أثناء تفاعلات حلقة كالفن وبنسون. **(المرحلة 5)**
- يُستخدم الجزء الآخر من السكريات المرجعة (TP = PGAL) في تركيب السكريات سداسية الكربون (HP)، الأحماض الأمينية، والدهن. **(المرحلة 4)**

الإستنتاج: إن تفاعلات المرحلة الكيموحيوية تتم على مستوى حشوة الصانعة الخضراء في شكل حلقة تُعرف **بحلقة كالفن**، حيث يتم خلالها **إرجاع**

الـ CO_2 بإستعمال نواتج المرحلة الكيموضونية (ATP و نواقل مرجعة $NADPH.H^+$) وتركيب المواد العضوية (الغلوكوز ...).

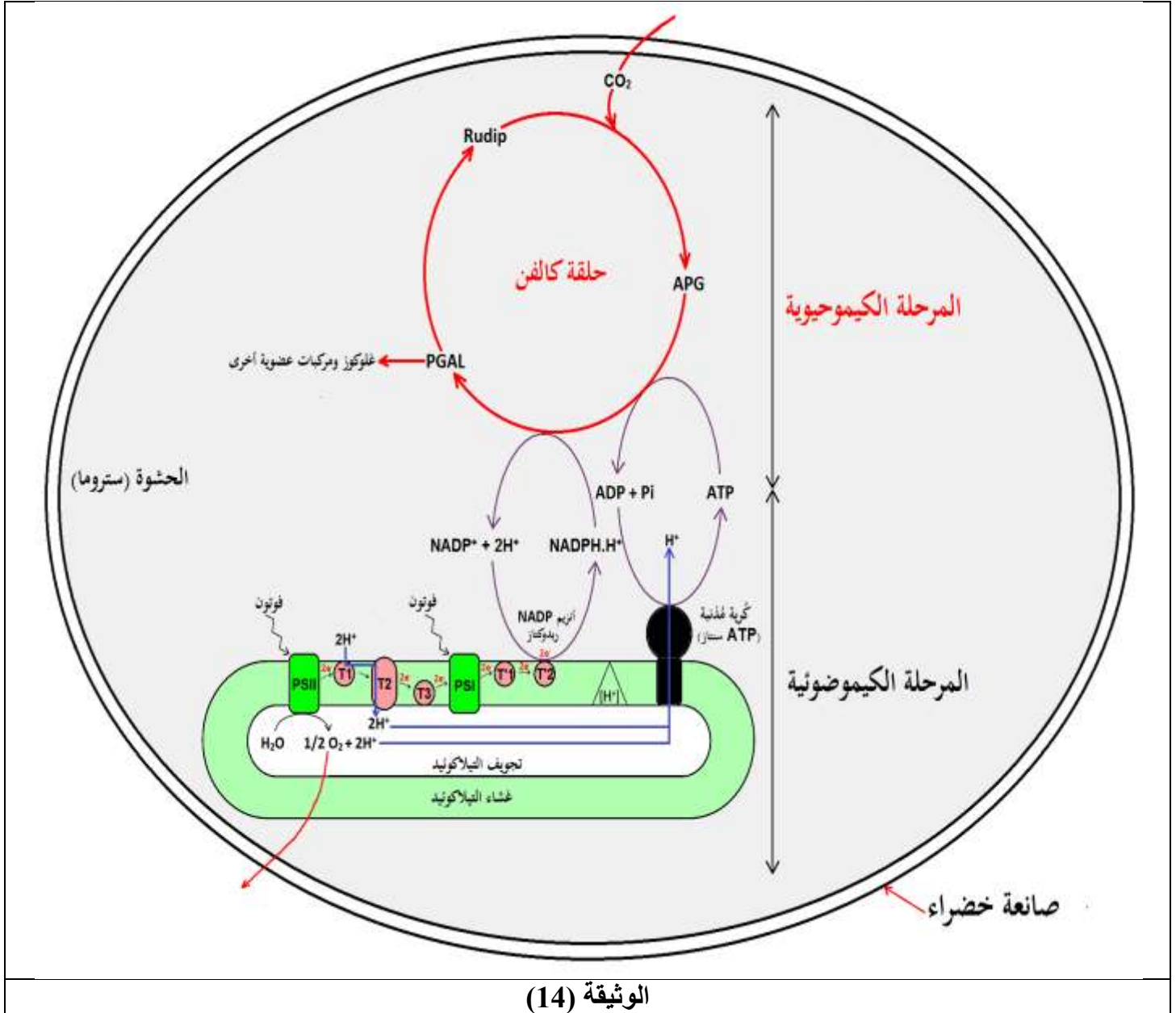
ملاحظة: إن تركيب سكر سداسي واحد (جزيئة 1 من الغلوكوز) وتجديد 6 جزيئات من الـ RudiP يتطلب إستعمال: $18ATP$ و $12NADPH.H^+$.

المعادلة الإجمالية للمرحلة الكيموحيوية:



4. العلاقة بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية:

عند الخلايا النباتية الخضراء تعتبر الصناعة الخضراء ببنياتها الحجرية المميزة مقر عملية التركيب الضوئي التي تضمن تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية آمنة وفق مرحلتين، المرحلة الكيموضوئية التي تحتاج تفاعلاتها للضوء والمرحلة الكيموحوية التي لا تحتاج تفاعلاتها للضوء، **فما هي العلاقة بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية؟** تمثل الوثيقة (14) رسم تخطيطي يُبين التكامل بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية لعملية التركيب الضوئي.



الوثيقة (14)

التعليمة:

- أبرز العلاقة بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية وذلك باستغلالك للوثيقة (14).

الإجابة:

إبراز العلاقة بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية:

استغلال الوثيقة (14): تمثل الوثيقة (14) رسم تخطيطي يُبين التكامل بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحوية لعملية التركيب الضوئي، حيث نلاحظ:

أثناء التركيب الضوئي يتم على مستوى الصانعات الخضراء الجمع بين:

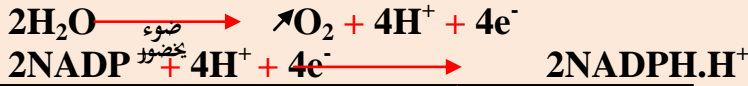
- **تفاعلات كيموضوئية** يكون مقرها التيلاكويد أين يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية (ATP و $NADPH, H^+$).

- **تفاعلات كيموحوية** يكون مقرها الحشوة أين يتم إرجاع الـ CO_2 إلى كربون عضوي (مواد عضوية) باستعمال الطاقة الكيميائية (ATP و $NADPH, H^+$) الناتجة من المرحلة الكيموضوئية.

الاستنتاج: المرحلتان الكيموضوئية والكيموحوية **تعملان بطريقة إزدواجية وتتكاملان بتجديد وإستعمال الـ ATP والنواقل المرجعة $NADPH, H^+$** .

الخلاصة:

- للصانعة الخضراء بنية جبرية منظمة كالآتي:
- تراكيب غشائية داخلية تُشكل أكياس مُسطحة: **التيلاكوييد**.
- تجوف داخلي: **الحشوة**، مُحددة بغشاء بلاستيدي داخلي، يُضاعف الغشاء البلاستيدي الداخلي بغشاء خارجي، يفصل الغشائين البلاستيديين **فضوة بين الغشائين**.
- تحتوي الأغشية التيلاكوييدية **أصبغة التركيب الضوئي** (اليخضور، أصبغة أشباه الجزرين) و**جهاز أنزيمي بما في ذلك الـ ATP سينتاز**.
- تحتوي الحشوة **مواد أيضية وسطية لتركيب المواد العضوية**.
- يتم التركيب الضوئي في مرحلتين:
- مرحلة كيموضونية** تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها طرح الـ O_2 .
- مرحلة كيموحيوية** لا تحتاج إلى ضوء، يتم خلالها إرجاع الـ CO_2 وتركيب جزيئات عضوية.
- تتأكسد** جزيئة اليخضور لمركز التفاعل تحت تأثير الفوتونات المقتنصة، مُتخلية عن إلكترون.
- تسترجع جزيئة اليخضور المؤكسدة **حالتها المرجعة**، وبالتالي **قابلية التنبيه** إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن **أكسدة الماء**.
- تنتقل الإلكترونات الناتجة عن مركز التفاعل في **سلسلة من النواقل مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع**.
- إن **المستقبل الأخير للإلكترونات الناتجة** يدعى **النيكوتين أميد أدنين ثنائي النيكليوتيد فوسفات $NADP^+$** الذي يُرجع بواسطة أنزيم **$NADP$ ريدوكتاز** حسب التفاعل العام:



- يُصاحب نقل الإلكترونات على طول سلسلة الأكسدة الإرجاعية، **نواقل البروتونات** الناتجة عن أكسدة الماء، وبتلك المنقولة من الحشوة بإتجاه تجوف التيلاكوييد.
- إن تدرج تركيز البروتونات المتولد بين تجوف التيلاكوييد وحشوة الصانعة الخضراء ينتشر على شكل سيل من البروتونات الخارجة عبر **الـ ATP سينتاز**.
- تسمح الطاقة المتحررة من سيل البروتونات الخارجة بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي (P_i): **إنها الفسفرة الضوئية**.
- يُثبت الـ CO_2 على جزيئة خماسية الكربون: الريبولوز ثنائي الفوسفات (Rudip) مُشكلاً مُركب سداسي الكربون الذي ينشطر سريعاً إلى جزيئتين بثلاث ذرات كربون هو حمض الفوسفو غيليسريك (APG)، يُراقب دمج الـ CO_2 **بأنزيم الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز**.
- ينشط حمض الفوسفو غيليسريك المؤكسد ثم يُرجع بواسطة الـ ATP و $NADPH.H^+$ الناتجين عن المرحلة الكيموضونية.
- يُستخدم جزء من السكريات الثلاثية المرجعة في تجديد الـ Rudip أثناء **تفاعلات حلقة كالفن وبنسون**.
- يُستخدم الجزء الآخر من السكريات المرجعة في تركيب السكريات سداسية الكربون، الأحماض الأمينية، والدهن.
- أثناء التركيب الضوئي يتم على مستوى الصانعات الخضراء الجمع بين:
- تفاعلات كيموضونية** يكون مقرها التيلاكوييد أين يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.
- تفاعلات كيموحيوية** يكون مقرها الحشوة أين يتم إرجاع الـ CO_2 إلى كربون عضوي بإستعمال الطاقة الكيميائية ($NADPH.H^+$ و ATP) الناتجة من المرحلة الكيموضونية.

التقويم:

- وضّح في نص علمي آلية تحويل الطاقة على مستوى الصانعة الخضراء مُدعمًا إجابتك بمعادلات كيميائية.

الإجابة:

النص العلمي:

- تتم مجموع التفاعلات الكيميائية للتركيب الضوئي داخل الصانعة الخضراء في مرحلتين هما المرحلة الكيموضونية

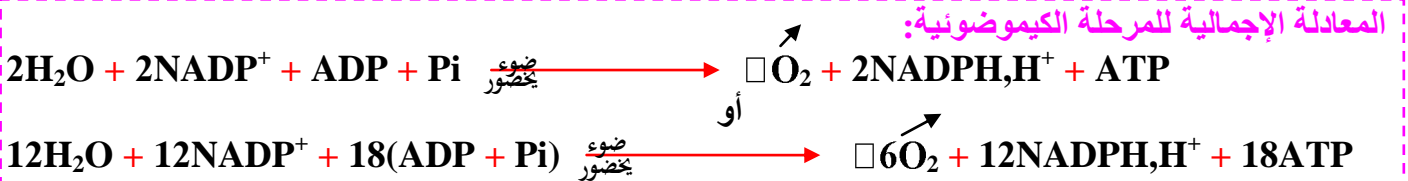
والكيموحيوية، فكيف تحدث كل منهما؟

1. المرحلة الكيموضوئية:

تتأكسد جزيئة اليخضور لمركز التفاعل تحت تأثير الفوتونات المقتنصة، مُتخلية عن إلكترون. تسترجع جزيئة اليخضور المؤكسدة حالتها المرجعة، وبالتالي قابلية التنبيه إنطلاقاً من الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء.

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن مركز التفاعل عبر سلسلة من النواقل مُتزايدة كمون الأكسدة والإرجاع. إن المستقبل الأخير للإلكترونات الناتجة يدعى $NADP^+$ الذي يُرجع بواسطة أنزيم $NADP$ ريدوكتاز. يُصاحب نقل الإلكترونات على طول سلسلة الأكسدة الإرجاعية (السلسلة التركيبية الضوئية)، تراكم البروتونات الناتجة عن أكسدة الماء، وتلك المنقولة من الحشوة باتجاه تجويف الثيلاكويد. إن تدرج تركيز البروتونات المتولد بين تجويف الثيلاكويد وحشوة الصانعة الخضراء ينتشر على شكل سيل من البروتونات الخارجة عبر الـ ATP سنتاز. تسمح الطاقة المتحررة من سيل البروتونات الخارجة بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي (Pi): إنها الفسفرة الضوئية.

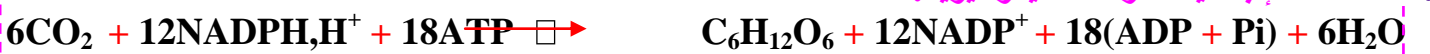
المعادلات الكيميائية لمختلف تفاعلات المرحلة الكيموضوئية:



2. المرحلة الكيموحيوية:

يُنْتَبِث الـ CO_2 على جزيئة خماسية الكربون: الريبولوز ثنائي الفوسفات (Rudip) مُشكلاً مُركب سداسي الكربون الذي ينشط سرياً إلى جزيئين بثلاث ذرات كربون هو حمض الفوسفو غيليسريك (APG)، يُراقب دمج الـ CO_2 بأنزيم الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز. ينشط حمض الفوسفو غيليسريك المؤكسد ثم يُرجع بواسطة الـ ATP و $NADPH.H^+$ الناتجين عن المرحلة الكيموضوئية.

يُستخدم جزء من السكريات الثلاثية المرجعة في تجديد الـ Rudip أثناء تفاعلات حلقة كالفن وبنسون. يُستخدم الجزء الآخر من السكريات المرجعة في تركيب السكريات سداسية الكربون، الأحماض الأمينية، والدهن.



أثناء التركيب الضوئي يتم على مستوى الصانعات الخضراء الجمع بين:

تفاعلات كيموضوئية يكون مقرها الثيلاكويد أين يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.
تفاعلات كيموحيوية يكون مقرها الحشوة أين يتم إرجاع الـ CO_2 إلى كربون عضوي بإستعمال الطاقة الكيميائية (ATP و $NADPH.H^+$) الناتجة من المرحلة الكيموضوئية.

المعادلة الإجمالية للتركيب لضوئي:



المصطلحات العلمية:

سبب إضافة المُستقبل الاصطناعي للإلكترونات (كاشف Hill = فيروسيانور البوتاسيوم) للوسط أثناء تجربة هيل (Hill): في الشروط الفيزيولوجية داخل النبات تحتوي الصانعات الخضراء على المركبات الضرورية لحدوث عملية التركيب الضوئي، عند فصل مكونات الخلية للحصول على الصانعات الخضراء أو عضيات أخرى تتم عملية سحق

الأنسجة النباتية في محاليل مختلفة، قد تؤدي هذه العملية إلى فقد جزء من المركبات المتواجدة داخل الصانعات الخضراء (مثل المستقبل الطبيعي للإلكترونات وغيره) مما قد يتطلب إضافة هذه المواد من الخارج أثناء إجراء التجارب.

الفوتون: هو تعبير كمي للطاقة الضوئية وتتناسب هذه الكمية عكسًا مع طول موجة الضوء.

كمون الأكسدة والإرجاع: يُعبر على قدرة المركبات أو الذرات على تحرير الإلكترونات، يُقاس بالفولط (V)، تنتقل الإلكترونات بصورة تلقائية من المركبات أو الذرات ذات كمونات الأكسدة والإرجاع المنخفضة نحو كمونات الأكسدة والإرجاع المرتفعة.

الأرقام 680 و700: تُضاف الأرقام 680 و700 لأصبغة مركزي التفاعل لـ PSII و PSI (P680 و P700) لتمييزها عن باقي أصبغة النظام الضوئي، وتمثل هذه الأرقام أطوال الموجات التي يكون عندها امتصاص هذه الأصبغة أعظمًا. **أنزيم Rubisco:** أنزيم الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز.

APG: حمض فوسفو غليسيريك.

ADPG: حمض ثنائي فوسفو غليسيريك.

PGAL: فوسفو غليسريد (سكر ثلاثي = TP).

Rudip: ريبولوز ثنائي الفوسفات.

تعريب و تكييف الاستاذ قرناس عادل

