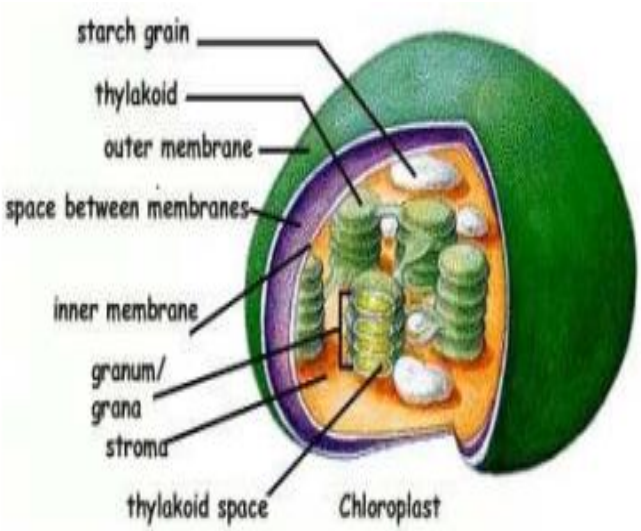
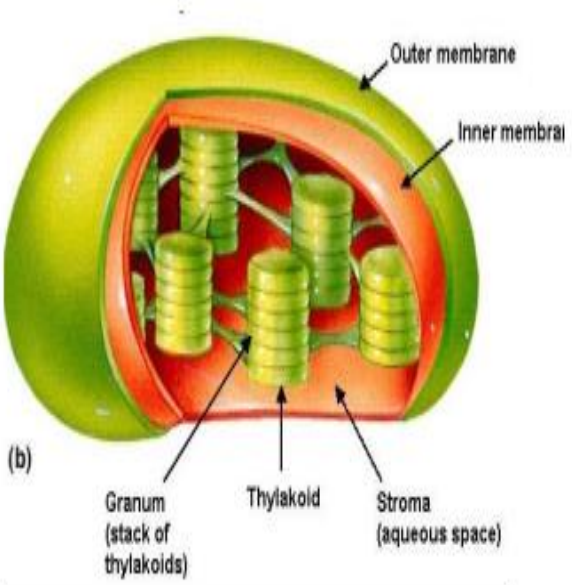
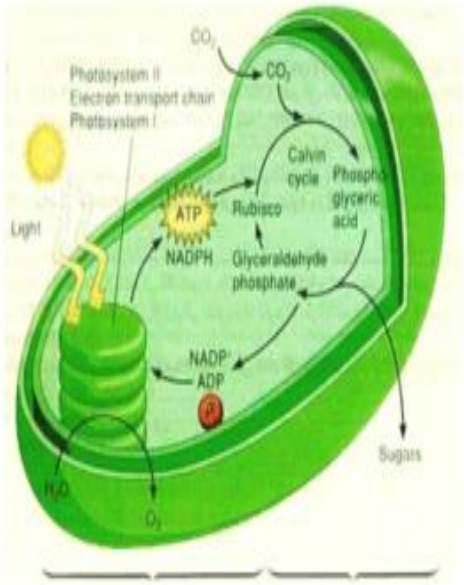
التركيب الضوئي Photosynthesis

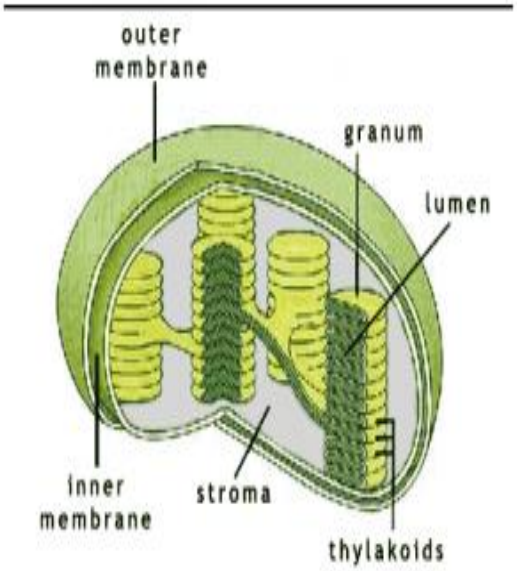
النباتات الخضراء تختلف عن معظم الكائنات الأخرى بكونها ذاتية التغذية Autotrophic أي إنها تستطيع أن تصنع غذائها بنفسها من خلال تحويل الـ (Co_2) اللاعضوي الى مواد عضوية سكرية داخل البلاستيدات الخضراء بمساعدة الطاقة الضوئية بعكس الكائنات الحيوانية والإنسان التي تعتمد في غذائها على المصادر الجاهزة للمواد الغذائية العضوية ولهذا تسمى Heterotrophic . لحدوث عملية التركيب الضوئي يجب توفر العناصر الأساسية المساهمة في انجازها والمتمثلة في الماء الذي يجهز من خلال الشعيرات الجذرية وخلايا البشرة المجاورة لها بشكل أساس أو من ما يمتصه الجزء الخضري بشكل ثانوي والـ (Co_2) الذي يجهز من المحيط الخارجي للنبات بشكل أساس أو من ما ينتج خلال عمليات التنفس الخلوي والبلاستيدات الخضراء والضوء . ولذلك ولفهم عملية التركيب الضوئي يجب دراسة

أ- **تركيب البلاستيدات الخضراء** والتعرف على الصفات التي تحويها هذه الجسيمة السايتوبلازمية، إذن **ماهي البلاستيدة الخضراء:** هي عبارة عن جسيمة سايتوبلازمية تمثل المركز الذي تتم فيه عملية التركيب الضوئي حيث تنتظم فيها جزيئات الكلوروفيل والأصباغ المساعدة الأخرى بنظام خاص يسمح بنقل الطاقة ما بين جزيئات الصبغات التي تمتص الضوء وتحوله الى عدة جزيئات أخرى قبل أن تصل الى مكان تأثيرها فقد تتحول الطاقة الضوئية من جزيئة كلوروفيل a الى جزيئة كلوروفيل a أخرى أو من جزيئة كلوروفيل b الى جزيئة كلوروفيل a أو من جزيئة كاروتين الى جزيئة كلوروفيل a . لقد كشف المجهر الالكتروني بان البلاستيدات الخضراء (الكلوروبلاست) محاطة بزوج من الأغشية كما موضح بالرسم، ينبعج الداخلي منها للداخل من عدة أماكن ليكون النظام الصفائحي للبلاستيدة والمسؤول عن تفاعلات الضوء أو الكيموضوئية وذلك لاحتوائه على صبغات الكلوروفيل وأشباه الكاروتينات.









اذ يتكون النظام الصفائحي من صفائح أو أكياس تسمى (Granum) وعند اجتماع اثنين أو أكثر منها يتكون البذيرة Grana (وهي جمع كلمة Granum) وعند امتداد احد الأكياس أو الصفائح العائدة لبذيرة معينة خلال حشوة البلاستيدة واتصالها بكيس أو صفيحة أخرى تعود الى بذيرة ثانية يتكون ما يسمى بالصفيحة الحشوية Stromdl Lamella . فراغ البلاستيدة المسمى Stroma أو Matrix هو عبارة عن سائل ذات طبيعة غروية لاحتوائه على البروتينات والأنزيمات ويشترك في تفاعلات الظلام أو الكيمو حرارية الخاصة بتثبيت الـ Co_2 خلال عملية التركيب الضوئي.

العوامل الأساسية للقيام بعملية البناء الضوئي:

الضوء

هو موجات كهرومغناطيسية تتالف من جسيمات تسمى ضوئيات أو فوتونات أو كوانتات تختلف طاقتها باختلاف الطول الموجي الذي يحدد ايضاً لون الضوء. مثلاً الضوء الأحمر طوله الموجي 660 نانومتر طاقة الجسيم الضوئي $=3.01\times10^{-19}$ جول.فوتون$^{-1}$، في حين طاقة الجسيم للضوء الأزرق(طوله الموجي 435 نانومتر)$=4.56\times10^{-19}$ جول.فوتون$^{-1}$. الضوء المؤثر في عملية البناء الضوئي هو الاشعاع الشمسي الذي هو جزء من الطيف الكهرومغناطيسي المتكون من الأشعة الكونية واشعة كاما والسينية وفوق البنفسجية والضوء المرئي وتحت الحمراء والموجات الدقيقة والراديوية، محتوى الطاقة في الجسيم الضوئي يتناسب عكسياً مع الطول الموجي، فالجسيمات عالية الطاقة(ذات طول موجي قصير) مثل الأشعة فوق البنفسجية تكون خطرة على الخلية بسبب تكسيرها للجزيئات العضوية، بينما الموجات الطويلة مثل الأشعة تحت الحمراء لا تضر بالخلايا بل تزيد الطاقة التذبذبية للجزيئات ولا تكسر الروابط. إن الضوء المرئي ذو الأطوال الموجية بين 400 و800 نانومتر تقريباً تمتلك الطاقة الكافية لتحفيز وتهيج الالكترونات الى مدار الكتروني أعلى دون الاضرار بالخلية.

صبغات البناء الضوئي

دورها الأساسي هو امتصاص الطاقة الضوئية وهناك انواع منها في الخلايا النباتية لكن اهمها:

الكلوروفيلات Chlorophylls

هي صبغات خضراء اللون موجودة في النباتات والطحالب وبعض انواع البكتريا، ويمكن أن نميز على الأقل 9 أنواع من الكلوروفيل مثل a وb توجد في معظم الكائنات ذاتية التغذية عدا البكتريا الحاوية على الصبغات البنائية فهي حاوية على انواع خاصة بها هي a,b Bacteriochlorophylls ، أما c, d فهي توجد بشكل خاص في الطحالب مع chlorophyll a مثل الطحالب البنية والذهبية والحمر، و 650,660 Chlorobium chlorophylls.

الصبغات النباتية:- عبارة عن جزيئات كيمياوية تمتص نطاقات معينة من أطوال الموجات الضوئية وبكفاءة عالية ولا تمتص أطوال موجات أخرى ولهذا تظهر بألوان مختلفة (علماً بان الضوء الأبيض العادي هو خليط من الموجات كلها).

أن امتصاص الطاقة الضوئية من قبل البلاستيدات الخضراء يتم بواسطة الصبغات Pigments التي تحتويها البلاستيدات والتي تصنف الى:-

أ-**الصبغات الرئيسية:**- والتي تشمل الكلوروفيلات وخاصة(A الخضراء المزرقة) و(B الخضراء المصفرة) والتي تشكل 65٪ من الصبغات الموجودة في البلاستيدات الخضراء.

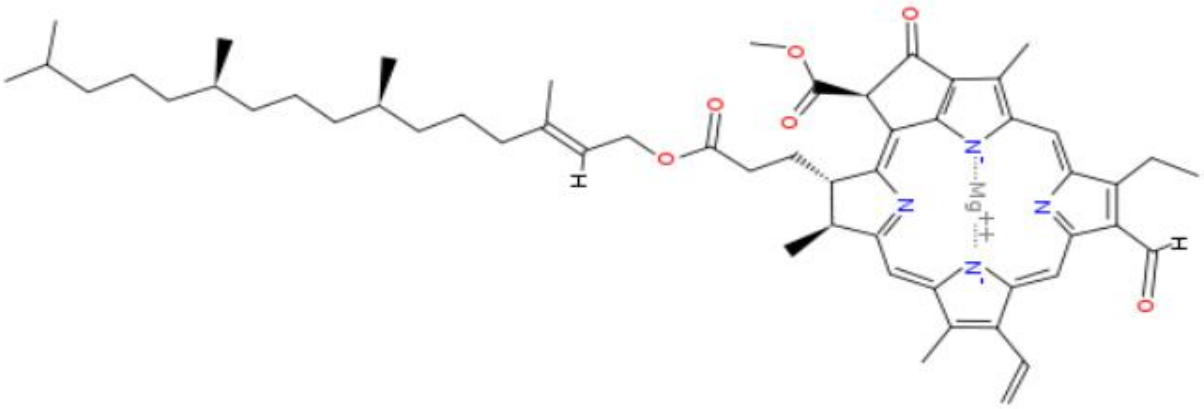
ب_**الصبغات المساعدة أو ما يسمى بأشباه الكاروتينات:**- والتي تشمل الكاروتين (ذو اللون الأصفر- البرتقالي - الأحمر) والزانثوفيل (ذو اللون الأسمر أو البني) واللذان يشكلان نسبة 6٪ و29٪ على التوالي من الصبغة الموجودة في البلاستيدة الخضراء.

أن كل من الأصباغ الرئيسية والمساعدة نشطة ضوئياً وتساهم بشكل فعال في اسر الطاقة الضوئية حيث أن عملية التركيب الضوئي تستخدم جميع الأطوال الموجية ضمن الطيف المرئي لكن أكثر الموجات الضوئية تأثيراُ على أحداث التركيب الضوئي هي الزرقاء والحمراء والتي تمتص من قبل جزيئات كلوروفيل (A و B) بكفاءة عالية أما الموجات الضوئية التي تقع ضمن المناطق الوسطى للطيف المرئي (الموجات الضوئية الخضراء) فإنها تمتص بصورة رئيسية من قبل أشباه الكاروتينات والتي لاتمتلك القدرة على استخدام الطاقة الضوئية الممتصة من قبلها لذلك فإنها تحولها الى جزيئات الكلوروفيل لكي تستخدمها في عمليات التركيب الضوئي.

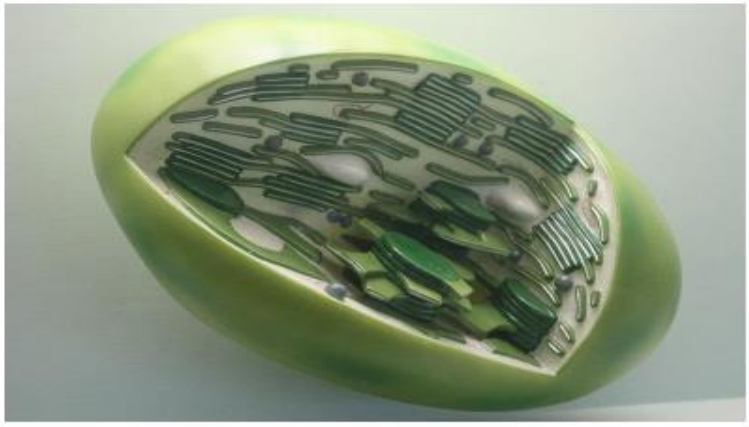
علل : اشباه الكاروتينات تحول الطاقة الضوئية التي تمتصها الى الكلوروفيلات .

ج) لانها لاتملك القدرة علة استخدام الطاقة الضوئية الممتصة من قبلها.

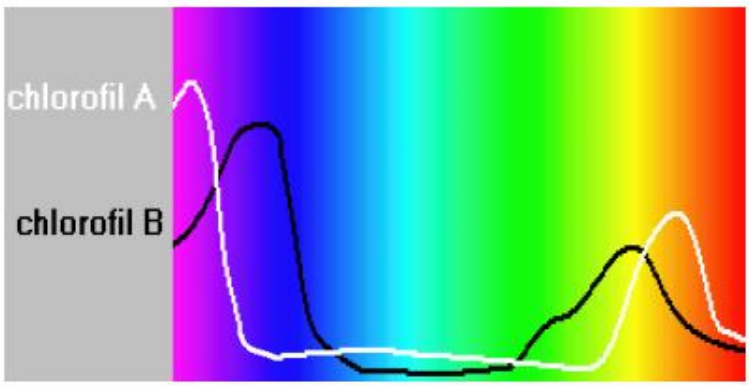
يتكون جزيء chlorophyll a من Porphyrin وهو تركيب بايرول رباعي حلقي مع حلقة دائرية متماثلة تحيط بذرة مغنيسيوم ترتبط حلقة البايرول بسلسلة Phytol تمتد من أحدى حلقات البايرول وإن سلسلة الفايتول تكون رابطة استيرية مع مجموعة كاربوكسيل على كاربون رقم 7 للبورفيرين وأن سلسلة الفايتول هي سلسلة طويلة كارهة للماء تحوي رابطة مزدوجة واحدة، وتبدو ممتدة الى داخل اغشية البلاستيدة.



Chlorophyll a

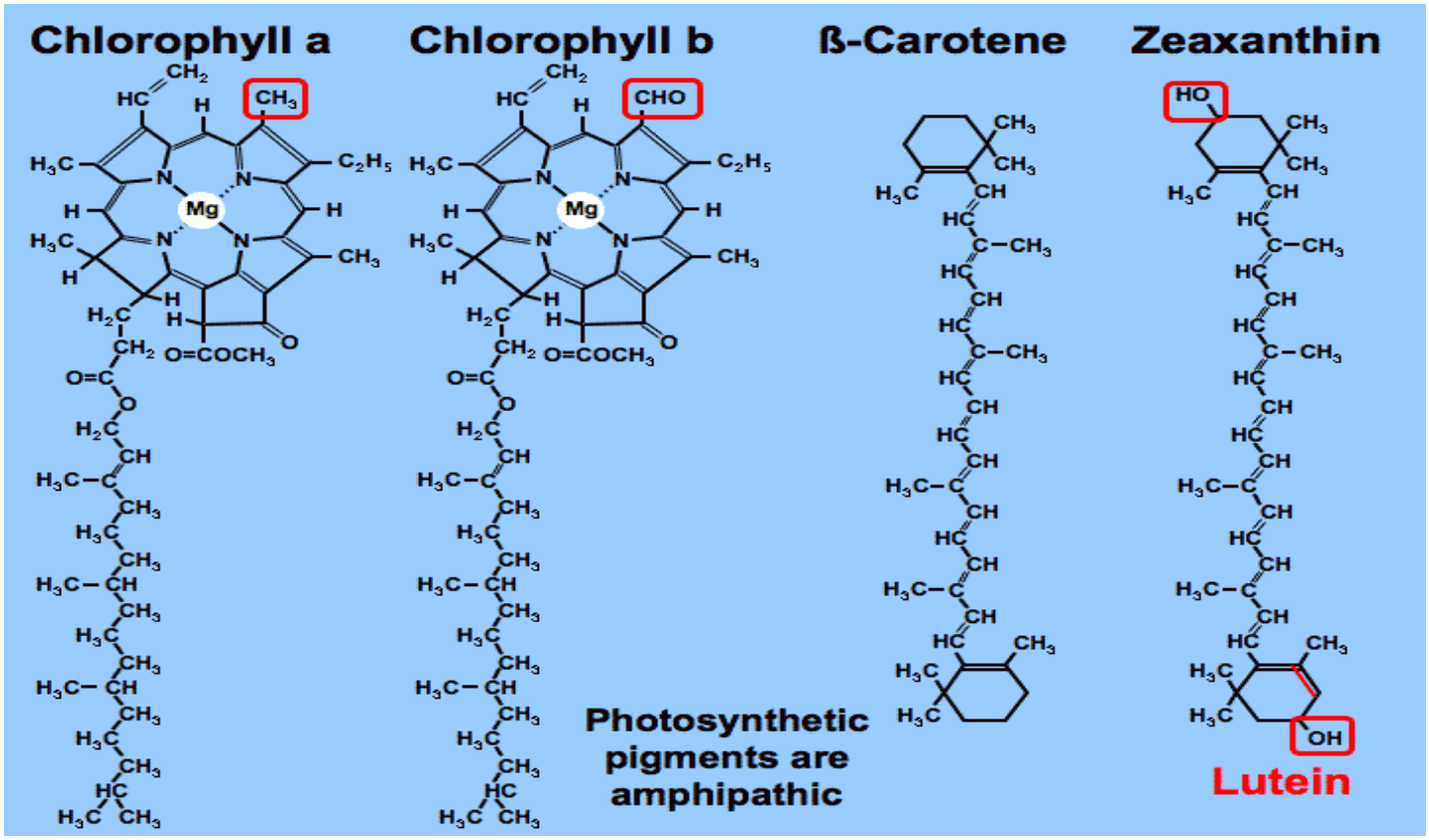


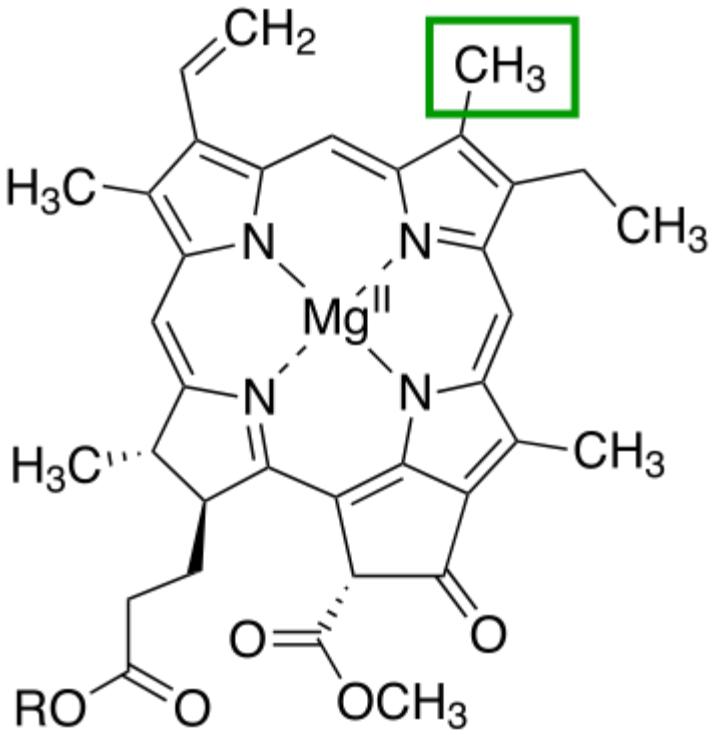
البلاستيدة الخضراء



اختلاف الامتصاصية للطول الموجي حسب نوع الكلوروفيل

- تختلف أنواع الكلوروفيلات المعروفة في الطحالب والنباتات وكما يلي:
  - كلوروفيل A به مجموعة مثيل CH_3 – عند كربون 3.
  - كلوروفيل B به مجموعة الديهايد CHO – عند كربون 3.
  - كلوروفيل C يشبه كلوروفيل A عدا أن كلوروفيل C ليس له سلسلة فايتول.
  - كلوروفيل D يشبه كلوروفيل A عدا أن كلوروفيل D به مجموعة CHO – O – بدلا من $CH_2 = CH_2$ عند كربون 2.
- لون كلوروفيل A أخضر مزرق وكلوروفيل B أخضر مصفر.
- سلسلة الفايتول تجعل الكلوروفيل غير ذائب في الماء، إذ أن سلسلة الفايتول تثبت جزيئة الكلوروفيل بالجزء الكاره للماء لمحيط الغشاء ويشكل إرتباطات غير تساهمية Non-Covalent Associations مع البروتينات الكارهة للماء.
- الأوكسجين الناتج من عملية البناء الضوئي هو ناتج من التحلل الضوئي للماء وليس من CO_2.
- أن التفاعلات المعتمدة على الضوء تتطلب مساهمة نظامين ضوئين يطلق عليهما النظام الضوئي الأول Photosystem I (PS I) والنظام الضوئي الثانيPhotosystem II (PS II).
- جزيئات الصبغات في المجسات اللاقطة عبارة عن جزيئات الكلوروفيل وأشباه الكاروتين.
- تعد صبغة الكلوروفيل A ذات خصوصية وذلك لأنها مركز تفاعلات الضوء.
- التنفس الخلوي(في المايتوكوندريا) هو عكس ما يحصل في البلاستيدات الخضراء بعملية البناء الضوئي.

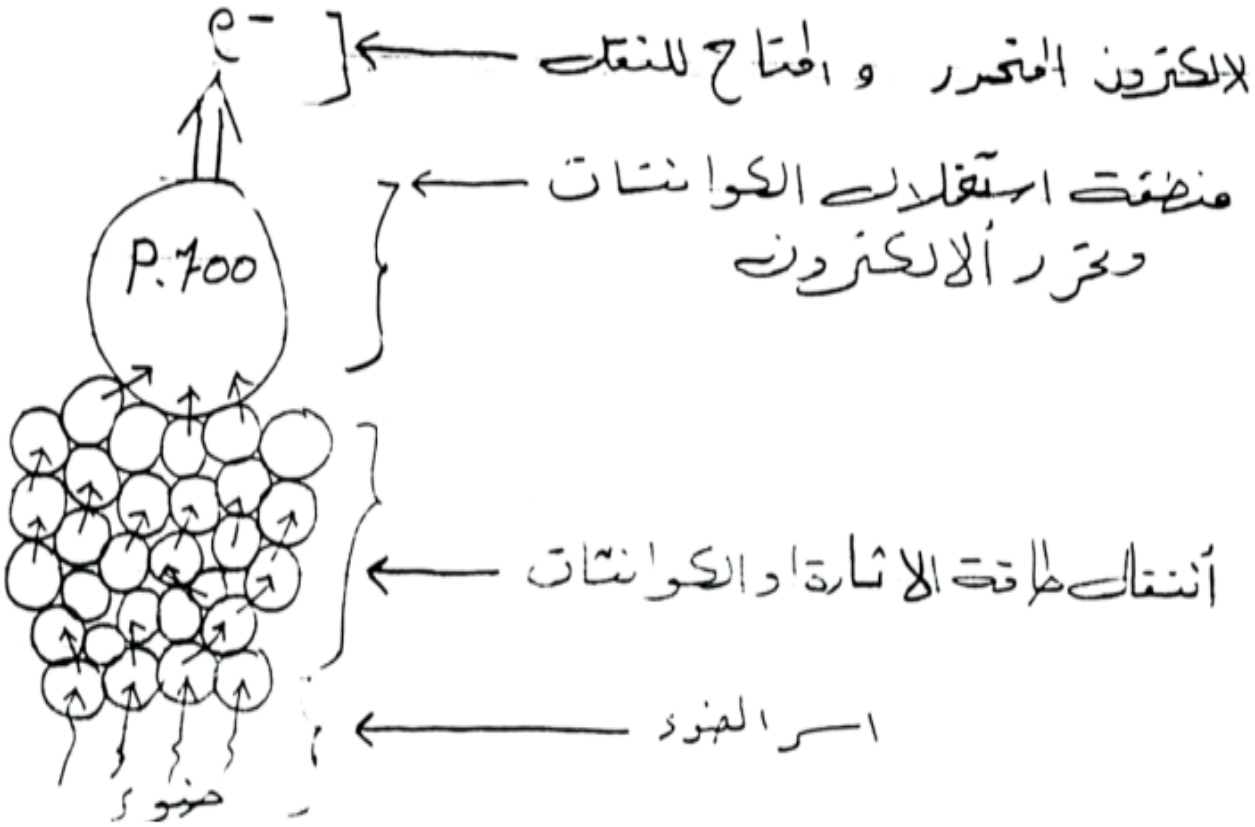




تركيب (بوفيرين) البايرول الرباعي الحلقي لجزيئة كلوروفيل A

وحدة التركيب الضوئي Photosynthetic Unit:

لقد اعتقد المشتغلون الأوائل في التركيب الضوئي بان امتصاص وتحول الطاقة الضوئية الى طاقة كيمياوية يتطلب وجود بلاستيدة خضراء كاملة النمو والتركيب لكن لوحظ من التجارب بان وجود أجزاء صغيرة من البلاستيدة يكفي لحدوث التركيب الضوئي وهذا يشير الى إمكانية تكون البلاستيدة من وحدات صغيرة تسمى وحدات التركيب الضوئي : وهي تمثل اصغر مجموعة من جزيئات الصبغات المتقاربة من بعضها وبترتيب هندسي منظم وتتعاون مع بعضها في امتصاص الطاقة الضوئية ونقلها الى مكان استغلالها حيث يحدث انطلاق أو تحرر الالكترونات وكما موضح بالرسم:



رسم يوضح ترتيب الجزيئات في وحدة التركيب الضوئي ويبين كيفية جمع ونقل الطاقة

المحتويات الغير نشطة ضوئياً في البلاستيدة:

مما سبق اتضح بان أصباغ الكلوروفيل وأشباه الكاروتينات تمثل مواد نشطة ضوئياً في البلاستيدة وتساهم بشكل فعال في اسر الطاقة الضوئية لكن هذا لا يكفي لتكملة حدوث التركيب الضوئي بل يتطلب الأمر الى إسهام مركبات كيمياوية تساعد في نقل الإلكترون المستمر والتي تسمى بالمواد غير النشطة ضوئياً وتشمل:

أ- السايتوكرومات Cytochrames:

هي مركبات بروتينية ويوجد منها في البلاستيدة سايتوكروم f (Cyt.f) وسايتوكروم b (Cyt.b)

ب- الفيرودكسينات Ferrodoxin:

مركبات تحتوي الحديد وتقوم بنقل إلكترون ولها القدرة على اختزال مواد أخرى .

ج- الكوينونات Quinone:

يوجد منها في البلاستيدة الخضراء مجموعة كبيرة ومن أمثلتها Plastoquinone (والذي يمثل مركب عضوي يعاني تفاعلات الأكسدة والاختزال بسبب نقله الالكترونات) وفيتامين K (والذي يعمل كحامل للالكترونات وربما يقوم بعملية الأكسدة والاختزال).

مراحل عملية التركيب الضوئي:

سابقاً كان يعبر عن عملية التركيب الضوئي بالمعادلة أدناه

$$6Co_2 + 6H_2o \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{طاقة ضوئية}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

12(0) 6(0) 12(0)

لكن حديثاً ثبت بان عدم صحة هذه المعادلة لان بموجبها كان يعتقد بان مصدر الـ O_2 الناتج هو Co_2 كلياً أو كل من Co_2 والماء معاً لكن الدراسات أثبتت بان مصدر الـ O_2 الناتج هو الماء فقط (حيث يحدث انشقاق ضوئي للماء Phytolysis) واستناداً الى ذلك فان المعادلة تصبح

$$6Co_2 + 12H_2o \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{طاقة ضوئية}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2o$$

12(0) 12(0)

أن التعبير عن عملية التركيب الضوئي بمعادلة كيمياوية واحدة لايوضح جميع الحقائق المتعلقة بما يحدث داخل البلاستيدة أي لا يبين بشكل واضح التغيرات التي تحدث للمواد اللاعضوية حتى تتحول الى مواد عضوية خاصةً وان التجارب قد أثبتت بان عملية التركيب الضوئي تحوي مرحلتين (ضوئية ولاضوئية) وهذا ماتؤكده الأدلة التالية:

الأدلة العلمية لوجود مراحل الضوء والظلام في عملية التركيب الضوئي:-

أ- تجارب الضوء المتقطع للعالم واربرغ Worburg:

لقد توصل هذا الباحث الى أن معدل عملية التركيب الضوئي للنبات تحت الضوء المستمر ولفترة زمنية معينة هو اقل من معدل التركيب الضوئي لنفس النبات عندما يستلم نفس الكمية من الضوء لكن بصورة متقطعة تفصلها فترات ظلام ولتفسير هذه الحالة وضع النموذج التالي:

$$A \xrightarrow{\text{تفاعل اول}} B \xrightarrow{\text{تفاعل ثاني}} C$$

حيث أن A:- هي نقطة بدأ عملية التركيب الضوئي وهي تفاعل الـ $Co_2 + H_2o$

B:- هي نقطة وسطية في عملية التركيب الضوئي حيث يتكون خلالها مركبات وسطية

C:- هي نقطة انتهاء في عملية التركيب الضوئي حيث يتكون نواتج التركيب مثل $C_6H_{12}O_6$

فعند تعرض النبات الى ضوء مستمر ذو شدة عالية يكون التفاعل من A الى B أسرع من التفاعل في تحول B الى C ونتيجة للتباين في معدل سرعة التفاعلين فسوف يحدث تراكم في B وان زيادة تكوين B سوف لا يؤثر على معدل تكوين C طالما كان التفاعل الثاني من (B الى C) لا يملك القدرة على استخدام على الـ B المتوفرة له عن طريق التفاعل الأول (بسبب قلة سرعته) وعلى هذا الأساس يحدث خلال عملية قطع الضوء تحول الـ B الى C والتي يكون خلالها التفاعل الأول متوقف أو قليل (بسبب عدم توفر الضوء) وهكذا فان استخدام الضوء المتقطع سوف يؤدي الى تكوين كمية اكبر من C.

أما عند نمو النباتات تحت شدة إضاءة واطئة فيكون معدل تكون B من A واطئي واقل من تحول B الى C.

مما سبق يتضح بان التفاعل الأول هو المحدد لمجمل تفاعلات التركيب الضوئي وهو تفاعل كيموضوئي أي يتطلب وجود الضوء لحدوثه بشكل أساسي.

1. تجارب درجة الحرارة:-

وجد أيضا من التجارب بان درجة الحرارة لا تؤثر في التفاعلات الكيموضوئية (التفاعل الأول) لكنها تؤثر في التفاعلات الكيموحرارية (التفاعل الثاني) فعند نمو النبات تحت شدة إضاءة عالية يزداد تكون معدل تكون B من A وعند زيادة درجة الحرارة تحت هذه الظروف يحدث زيادة في تكوين C من B.

3. اخذ Co_2 خلال الظلام:-

وجد من خلال التجارب بان وضع مجموعة من النباتات تحت شدة ضوء عالية وفي جو خالي من الـ Co_2 يحصل تراكم بمادة B وبشكل ملحوظ لكن هذه المادة تزول بشكل تدريجي أو يقل تركيزها عن تجهيز النباتات بالـ Co_2 تحت ظروف الظلام.

أن نتائج هذه التجارب أوضحت بان عملية التركيب الضوئي تتضمن نوعين من التفاعلات هما:-

أ- التفاعلات الكيموضوئية (تفاعلات الضوء) Photochemical reaction :-

وتتميز بأنها تتطلب وجود الضوء، سريعة، غير حساسة لدرجة الحرارة، تحدث في البذيرات والصفائح مابين البذيرات ويتم خلالها انشطار المساء ضوئياً.

ب-تفاعلات الكيموحرارية (تفاعلات الظلام) Thermochemlcal reaction :-

وتتميز بأنها لا تحتاج الى تواجد الضوء، بطيئة، ارتفاع درجة الحرارة يؤدي الى إسراعها، تحدث في الحشوة ويتم خلالها اختزال الـ Co_2 .