अध्याय-10
प्रकाश संश्लेषण
(Photosynthesis)

प्रकाश संश्लेषण भूमण्डल पर सबसे महत्वपूर्ण जैव रासायनिक अभिक्रिया है जिसके द्वारा सजीवों मे ऊर्जा का संग्रहण होता है। इसी ऊर्जा के प्रत्यक्ष या परोक्ष उपभोग द्वारा पृथ्वी पर समस्त सजीवों का अस्तित्व संभव होता है। पादप सामान्यत: सूर्य के प्रकाश को सीधे रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करते हैं परन्तु जन्तु प्रत्यक्ष या अप्रत्यक्ष रूप से अपनी ऊर्जा सम्बन्धी आवश्यकताओं के लिए पादपों पर निर्भर रहते हैं। प्रकाश संश्लेषण एक **आक्सीकरण-अपचयन** अभिक्रिया है जिसमें जल का ऑक्सीकरण एवं कार्बन डाई-ऑक्साइड का अपचयन होता है। प्रकाश संश्लेषण को निम्न प्रकार से परिभाषित किया जा सकता हैं।

परिभाषा :- हरे पादपों द्वारा सूर्य के प्रकाश की उपस्थिति में वायुमण्डल से प्राप्त CO_2 एवं मृदा से अवशोषित जल को शर्करा रूपी रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तन करना प्रकाश संश्लेषण कहलाता है। इसे निम्न रासायनिक समीकरण द्वारा दर्शाया जा सकता हैं :-

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{पर्ण हरित}]{\text{प्रकाश}} C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

इस अभिक्रिया में जल का सूर्य की विकिरण ऊर्जा से आक्सीकरण होता है तथा आक्सीकरण से प्राप्त ऊर्जा द्वारा CO_2 का अपचयन शर्करा में हो जाता है एवं आक्सीजन उप उत्पाद (By product) के रूप में मुक्त होती है। **रेबिनोविच** (1956) के अनुसार *''जीवनीय तापक्रम पर जल(हाइड्रोजन दाता) तथा CO_2 के मध्य सुग्राहिकृत प्रकाश रासायनिक* (Sensitized photo chemical) *आक्सीकरण तथा अपचयन अभिक्रियाओं को प्रकाश संश्लेषण कहते हैं।''*

यह आश्चर्य का विषय है कि प्रकाश संश्लेषण जीवधारियों के लिए अत्यन्त महत्त्वपूर्ण क्रिया होते हुए भी इस ओर 18 वीं शताब्दी तक वैज्ञानिकों का ध्यान आकर्षित नहीं हुआ। वास्तव में प्रकाश संश्लेषण का वास्तविक इतिहास 18 वीं शताब्दी से ही प्रारम्भ होता है। प्रकाश संश्लेषण के इतिहास को स्पष्टत: दो युगों में विभाजित किया जा सकता हैं। समस्थानिकों के पूर्व का युग (काल विस्तार 1800 से 1925 तक) तथा समस्थानिकों के पश्चात का युग (काल विस्तार 1925 से वर्तमान समय तक)।

प्रकाशसंश्लेषण का इतिहास -

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[\text{प्रकाश (इन्जेन हॉज 1779)}]{\text{क्लोरोफिल (ड्यूट्रोच, 1837)}} \text{कार्बनिक पदार्थ} + O_2$$

CO_2 ↑ (सेनेबियर) 1782; H_2O ↑ (डी. सेसर) 1804; कार्बनिक पदार्थ ↑ (इंजेन हॉज) 1779; O_2 ↑ (प्रिस्टले) 1771

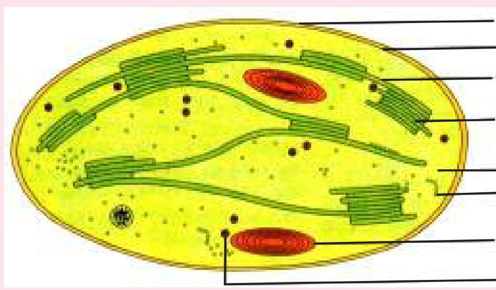
प्रकाश संश्लेषण का आरम्भिक इतिहास का संक्षिप्त विवरण निम्नांकित है :-

क्र. स.	वैज्ञानिक	वैज्ञानिक का योगदान
1.	स्टीफन हेल्स, 1727	पादप अपना भोजन वायु व प्रकाश की उपस्थिति में बनाते हैं। **स्टीफन हेल्स** को पादप कार्यिकी का जनक कहा जाता है।
2.	जोसेफ प्रिस्टले, 1772	पौधे वायुमण्डल को शुद्ध करते हैं। ये प्रकाश संश्लेषण में O_2 का निकास करते हैं।

3.	जेन इन्जेन हॉज, 1779	प्रकाश संश्लेषण में सूर्य के प्रकाश को आवश्यक बताया तथा इस क्रिया में कार्बनिक पदार्थों के संश्लेषण की पुष्टि की।
4.	जीन सेनेबियर, 1782 तथा डी. सेसर, 1804	इन्होंने प्रकाश संश्लेषण में CO_2 की उपयोगिता को स्थापित किया।
5.	जे. आर. मेयर, 1845	हरे पौधे प्रकाश ऊर्जा को रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित कर देते हैं।
6.	एफ. एफ. ब्लैकमेन, 1905	प्रकाश संश्लेषण में प्रकाश रासायनिक तथा जैव रासायनिक दो प्रकार की क्रियाऐं होती हैं जिन्हें क्रमशः प्रकाशिक अभिक्रियायें तथा अप्रकाशिक अभिक्रियाऐं कहते हैं। उसने **सीमाकारी कारक का नियम** भी प्रस्तुत किया।
7.	सी.बी. वॉन नील, 1930	बैक्टीरियल प्रकाश संश्लेषण का अध्ययन करते हुए सर्वप्रथम यह बताया कि उच्च वर्गीय पौधों में प्रकाश संश्लेषण के दौरान O_2 का निकास जल के अणुओं से होता है, न कि CO_2 के अणुओं से।
8.	रॉबर्ट हिल, 1937	हिल अभिक्रिया का प्रदर्शन किया तथा यह सिद्ध किया कि प्रकाश संश्लेषण में O_2 का निकास H_2O से होता है न कि CO_2 से।
9.	एस. रूबेन तथा एम. कामेन, 1941	रेडियो चिन्हित समस्थानिक $^{18}O_2$ (H_2O^{18}) का प्रयोग कर यह निश्चित किया कि O_2 की विमुक्ति जल से होती है।
10.	कैल्विन एवं बैशम 1954	प्रकाश संश्लेषण के C_3 या कैल्विन चक्र की खोज की। इस खोज में उन्होने C^{14} रेडियो समस्थानिक का उपयोग किया। इस शोध के लिए कैल्विन को 1961 में नोबल पुरूस्कार दिया गया।
11.	डेनियल ऑर्नन, 1954	प्रकाशीय फास्फेटीकरण या फास्फोरिलीकरण की खोज की तथा दो वर्णक तंत्रों या प्रकाश तंत्रों के महत्त्व को बताया।
12.	हैच तथा स्लेक, 1966	गन्ना में C_4 चक्र की खोज की।
13.	पी. मिट्शेल, 1978	फास्फेटीकरण के रसायन परासरणी (Chemiosmotic) सिद्धान्त का प्रतिपादन किया।

प्रकाश संश्लेषण का स्थल
(Site of Photosynthesis)

हरित लवक वह कोशिकांग है जहाँ प्रकाश संश्लेषण की अभिक्रिया सम्पन्न होती है। पौधे के सभी हरे भागों एवं पत्तियों में यह उपस्थित होता है। उच्च श्रेणी के पादपों में, ये पर्णमध्योतक कोशिकाओं में उपस्थित होते हैं। पर्णों की एक कोशिका में प्रायः 20 से 40 हरितलवक विद्यमान होते हैं। प्रत्येक हरितलवक लाइपोप्रोटीन की दो एकल कलाओं द्वारा परिबद्ध रहता है एवं इन दोनों कलाओं के मध्य **परिकला अवकाश** होता है। बाह्यकला प्रोटोनों के लिए पारगम्य एवं आन्तरिक कला अपारगम्य होती है। हरितलवक का आंतरिक भाग दो स्पष्ट क्षेत्रों **ग्रेना** (Grana) एवं **स्ट्रोमा** (Stroma) में विभेदित रहता है। स्ट्रोमा या पीठिका हरितलवक का मेट्रिक्स भाग होता है जिसमें विषमांगी प्रोटीनयुक्त तरल पदार्थ भरा रहता हैं। इसमें 70S राइबोसोम, छोटा वृताकार द्विकुण्डलित DNA, आस्मियोफिलिक बूंदें, घुलित लवण एवं अनेक एन्जाइम उपस्थित रहते हैं।



चित्र 10.1 प्रकाश संश्लेषण के स्थल-हरितलवक का आरेखी चित्रण।

हरितलवक के मेट्रिक्स में इकाईकला से निर्मित एक नलिका तन्त्र स्थित होता है, जिन्हें **कोष तुल्य** या **थाइलेकॉइड** (Thylakoid) कहते हैं। ये थाइलेकॉइड एक के ऊपर एक सिक्के के चट्टे (Stack of coins) के रूप में व्यवस्थित होती हैं एवं एक विशिष्ट संरचना का निर्माण करती है जिसे **ग्रेनम** (Granum; बहुवचन ग्रेना) कहते हैं। विभिन्न ग्रेना कहीं कहीं पर **स्ट्रोमा पट्टलिकाओं** या **फ्रेट्स नलिकाओं** द्वारा जुड़े रहते हैं। थाइलेकॉइड की कला में प्रकाश संश्लेषी वर्णक पर्णहरित एवं कैरोटिनॉइड्स उपस्थित होते हैं। **ग्रेना प्रकाश संश्लेषण की प्रकाशिक अभिक्रिया के स्थल हैं**। प्रकाश संश्लेषी वर्णक दृश्य स्पेक्ट्रम में से बैंगनी, नीले एवं लाल रंग का अवशोषण अधिक करते हैं जो स्पेक्ट्रम के 400 nm से 700 nm के बीच का भाग है। अतः वर्णक्रम के इस भाग को **प्रकाश संश्लेषी सक्रिय विकिरण** (Photosynthetically active radiation; PAR) कहते हैं।

पार्क एवं पान (Park and Pan, 1963) ने बताया कि

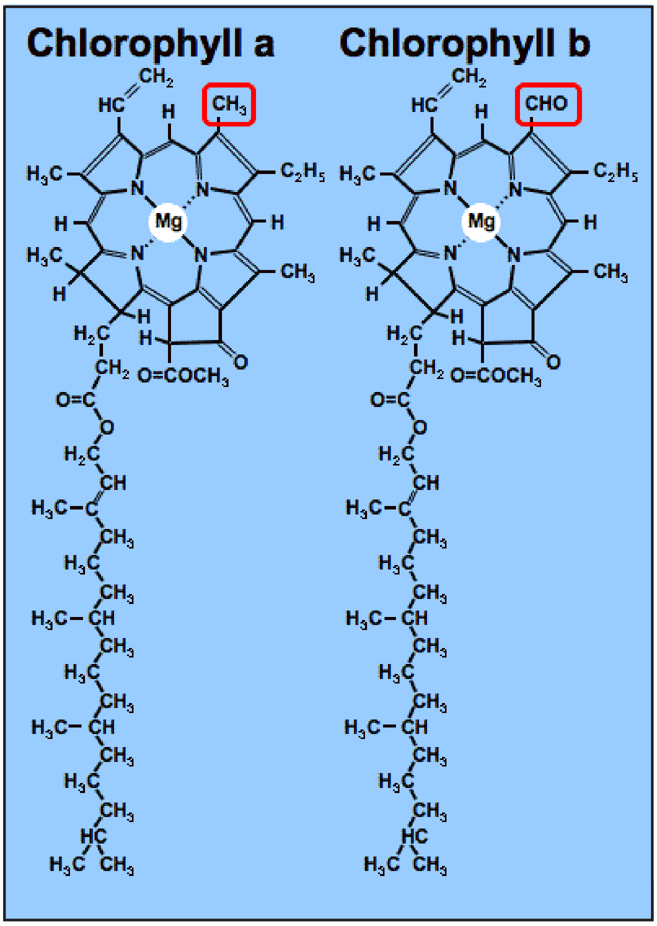
थाइलेकॉइड की आन्तर सतह पर सूक्ष्म गोलाकार कणिकाएं उपस्थित होती हैं जिन्हें **कवाण्टासोम** (Quantosome) कहते हैं। ये प्रकाश संश्लेषण की इकाई हैं। एक क्वाण्टासोम में प्राय: 230 पर्णहरित अणु (160 chla, 70 chlb), 48 कैरीटिनॉइडस, 46 क्वीनोन, 116 फोस्फोलिपिड तथा अन्य अणु व एन्जाइम होते हैं।

प्रकाश संश्लेषी वर्णक
(Photosynthetic Pigments)

पादपों में प्रकाश ऊर्जा का अवशोषण वर्णकों द्वारा किया जाता है इसलिए इन्हें प्रकाश संश्लेषी वर्णक कहते हैं। पौधों में मुख्यत: **पर्णहरित** (Chlorophylls), **कैरोटिनॉइडस** (Carotenoids) तथा **फाइकोबिलिन्स** (Phycobillins) नामक वर्णक उपस्थित होते हैं। इनमें से पर्णहरित मुख्य या प्रधान वर्णक तथा अन्य सभी सहायक वर्णक कहलाते हैं।

पर्णहरित (Chlorophyll) :- पर्णहरित हरे रंग का, प्रकाश संश्लेषण में प्रयुक्त होने वाला मुख्य वर्णक है। पादप जगत में लगभग सात प्रकार के क्लोरोफिल वर्णक पाये जाते हैं। ये है :- Chl a, Chl b, Chl c, Chl d, Chl e, Bacterioviridin एवं Bacteriochlorophyll. इनमें से Chl a सार्वत्रिक वर्णक है जो जीवाणुओं के अतिरिक्त सभी प्रकाश संश्लेषी पादपों में पाया जाता है। Chl b सहायक वर्णक की तरह कार्य करता है, जो सभी प्रकाश संश्लेषी पौधों एवं हरे शैवालों में पाया जाता है। क्लोरोफिल वर्णक कार्बनिक विलायकों में विलयशील होते है। Chl b की विलायकता सर्वाधिक होती है।

पर्णहरित अणु की संरचना (Structure of chlorophyll molecule) :- क्लोरोफिल की रासायनिक संरचना का अध्ययन सर्वप्रथम **विल्सटॉटर, स्टॉल** तथा **फिशर** द्वारा 1912 में किया गया है। क्लोरोफिल एक ध्रुवीय अणु है। इसमें एक सुविकसित **पोरफाइरिन वलय** द्वारा निर्मित शीर्ष एवं **फाइटोल श्रृंखला** द्वारा निर्मित पूंछ होती है। अणु का शीर्ष चार पाइरोल वलयों के विन्यास से बना होता है जो परस्पर मेथिल बन्धों द्वारा संयुक्त होकर चक्रीय टेट्रापाइरोल वलय बनाती है। इस टेट्रापाइरोल वलय के केन्द्र में आयनिक मैग्नीशियम का परमाणु उपस्थित रहता है। चतुर्थ पाइरोल वलय एक लम्बी एल्कोहल की श्रृंखला से जुड़ी रहती है जिसे फाइटोल पूंछ कहते हैं। क्लोरोफिल a का अणुसूत्र $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ एवं क्लोरोफिल b का $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$ है। क्लोरोफिल a अणु में पोरफाइरिन सिरे के तीसरे कार्बन पर CH_3 समूह संलग्न होता है जबकि Chlb में इस स्थान पर CHO समूह होता हैं। क्लोरोफिल a नीले हरे रंग का तथा Chlb पीले हरे रंग का वर्णक है।



चित्र 10.2 क्लोरोफिल a तथा b के अणु

2. कैरोटिनॉइड्स (Carotenoids) :- कैरोटिनॉइड्स सामान्यत: पादपों में क्लोरोफिल के साथ पाये जाने वाले वर्णक हैं। ये उन विकिरणों को अवशोषित कर ऊर्जा को क्लोरोफिल तक पहुँचाते हैं, जिनका अवशोषण क्लोरोफिल द्वारा नहीं किया जा सकता है। अत: ये सहायक वर्णक कहलाते हैं। केरोटिनॉइड की सर्वप्रथम खोज **वेकेनरोडर** (Wackenroder, 1831) द्वारा गाजर में की गई थी। पौधों में दो प्रकार के कैरोटिनॉइड विद्यमान होते हैं, **कैरोटिन** तथा **जैन्थोफिल**।

(i) कैरोटिन (Carotene) :- ये केवल कार्बन एवं हाइड्रोजन परमाणु युक्त होते हैं। इनका मूलानपाती सूत्र $C_{40}H_{56}$ होता है। इनका रंग सामान्यत: लाल होता है। उदा. लॉइकोपिन, α कैरोटिन, β कैरोटिन।

(ii) पर्णपीत या जैन्थोफिल (Xanthophyll) या केरोटिनोल्स (Carotenoles) :- इनमें कार्बन व हाइड्रोजन के अतिरिक्त ऑक्सीजन भी उपस्थित होती है। इनका मूलानुपाती सूत्र $C_{40}H_{56}O_2$ होता हैं। इनका रंग पीला या भूरा होता है। उदा.- ल्यूटिन, जियाजैन्थिन, क्रिप्टोजैन्थिन, नियोजैन्थिन आदि।

कैरोटिन में β केरोटिन एवं जैन्थोफिल में ल्यूटिन सभी हरे पादपों में पाये जाते हैं।

3. फाइकोबिलिन्स (Phycobilins) :- ये वर्णक केवल लाल व नीले हरे शैवालों मे पाये जाते है तथा दो प्रकार के होते हैं –

(i) फाइकोइरीथ्रिन (Phycoerythrin) :- यह लाल रंग का वर्णक है जो लाल शैवालों (रोडोफाइसी) **(Rhodophyceae)** में पाया जाता है।

(ii) फाइकोसायनिन (Phycocyanin) :- यह नीले रंग का वर्णक है जो प्रमुखत: नील हरित शैवालों (Cyanophyceae) में पाया जाता है।

प्रकाश की प्रकृति
(Nature of Light)

सूर्य का प्रकाश विद्युत चुम्बकीय तंरगों के रूप में गति करता है। इन विद्युत चुम्बकीय तंरगों की गति में क्रमागत दो शृंगों अथवा दो गर्तो के मध्य की दूरी तंरग दैर्ध्य (λ=लैम्डा) कहलाती है। तंरग की ऊर्जा इसके तंरग दैर्ध्य के व्युत्क्रमानुपाती होती है, अर्थात् छोटी तंरग दैर्ध्य की किरणों (कॉस्मिक किरणों के अन्तर्गत) में उच्च ऊर्जा एवं बड़ी तरंग दैर्ध्य की किरणों (रेडियो तरंगों के अन्तर्गत) में निम्न ऊर्जा होती है। विद्युत चुम्बकीय विकिरणों के दृश्यमान भाग को **प्रकाश** अथवा **दृश्यमान वर्णक्रम** (Visible spectrum) कहते हैं जिसकी तरंग दैर्ध्य परास 390 से 760 nm के मध्य होती है। इस दृश्यमान प्रकाश को सात विभिन्न रंगों में विभेदित किया जा सकता है। प्रत्येक रंग विशिष्ट तरंग दैर्ध्य युक्त होता है। दृश्य स्पेक्ट्रम में लाल रंग के प्रकाश की तरंग दैर्ध्य अधिक (660 से 780 nm) एवं बैंगनी रंग के प्रकाश की तरंग दैर्ध्य कम (390 से 430 nm) होती है। लाल रंग से अधिक तरंग दैर्ध्य वाला क्षेत्र **अवरक्त** (Infra red, IR) **क्षेत्र** तथा बैंगनी रंग से कम तरंग दैर्ध्य वाला क्षेत्र **पराबैंगनी क्षेत्र** (Ultra Violet, UV) कहलाता है। प्रकाश की किरणों में उच्च ऊर्जा वाले कण पाये जाते हैं जिन्हें **फोटोन** कहते हैं। एक फोटोन में निहित ऊर्जा **क्वाण्टम** कहलाती है। प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में CO_2 के एक अणु के अपचयन हेतु लगभग 8 फोटोन की आवश्यकता होती है जिसे प्रकाश संश्लेषण की क्वाण्टम आवश्यकता कहते हैं। पुन: अवशोषित या व्यय होने वाले प्रत्येक क्वाण्टम या फोटोन से मुक्त होने वाले O_2 अणुओं की संख्या **क्वाण्टम** (Quantum Yield) **उत्पादन** कहलाता है। पादप नीले एवं लाल प्रकाश में सर्वाधिक प्रकाश संश्लेषण प्रदर्शित करते हैं। **हरी प्रकाश किरणों में प्रकाश संश्लेषण की दर शून्य होती हैं। क्यों?**

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया विधि
(Mechanism of Photosynthesis)

अभी तक हुए शोधों के आधार पर प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया में निम्न तथ्य परिलक्षित होते हैं :-

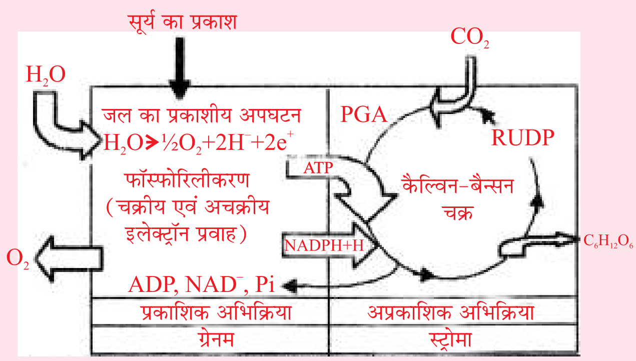
1. पर्णहरित एवं सहायक वर्णकों द्वारा अवशोषित प्रकाश ऊर्जा का उपयोग जल के प्रकाशिक अपघटन में होता है जिससे O_2, H^+ व इलेक्ट्रोन (e^-) मुक्त होते हैं।

2. इन इलेक्ट्रोन्स का प्रवाह प्रकाश तन्त्रों के विभिन्न ग्राहियों से होता है जिसमें अन्तिम रूप से ATP एवं $NADPH+H^+$ के रूप में ऊर्जा संग्रहित होती है।

3. इन उच्च ऊर्जा युक्त अणुओं या पदार्थो (ATP, $NADPH+H^+$) का उपयोग CO_2 के अपचयन हेतु किया जाता है। जिससे शर्करा (कार्बोहाइड्रेट) का उत्पादन होता है। अत: प्रकाश संश्लेषण एक ऑक्सीकरण-अपचयन (Redox) अभिक्रिया है जिसमें जल का ऑक्सीकरण तथा CO_2 का अपचयन होता है।

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया दो चरणों में पूर्ण होती है। ये दोनों चरण एक दूसरे से स्पष्ट रूप से भिन्न परन्तु परस्पर सम्बन्धित होते हैं। ये चरण हैं :-

I. प्रकाशिक अभिक्रियायें (Light Reactions) :- प्रथम चरण प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया का है जो प्रकाश की उपस्थिति में सम्पन्न होता है। इसमें स्वांगीकरण शक्ति का निर्माण होता है। यह अभिक्रिया हरितलवक के ग्रेना वाले भाग में होती है।



चित्र 10.3 प्रकाश संश्लेषण की प्रकाशिक व अप्रकाशिक अभिक्रियाओं का आरेखन

II. अप्रकाशिक या ब्लैकमेन अभिक्रियायें (Dark or Blackman Reactions) :- दूसरा चरण अप्रकाशिक अभिक्रिया का है जिसमें प्रकाश की उपस्थिति आवश्यक नहीं होती है। अप्रकाशिक अभिक्रिया में स्वांगीकरण शक्ति का उपयोग CO_2 के कार्बोहाइड्रेट में अपचयन हेतु किया जाता है। यह अभिक्रिया हरितलवक के स्ट्रोमा भाग में सम्पन्न होती है। तापगुणांक एवं अन्य प्रयोगों से यह सिद्ध किया जा चुका है कि प्रकाश संश्लेषण की एक प्रक्रिया प्रकाश से प्रभावित होती है जिसे प्रकाशिक अभिक्रिया कहते है जबकि दूसरी प्रक्रिया तापमान से प्रभावित होती है जिसे अप्रकाशिक अभिक्रिया कहते हैं। प्रकाशिक अभिक्रिया का तापमान गुणांक (Q_{10} =1) लगभग एक होता है जबकि अप्रकाशिक अभिक्रिया में इसका मान (Q_{10} =2 या 3) दो या तीन होता

है।

I. प्रकाशिक अभिक्रियायें (Light Reactions)

इनको **प्रकाश रासायनिक अभिक्रियायें** अथवा **हिल अभिक्रिया** भी कहा जाता है। यह एक जटिल प्रक्रिया है जिसमें कई क्रियायें सम्पन्न होती हैं। जो निम्नानुसार हैं –

1. प्रकाश का अवशोषण एवं पर्णहरित के अणु का उत्तेजित होना :- प्रकाश की विद्युत चुम्बकीय तरंगों से ऊर्जा के पैकेट्स या क्वांटम को अवशोषित कर पर्णहरित का अणु कुछ समय के लिए उत्तेजित अवस्था में आ जाता है, अर्थात् क्लोरोफिल अणु से इलेक्ट्रोन निष्काषित हो जाते हैं। पर्णहरित (सामान्य) + फोटोन (क्वांटम) = पर्णहरित (उत्तेजित अवस्था)

2. जल का प्रकाशिक अपघटन एवं ऑक्सीजन का निकास :- पर्णहरित द्वारा अवशोषित ऊर्जा का उपयोग जल के प्रकाशिक अपघटन में होता है। जल के इस अपघटन से O_2 का निष्कासन होता है जिसका कुछ भाग श्वसन में प्रयुक्त होता है एवं शेष बची हुई O_2 वायुमण्डल में मुक्त हो जाती है। इस अभिक्रिया में मैंग्नीज (Mn) एवं क्लोराइड (Cl^-) आयन की महत्त्वपूर्ण भूमिका होती है :-

$$2H_2O \xrightarrow[Cl^-]{Mn^{++}} 4H^+ + 4e^- + O_2$$

3. $NADPH+H^+$ का निर्माण :- थायलेकाईड झिल्ली की स्ट्रोमा सतह की ओर इस अणु का निर्माण होता है। जल के प्रकाशिक अपघटन से मुक्त होने वाली आयनिक हाइड्रोजन (H^+) NADP को अपचयित कर $NADPH+H^+$ का निर्माण करती है। जल के दो अणुओं के प्रकाशिक अपघटन से प्राप्त $4H^+$ से $2NADP+H^+$ बनते है जो CO_2 के एक अणु के अपचयन हेतु आवश्यक होते हैं। इस क्रिया में $4e^-$ भी आवश्यक होते है जो PS-I से प्राप्त होते हैं।

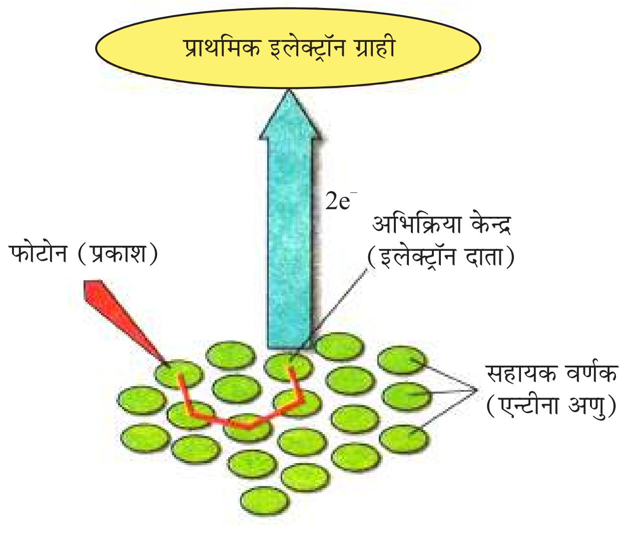
4. प्रकाशिक फास्फोरिलीकरण :- प्रकाश ऊर्जा से उत्तेजित पर्णहरित द्वारा मुक्त इलेक्ट्रोन विभिन्न ग्राहियों से गुजरते हैं। इस इलेक्ट्रोन स्थानान्तरण से मुक्त ऊर्जा द्वारा ATP का संश्लेषण होता है जिसे **प्रकाशिक फास्फोरिलीकरण** (Photophosphorylation) कहते हैं।

5. लाल पतन, इमरसन प्रभाव एवं दो वर्णक तन्त्र (Red drop, Emerson effect and Two Pigment Systems) :- **इमरसन** एवं **सहयोगियों** (1957) ने प्रकाश की विभिन्न तरंग दैर्ध्यों में प्रकाश संश्लेषण की दर का मापन करने पर निम्न प्रेक्षण प्राप्त किये।

(अ) जब प्रकाश संश्लेषण में 680 nm से उच्च तरंग दैर्ध्य (लाल किरणें) का एकवर्णी प्रकाश प्रयुक्त किया जाता है तो प्रकाश संश्लेषण की दर घट जाती है। चूंकि दर में यह कमी प्रकाश वर्णक्रम के लाल क्षेत्र से सम्बन्धित है अत: इसे **लाल पतन** (Red drop) कहा गया है।

(ब) अन्य प्रयोग में **इमरसन** तथा **साथियों** ने उच्च तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश के साथ निम्न तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश विकिरणों का प्रयोग करने पर पाया कि प्रकाश संश्लेषण की दर दोनों तरंग दैर्ध्यों में प्राप्त अलग अलग दरों के योग से भी अधिक थी। प्रकाश संश्लेषण की दर में इस वृद्धि को **इमरसन वृद्धिकरण प्रभाव** (Emerson enhancement effect) कहा जाता है। उपरोक्त प्रयोगों के आधार पर इमरसन इस निष्कर्ष पर पहुँचे कि पादपों में प्रकाश संश्लेषण के लिए कम से कम दो वर्णक समूह पाये जाते हैं। एक वह जो उच्च या बड़ी तरंग दैर्ध्य के प्रकाश का अवशोषण करते हैं तथा दूसरा वह जो निम्न या छोटी तरंग दैर्ध्य के प्रकाश का अवशोषण करते हैं। इन वर्णक समूहों को क्रमश: **प्रकाश तन्त्र-I (PS-I)** एवं **प्रकाश तन्त्र-II (PS-II)** कहा जाता है।

प्रत्येक प्रकाश तन्त्र में 300 से 400 वर्णक अणु पाये जाते हैं। प्रत्येक प्रकाश तन्त्र में एक **अभिक्रिया केन्द्र** (Reaction centre) होता है जिसके चारों तरफ अन्य सहायक वर्णक पाये जाते हैं। ये सहायक वर्णक प्रकाशिक ऊर्जा को अवशोषित करके अभिक्रिया केन्द्र को देते हैं। इन अणुओं को **एन्टीना अणु** (Antenna molecule) कहते हैं।



चित्र 10.4 - प्रकाशतंत्र की क्रियाविधि

प्रकाशतन्त्र-I (Photosystem I, PS-I) :- प्रकाश तन्त्र-I में पर्णहरित के विभिन्न अणु (Chl_{660}, Chl_{670}, Chl_{680} Chl_{690}, Chl_{700}; Chl के साथ मुद्रित संख्या सम्बन्धित वर्णक का अवशोषण वर्णक्रम है।) एवं कैरोटिनाइड होते हैं जो भिन्न भिन्न तरंग दैर्ध्यों का अवशोषण कर अन्त में विशेष प्रकार के Chl a_{700} (P_{700}) अणु जो अभिक्रिया केन्द्र (Reaction centre) की तरह कार्य करता है, को स्थानान्तरित कर देते है। अभिक्रिया केन्द्र में प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया के कारण क्लोरोफिल से उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रोनों का

उत्सर्जन होता है। यह प्रकाश तन्त्र (PSI) चक्रीय एवं अचक्रीय दोनों प्रकार के फास्फोरिलीकरण में भाग लेता है। यह ग्रेना एवं स्ट्रोमा दोनों की थाइलेकोइडों में उपस्थित होता है।

प्रकाश तन्त्र-I की क्रिया विधि (Mechanism of PSI) :- इस प्रकाश तन्त्र में सूर्य के प्रकाश के ऊर्जा कण (फोटोन) पर्णहरित a $[P_{700}]$ से टकराते हैं। प्रकाश तन्त्र-I का अभिक्रिया केन्द्र इस ऊर्जा का अवशोषण करता है तथा अपने इलेक्ट्रोन उत्सर्जित करता है। जिससे पर्णहरित अणु $[P_{700}]$ ऑक्सीकृत अवस्था में आ जाता है। PSI से मुक्त इलेक्ट्रोन विभिन्न इलेक्ट्रोन ग्राहियों जैसे आयरन सल्फर प्रोटीन [A(FeS)], फैरोडॉक्सिन (fd), आदि से गुजरता हुआ अन्त में $NADP^+$ द्वारा ग्रहण कर लिया जाता हैं जिससे यह $NADPH+H^+$ में परिवर्तित हो जाता है। $NADPH+H^+$ एक प्रबल अपचायक होता है जिसका उपयोग अप्रकाशिक अभिक्रिया में CO_2 के अपचयन हेतु किया जाता है।

प्रकाशतन्त्र-II (Photosystem II, PSII) :- इस प्रकाश तन्त्र में पर्णहरित के विभिन्न अणु (Chl_{650}, Chl_{660}, Chl_{670}, Chl_{680}), पर्णहरित b, कैरोटिनाइड, प्लास्टोक्विनोन, साइटोक्रोम b_6 तथा साइटोक्रोम **f** पाये जाते हैं। इस प्रकाश तन्त्र में भी एन्टीना अणुओं द्वारा फोटोन ऊर्जा का अवशोषण कर उसे अभिक्रिया केन्द्र (P_{680}) को स्थानान्तरित किया जाता है। इस प्रकाशतन्त्र में 680nm से कम तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश का अवशोषण होता है। PS-II हरितलवक के ग्रेना पट्टलिकाओं में पाया जाता है एवं इसका उपयोग केवल अचक्रीय फास्फोरिलीकरण में होता है।

प्रकाश तन्त्र-II की कार्यविधि (Mechanism of Photosystem II) :- इस प्रकाश तन्त्र द्वारा जल का प्रकाशिक अपघटन होता है। इस प्रकाश तन्त्र के वर्णक 680 nm से छोटी तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश का अवशोषण करते हैं जिससे पर्णहरित उत्तेजित होकर इलेक्ट्रोन मुक्त करता है। ये मुक्त इलेक्ट्रोन, इलेक्ट्रोन ग्राही फीयोफाइटिन द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं। पर्णहरित अणु अब एक प्रबल ऑक्सीकारक का कार्य करता है जिससे जल के अणु का ऑक्सीकरण हो जाता है। यह क्रिया जल का **प्रकाशिक अपघटन** कहलाती है। इस अभिक्रिया में मैंग्नीज, कैल्शियम एवं क्लोराइड आयनों की महत्त्वपूर्ण भूमिका होती है। जल के प्रकाशिक अपघटन से मुक्त इलेक्ट्रोन को P_{680} द्वारा ग्रहण कर लिया जाता है जिससे यह पुन: अपनी सामान्य अवस्था में आ जाता हैं। P_{680} से फियोफाइटिन को स्थानान्तरित इलेक्ट्रोन प्लास्टोक्वीनोन (PQ) → साइट्रोक्रोम b_6 एवं साइटोक्रोम f से होते हुए प्लास्टोसायनिन (PC) द्वारा ग्रहण कर लिए जाते हैं जिससे यह अपचयित हो जाता है। अपचयित प्लास्टोसायनिन से इलेक्ट्रोन प्रकाशतन्त्र-I के ऑक्सीकरण से उत्पन्न हुए इलेक्ट्रोन छिद्र या अभाव को भरने में प्रयुक्त हो जाते हैं। अत: इलेक्ट्रोन ग्राही शृंखला में प्लास्टोसाइनिन दोनों प्रकाशतन्त्रों के मध्य योजक कड़ी का कार्य करता हैं।

$$H_2O \xrightarrow[\text{पर्ण हरित, } Mn^{++},\ Cl^-]{\text{फोटोन}} \tfrac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

इलेक्ट्रोन परिवहन शृंखला (Electron Transport Chain, ETC)

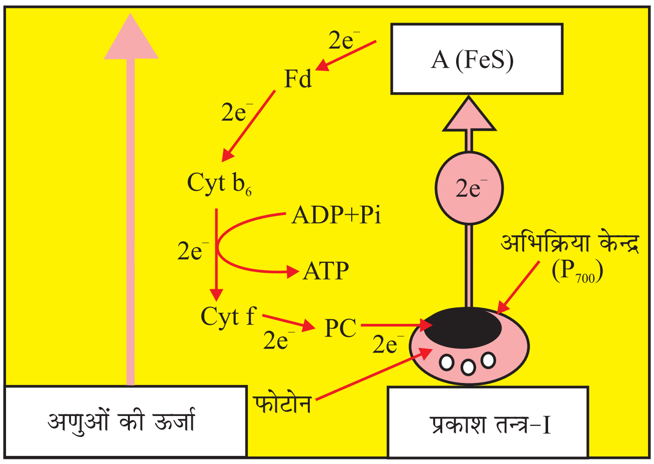
प्रकाश संश्लेषण में प्रकाश द्वारा पर्णहरित से मुक्त हुए इलेक्ट्रोन विभिन्न इलेक्ट्रोन ग्राहियों द्वारा क्रमबद्ध रूप से ग्रहण कर लिए जाते हैं एवं प्रत्येक स्थानान्तरण पर दो ग्राहियों के मध्य ऊर्जा अन्तर के बराबर ऊर्जा मुक्त करते हैं। मुक्त ऊर्जा पर्याप्त होने पर ATP का संश्लेषण कर लिया जाता है अन्यथा उसका उष्मा के रूप में ह्रास हो जाता है।

प्रकाशफास्फोरिलीकरण या प्रकाश फास्फेटीकरण (Photophosphorylation) - हरित लवक में सूर्य की प्रकाशीय ऊर्जा का उपयोग कर ADP से ATP का संश्लेषण **प्रकाश फास्फोरिलीकरण** कहलाता है। इसकी खोज **ऑर्नन एवं उनके साथियों** (Arnon *et.al.* 1954) द्वारा की गई थी। प्रकाश फास्फोरिलीकरण दो प्रकार का होता है।

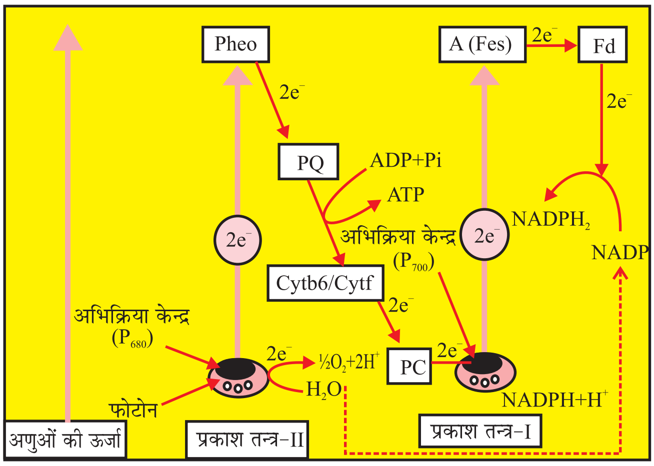
1. चक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण

2. अचक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण

1. चक्रीय प्रकाशफास्फोरिलीकरण (Cyclic Photophosphorylation) :- इस अभिक्रिया में केवल PS-I भाग लेता है। प्रकाश तन्त्र-I में प्रकाश ऊर्जा से P_{700} द्वारा उत्सर्जित इलेक्ट्रोन विभिन्न इलेक्ट्रोन ग्राही जैसे A(FeS), Fd → Cyt b_6 → Cyt f → प्लास्टोसाइनिन से होते हुए वापस P_{700} पर लौट आते हैं। Cytb_6 एवं Cytf के मध्य मुक्त ऊर्जा द्वारा ADP से ATP का संश्लेषण करते हैं। इस प्रकार ATP बनते हैं। इस अभिक्रिया में P_{700} से मुक्त इलेक्ट्रोन ATP का संश्लेषण करते हुए पुन: P_{700} पर लौट आते हैं इसलिए इसे चक्रीय फास्फोरिलीकरण कहते हैं।



चित्र 10.5 प्रकाशिक अभिक्रिया में सम्पन्न होने वाला चक्रीय फास्फोरिलीकरण



चित्र 10.6 प्रकाशिक अभिक्रिया में सम्पन्न होने वाला अचक्रीय फास्फोरिलीकरण

2. अचक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण (Noncyclic Photophosphorylation) :- यह फॉस्फोरिलीकरण दोनों प्रकाश तन्त्रों PS-I एवं PS-II के द्वारा होता है। इस अभिक्रिया में P_{680} द्वारा मुक्त इलेक्ट्रोन P_{680} पर लौटने की बजाय एक रेखीय पथ द्वारा इलेक्ट्रोन ग्राही फियो (Pheo) $\rightarrow$ प्लास्टोक्वीनोन $\rightarrow$ साइटोक्रोम b_6 $\rightarrow$ साइटोक्रोमf $\rightarrow$प्लास्टोसाइनिन से होते हुए P_{700} में पहुंच जाते हैं। P_{700} से इलेक्ट्रोन फैरीडॉक्सीन (Fd) से होते हुए NADP के साथ मिल जाते हैं। यह NADP जल के अपघटन से प्राप्त $2H^+$ आयनों को ग्रहण कर अंततः $NADPH+H^+$ का निर्माण करता है। इस अभिक्रिया में P_{680} से उत्सर्जित इलेक्ट्रोन पुनः P_{680} पर लौटकर नहीं आता है एवं एक स्थल PQ-Cyb_6 के मध्य ADP से ATP का निर्माण करता है। इसे अचक्रीय फॉस्फोरिलीकरण कहते हैं। इस चक्र में इलेक्ट्रोन स्थानान्तरण द्वारा ATP एवं $NADPH_2$ का निर्माण होता है एवं ऑक्सीजन निर्मुक्त होती है। अचक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण को Z स्कीम कहते हैं। चक्रीय एवं अचक्रीय प्रकार के फॉस्फोरिलीकरण का तुलनात्मक अध्ययन निम्नानुसार सारणी में दिया गया है :-

	चक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण	**अचक्रीय प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण**
1.	इसमें केवल PS-I भाग लेता है।	इसमें PS-I एवं PS-II दोनों भाग लेते हैं।
2.	जल का प्रकाशिक अपघटन नहीं होता है।	जल का प्रकाशिक अपघटन होता है।
3.	O_2 मुक्त नहीं होती है।	O_2 का निकास होता है।
4.	$NADPH_2$ का संश्लेषण नहीं होता है।	$NADPH_2$ का संश्लेषण होता है।

इस प्रकार प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया में भाग लेने वाले दोनों प्रकाश तन्त्रों द्वारा जल के अपघटन के कारण O_2 मुक्त होती है तथा ATP एवं $NADPH+H^+$ का निर्माण होता हैं। ATP एवं $NADPH+H^+$ को क्रमशः **स्वांगीकरण शक्ति** व **अपचायक शक्ति** कहा जाता है जिनका उपयोग अप्रकाशिक अभिक्रिया में CO_2 से कार्बोहाइड्रेट के निर्माण में किया जाता है।

अप्रकाशिक अभिक्रिया
(Dark Reaction)

अप्रकाशिक अभिक्रिया की खोज **ब्लैकमेन** (Blackman, 1905) द्वारा की गई थी परन्तु इसकी सभी जैव रासायनिक अभिक्रियाओं का अध्ययन **केल्विन** एवं **साथियों** द्वारा किया गया था। प्रकाश संश्लेषण की यह अभिक्रिया हरितलवक के स्ट्रोमा (Stroma) में सम्पन्न होती है एवं इसके लिए प्रकाश की आवश्यकता नहीं होती है। इस प्रकिया में वायुमण्डल से अवशोषित CO_2 का अपचयन या स्थिरीकरण कार्बोहाइड्रेट में किया जाता है। इसलिए अप्रकाशिक अभिक्रियाओं को कार्बन स्थिरीकरण भी कहां जाता है। इस अभिक्रिया में CO_2 के अपचयन हेतु आवश्यक ऊर्जा प्रकाशिक अभिक्रिया में निर्मित ATP एवं $NADPH+H^+$ से प्राप्त होती है। भिन्न-भिन्न हरे पादपों में कार्बन स्थिरीकरण की क्रिया निम्न तीन विधियों द्वारा सम्पन्न हो सकती है :-

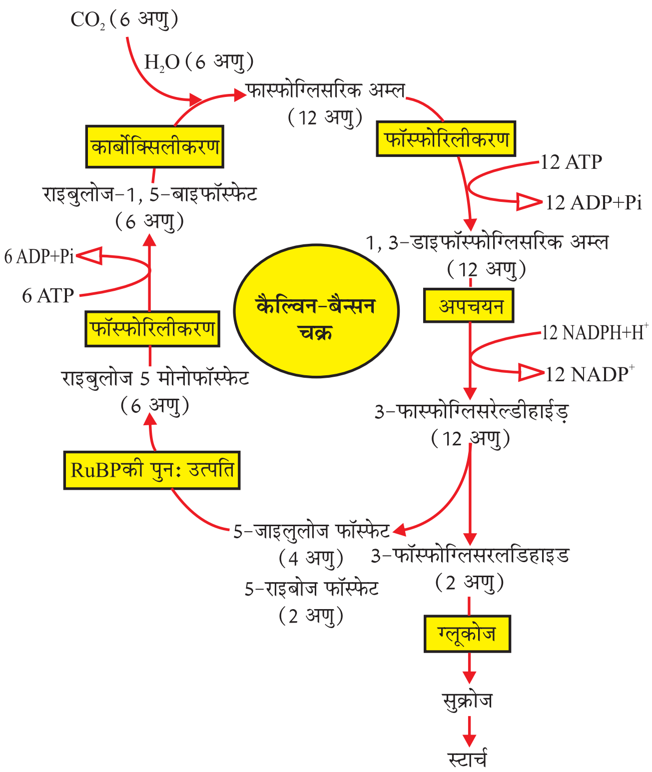
(अ) केल्विन-बैन्सन चक्र, C_3 चक्र
(Calvin- Benson Cycle, C_3 Cycle)

(ब) हैच-स्लेक चक्र, C_4 चक्र
(Hatch- Slack Cycle, C_4 Cycle)

(स) क्रेसूलेशियन अम्ल उपापचय चक्र
(Crassulacean acid Metabotism, CAM Cycle)

केल्विन-बेन्सन चक्र, C_3 चक्र
(Calvin- Benson Cycle, C_3 Cycle)

प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया में कार्बनडाईऑक्साइड का कार्बोहाइड्रेट में परिवर्तन के पथ की खोज रेडियोएक्टिव ट्रेसर तकनीक द्वारा **केल्विन, बेन्सन** एवं **साथियों ने** 1946-1953 के मध्य की थी। इस कार्य में उन्होंने *क्लोरेला (Chlorella)* एवं *सिनेडेस्मस (Scenedesmus)* नामक एककोशिक हरी शैवालों पर C^{14} कार्बन आइसोटोप युक्त $C^{14}O_2$ का प्रयोग किया था। इस अध्ययन से उन्होंनें बताया कि इस अभिक्रिया में प्रथम स्थायी उत्पाद तीन कार्बन परमाणु युक्त **3 फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल** (3PGA) बनता है। इसलिए इसे C_3 चक्र भी कहा जाता है। इस कार्य के लिए **केल्विन** एवं **बेन्सन** को 1961 में नोबेल पुरस्कार द्वारा सम्मानित किया गया। इस चक्र की महत्त्वपूर्ण अभिक्रियां निम्नानुसार हैं।



चित्र 10.7 कैल्बिन-बैंसन चक्र या C_3 चक्र का आरेख

(1) राइबुलोज मोनोफास्फेट का फॉस्फोरिलीकरण :- अप्रकाशिक अभिक्रिया में CO_2 को ग्रहण करने वाला यौगिक पंच कार्बन युक्त शर्करा राइबुलोज 1-5 बाईफॉस्फेट (RuBP) होता है। इसका निर्माण राइबुलोज मोनोफास्फेट के फॉस्फापेन्टोकाइनेज एन्जाइम एवं ATP की उपस्थिति में फास्फोरिलीकरण द्वारा होता है। एकअणु ग्लूकोज के निर्माण हेतु 6 अणु CO_2 ग्रहण करने के लिए 6 अणु राइबुलोज 1-5 बाई-फॉस्फेट की आवश्यकता होती है।

6 राइबुलोज-5-फास्फेट $\xrightarrow{\text{फॉस्फोपेन्टोकाइनेज}}$ 6 राइबुलोज 1-5-बाई फास्फेट

6ATP → 6ADP

(2) राइबुलोज 1-5 बाईफॉस्फेट का कार्बोक्सिलीकरण (कार्बोक्सिलीकरण प्रावस्था)- प्रथम फॉस्फोरिलीकरण से निर्मित राइबुलोज 1-5 बाईफॉस्फेट CO_2 ग्राही की तरह कार्य करता है। राइबुलोज 1-5 बाईफॉस्फेट के 6 अणु **कार्बोक्सिलेज** एन्जाइम की उपस्थिति में 6 अणु H_2O एवं 6 अणु CO_2 से क्रिया कर तीन कार्बन युक्त **3-फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल** (3-Phosphoglyceric acid, PGA) के 12 अणुओं का निर्माण करते हैं, जो अप्रकाशिक अभिक्रिया का प्रथम स्थायी यौगिक है।

राइबुलोज 1-5 बाईफॉस्फेट+$6CO_2$+$6H_2O$ $\xrightarrow[\text{(RuBISCO)}]{\text{RuBP कार्बोक्सिलेज}}$ 3 फास्फोग्लिरिक अम्ल (3C)
(6 अणु) (12 अणु)

(3) फोस्फोग्लिसरिक अम्ल का फॉस्फोरिलीकरण :- कार्बोक्सिकरण अभिक्रिया में निर्मित-3 फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल (3 PGA) के 12 अणु **फॉस्फोग्लिसरिक काइनेज** एन्जाइम की उपस्थिति में ATP के 12 अणुओं जो प्रकाशिक अभिक्रिया में बनते हैं; का उपयोग कर **1-3 डाईफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल** के 12 अणुओं का निर्माण करते हैं।

3 फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल $\xrightarrow{\text{फॉस्फोग्लिसरिक काइनेज}}$ 1-3 डाई फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल
(12 अणु) 12ATP → 12ADP (12 अणु)

(4) 1-3 डाईफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल का अपचयन (अपचयन प्रावस्था) :- अपचयन प्रावस्था में कार्बोक्सिकरण एवं फॉस्फोरिलीकरण सें निर्मित 12 अणु 1-3 डाईफॉस्फोग्लिरिक अम्ल का अपचयन प्रकाशिक अभिक्रिया में बनने वाली अपचयन शक्ति $NADPH+H^+$ के 12 अणुओं द्वारा होता है जिससे **3-फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड** (3 PGAL) के 12 अणुओं का निर्माण होता है। यह अभिक्रिया एन्जाइम **ट्रायोजफॉस्फेट डिहाइड्रोजिनेज** द्वारा उत्प्रेरित होती है।

1-3 डाईफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल $\xrightarrow{\text{ट्रायोज फॉस्फेट डि हाइड्रोजिनेज}}$ 3 फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड +$12H_3PO_4$
(12 अणु) $NADPH+H^+$ → $NADP^+$ (12 अणु)

उपरोक्त 3-फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड के 12 अणुओं मे से केवल 2 अणु शर्करा (ग्लूकोज) का निर्माण करते हैं जो बाद में सुक्रोज अथवा स्टार्च में रूपान्तरित हो जाती हैं। शेष 10 अणु पुनर्योजन जैवरासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा 6 अणु राइबुलोज मोनोफॉस्फेट का निर्माण करते हैं जो पुन: क्रिया में भाग लेकर केल्विन चक्र को निरन्तरता प्रदान करते हैं।

(5) हेक्सोज शर्करा का निर्माण (संश्लेषण प्रावस्था) :- अपचयन प्रावस्था में निर्मित 12 अणु फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड में से केवल 2 अणु निम्न जैव रासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा ग्लूकोज का एक अणु बनाते हैं।

(i) 3-फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड (3PGAL) $\xrightarrow{\text{फॉस्फोट्रायोज आईसोमरेज}}$ 3-डाईहाइड्रोक्सी एसिटोन फास्फेट (3-DHAP)

(ii) 3-फॉस्फोग्लिसरेल्डिहाइड + 3 डाईहाइड्रॉक्सीएसिटोन फास्फेट (एक अणु) $\xrightarrow{\text{एल्डोलेज}}$ फ्रक्टोज 1-6 डाईफॉस्फेट (एक अणु)

(iii) फ्रक्टोज 1-6 डाईफॉस्फेट $\xrightarrow{\text{फास्फेटेज}}$ फ्रक्टोज-6 फॉस्फेट + H_3OPO_4

(iv) फ्रक्टोज 6 फॉस्फेट $\xrightarrow{\text{आईसोमरेज}}$ ग्लूकोज 6 फॉस्फेट

(v) ग्लूकोज 6- फॉस्फेट + H_2O $\longrightarrow$ ग्लूकोज + H_3PO_4

उपरोक्त सभी क्रियाएँ श्वसन के ग्लाइकोलाइसिस प्रक्रिया के विपरीत क्रम में होने के कारण इसे **ग्लाइकोलाइटिक उत्क्रमण** (Glycolytic reversion) भी कहा जाता है।

(6) राइबुलोज-5 फॉस्फेट की पुन: उत्पति (पुनर्योजन प्रावस्था):- कैल्विन-बैन्सन चक्र के प्रारम्भ में 6 अणु राइबुलोज बाईफास्फेट वायुमण्डल से 6 अणु CO_2 ग्रहण कर 12 अणु फॉस्फोग्लिरिक अम्ल बनाते हैं। 5-राइबुलोज बाई-फास्फेट का निर्माण राइबुलोज 5-फास्फेट से फॉस्फोरिलीकरण क्रिया द्वारा होता है। अत: चक्र की निरन्तरता के लिए प्रत्येक चक्र के अन्त में 5-राइबुलोज मोनोफॉस्फेट का उत्पन्न होना जरूरी। अत: 3-PGAL के 10 अणुओं द्वारा विभिन्न जैव रासायनिक अभिक्रियाओं के माध्यम से RuMP के 6 अणुओं का निर्माण पुनर्निर्माण या पुनर्योजन प्रावस्था कहलाता है। पुनर्योजन अभिक्रियाएँ निम्नानुसार हैं :-

(i) डाइहाइड्रोक्सी ऐसिटोन फॉस्फेट का निर्माण :-ट्रायोज फॉस्फेट आइसोमेरेज एन्जाइम की उपस्थिति में 3-PGAL के 4 अणुओं से DHAP के चार अणु बनते हैं :-

3-PGAL (4 अणु) $\xrightarrow{\text{ट्रायोज फॉस्फेट आइसोमेरेज}}$ DHAP (4 अणु)

(ii) फ्रक्टोज 1-6 डाइफास्फेट का निर्माण :- PGAL एवं DHAP दोनों के दो-दो अणु एल्डालेज एन्जाइम की उपस्थिति में क्रिया कर 2 अणु फ्रक्टोज 1-6 डाइफॉस्फेट का निर्माण करते हैं।

3-PGAL + DHAP (2 अणु) $\xrightarrow{\text{एल्डोलेज}}$ फ्रक्टोज 1-6 डाइफॉस्फेट (2 अणु)

(iii) फ्रक्टोज 6-फॉस्फेट का निर्माण :- फ्रक्टोज 1-6 डाईफास्फेट जलयोजन द्वारा फास्फेटेज एन्जाइम की उपस्थिति में फ्रक्टोज-6 फास्फेट का निर्माण करता हैं।

फ्रक्टोज 1-6 डाईफास्फेट + $2H_2O$ (2 अणु) $\xrightarrow{\text{फास्फेटेज}}$ फ्रक्टोज 6-फॉस्फेट+$2H_3PO_4$ (2 अणु)

(iv) जाइलुलोज व इरिथ्रोज फॉस्फेट का निर्माण :- फ्रक्टोज 6-फॉस्फेट के 2 अणु PGAL के दो अणुओं से मिलकर ट्रांसकीटोलेज एन्जाइम की उपस्थिति में 2-2 अणु जाइलुलोज-5 फॉस्फेट एवं इरिथ्रोज-4 फॉस्फेट का निर्माण करते हैं।

फ्रक्टोज 6-फॉस्फेट (2 अणु) + 3-PGAL (2 अणु) $\xrightarrow{\text{ट्रांसकीटोलेज}}$ 2 जाइलुलोज-5 फॉस्फेट + 2 इरिथ्रोज-4 फॉस्फेट

(v) सिडोहेप्टुलोज 1-7 डाइफॉस्फेट का निर्माण :- इरिथ्रोज-4 फास्फेट के 2 अणु शेष बचे DHAP के 2 अणुओं से अभिक्रिया कर 2 अणु सिडोहेप्टुलोज 1-7 डाइफॉस्फेट का निर्माण करते हैं। इस अभिक्रिया का उत्प्रेरण ट्रांसएल्डोलेज एन्जाइम द्वारा किया जाता है।

इरिथ्रोज 4-फॉस्फेट (2 अणु) + DHAP (2 अणु) $\xrightarrow{\text{ट्रांसएल्डोलेज}}$ सिडोहेप्टुलोज 1-7 डाइफॉस्फेट (2 अणु)

इस अभिक्रिया में निर्मित सिडोहेप्टुलोज 1-7 डाइफॉस्फेट फॉस्फेटेज एन्जाइम की उपस्थिति में जल योजन द्वारा दो दो अणु फास्फोरिक अम्ल एवं सिडोहेप्टुलोज 7-फोस्फेट का निर्माण करते हैं।

सिडोहेप्टुलोज 1-7 डाइफॉस्फेट $\xrightarrow[2H_2O \;\rightarrow\; 2H_3PO_4]{\text{फोस्फेटेज}}$ सिडोहेप्टुलोज 7-फोस्फेट

(vi) राइबोज-5-फोस्फेट एवं जाइलुलोज 5- फोस्फेट का निर्माण :- सिडोहेप्टुलोज 7-फोस्फेट के दो अणु, शेष बचे **3-PGAL** के दो अणुओं से ट्रांसकीटोलेज एन्जाइम की उपस्थिति में अभिक्रिया कर दो अणु राइबोज-5-फॉस्फेट एवं 2 अणु जाइलुलोज 5- फोस्फेट का निर्माण करते हैं।

सिडोहेप्टुलोज 7-फोस्फेट (2 अणु) + 3-PGAL (2 अणु) $\xrightarrow{\text{ट्रांसकीटोलेज}}$ 2 राइबोज-5-फोस्फेट + 2 जाइलुलोज-5- फोस्फेट

(vii) उपरोक्त अभिक्रिया से निर्मित चार अणु जाइलुलोज-5-फोस्फेट एवं दो अणु राइबोज-5-फॉस्फेट निम्नानुसार अभिक्रिया कर 6 अणु जाइलुलोज-5-फॉस्फेट (RuMP) का निर्माण करते हैं।

(i) राइबोज-5-फॉस्फेट (2 अणु) $\xrightarrow{\text{फॉस्फो पेन्टो आइसोमेरेज}}$ राइबुलोज-5 फॉस्फेट (2 अणु)

(ii) जाइलुलोज-5-फॉस्फेट (4 अणु) $\xrightarrow{\text{फॉस्फो पेन्टो एपिमेरेज}}$ राइबुलोज-5 फॉस्फेट (4 अणु)

इस प्रकार पुनर्योजन प्रावस्था द्वारा 6 अणु राइबुलोज-5 फॉस्फेट का निर्माण होता है जो 6 अणु ATP से फॉस्फोरिलीकृत होकर 6 अणु राइबुलोज-1-5 डाईफॉस्फेट का निर्माण कर लेते हैं। जो पुन: कैल्विन चक्र की अभिक्रियाओं में प्रयुक्त होते हैं।

(ब) हैच-स्लैक चक्र, C_4 चक्र

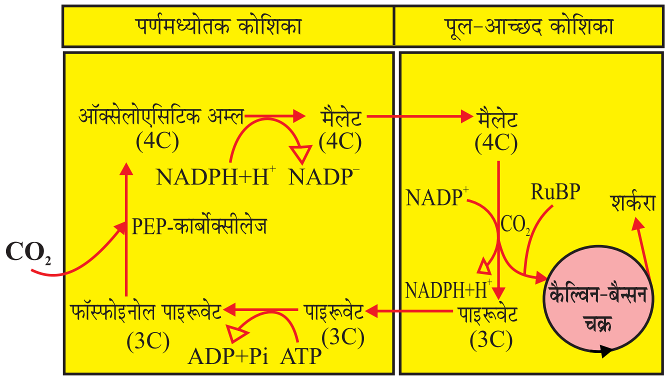
(Hatch-Slack Cycle Or C_4 Cycle)

केपरीलोव (Kaprilav, 1960) ने मक्का पर तथा **कोर्टचाक** (C.E. Korts Chak, 1965) एवं सहयोगियों ने गन्ने की पत्तियों पर प्रकाश संश्लेषण के अध्ययनों में पाया कि CO_2 ग्रहण करने के पश्चात प्रथम स्थायी यौगिक C_3 चक्र के अनुरूप 3PGA न होकर चार कार्बन युक्त ऑक्सेलो ऐसीटिक अम्ल (OAA) बनता है। कुछ समय पश्चात **हैच तथा स्लेक** (M.D. Hatch and C.R. Slack, 1966) ने उपरोक्त परिणामों की पुष्टी की एवं इस चक्र का पूर्ण परिपथ खोज निकाला। इसलिए इस परिपथ को **हैच-स्लेक चक्र** कहते हैं। प्रथम स्थायी यौगिक 4 कार्बन युक्त होने के कारण इसे **C_4 चक्र** भी कहा जाता हैं। यह चक्र एकबीजपत्री पौधों (मक्का, बाजरा, गन्ना) के अतिरिक्त कुछ द्विबीजपत्री पादपों जैसे *अमरेंथस, यूफोरबिया* व अन्य में पाया जाता है।

C_4 पादपों की संरचनात्मक विशिष्टता :- C_4 पादपों की पत्तियों में दो प्रकार की प्रकाश संश्लेषी कोशिकाएँ पायी जाती हैं जिन्हें क्रमशः **पर्णमध्योतक कोशिकाऐं** (Mesophyll Cells) व **पूलआच्छद कोशिकाऐं** (Bundle Sheath Cell) कहा जाता है। पूल आच्छद कोशिकाऐं संवहन पूल के चारों ओर एक या दो स्तरों में माला रूपी स्वरूप में व्यवस्थित रहती हैं। जर्मन भाषा में माला (Wreath) को **क्रेंज** (Krantz) कहा जाता है अतः पत्तियों की इस शारीरिकी को **क्रेंज शारीरिकी** (Kranz anatomy) कहते हैं। C_4 पादपों की पत्तियों में दो प्रकार के हरितलवक पाये जाते हैं। पर्ण मध्योतक कोशिकाओं में उपस्थित हरित लवक छोटे एवं सुविकसित ग्रेना युक्त होते हैं, जबकि पूल आच्छद कोशिकाओं में पाये जाने वाले हरितलवक आकार में बड़े व ग्रेना विहीन होते हैं। थाइलेकॉइड केवल स्ट्रोमा पट्टलिकाओं के रूप में पाये जाते हैं। अतः C_4 पादपों में प्रकाशिक अभिक्रिया पर्ण मध्योतक कोशिकाओं में तथा अप्रकाशिक अभिक्रिया (CO_2 का स्वांगीकरण) पूल आच्छद कोशिकाओं में सम्पन्न होती है।

C_4 चक्र की क्रिया विधि (Mechanism of C_4 Cycle) :- C_4 चक्र में वायुमण्डल से CO_2 रंध्रों द्वारा पर्ण मध्योत्तक कोशिकाओं के कोशिकाद्रव्य में प्रवेश करती है। इस CO_2 को तीन कार्बन युक्त फॉस्फोइनोल पाइरूविक अम्ल (PEP) द्वारा ग्रहण कर PEP कार्बोक्सिलेज एन्जाइम की उपस्थिति में चार कार्बन युक्त यौगिक आक्सेलो ऐसीटिक अम्ल (Oxalo acetic acid, OAA) में परिवर्तित कर दिया जाता हैं। तत्पश्चात ओक्सेलो ऐसीटिक अम्ल का मैलिक अम्ल में अपचयन होता है एवं इस चरण में $NADPH+H^+$ का ऑक्सीकरण होता है जिससे $NADP^+$ बनता है।

मैलिक अम्ल पर्ण मध्योतक कोशिकाओं से पूल आच्छद कोशिकाओं में प्रवेश करता है। इसके डिकार्बोक्सिलीकरण से CO_2 मुक्त होती है तथा यह पाइरूविक अम्ल में परिवर्तित हो जाता है। पाइरूविक अम्ल पुनः पर्ण मध्योतक कोशिकाओं मे प्रवेश कर ATP अणु से जुड़कर फॉस्फोइनोल पाइरूविक अम्ल का निर्माण करता है जो इस चक्र को निरन्तरता प्रदान करता है। पूल आच्छद कोशिकाओं से मुक्त CO_2, C_3 चक्र में प्रवेश कर शर्करा का निर्माण करती है इस प्रकार पर्ण मध्योतक कोशिकाओं में C_4 चक्र द्वारा CO_2 संग्रहित की जाती है एवं पूल आच्छद कोशिकाओं में C_3 चक्र द्वारा CO_2 का स्थिरीकरण शर्करा में किया जाता है।



चित्र 10.8 हैच-स्लैक चक्र या C_4 चक्र का आरेख

C_4 चक्र व C_4 पादपों की विशेषताएँ

(i) C_4 पादप CO_2 की अत्यधिक कम सांन्द्रता पर भी प्रकाश संश्लेषण करने में सक्षम होते हैं, अतः जैविक दृष्टि से महत्त्वपूर्ण हैं।

(ii) C_4 पादपों में प्रकाशश्वसन अनुपस्थित होने से इनकी उत्पादकता C_3 पादपों की तुलना में अधिक होती है।

(iii) C_4 चक्र का प्रमुख एन्जाइम (PEP Carboxylase) CO_2 की कम सान्द्रता पर भी क्रियाशील रहता है।

(iv) C_4 पादप कम जल वाले स्थानों एवं उच्च तापक्रम (30-45°C) वाले क्षेत्रों में भी आसानी से उगाये जा सकते हैं।

उपरोक्त विशेषताओं से स्पष्ट है कि C_4 पादप उष्णकटिबन्ध के सर्वाधिक सफल पादप हैं।

C_3 एवं C_4 चक्र में प्रमुख अन्तर

	लक्षण	C_3 चक्र	C_4 चक्र
1.	अनुकूल तापमान	10–25 C^0	30–40 C^0
2.	क्रेंज शारीरिकी	अनुपस्थित	उपस्थित
3.	प्रथम स्थायी उत्पाद	फास्फोग्लिसरिक अम्ल (3C)	ऑक्सेलोऐसीटिक अम्ल (4C)
4.	CO_2 का स्थिरीकरण स्थल	केवल पर्ण मध्योतक कोशिकाएँ	पर्ण मध्योतक एवं पूलआच्छद कोशिका
5.	CO_2 का प्रथम ग्राही	RuBP (पंचकार्बन यौगिक)	PEP (तीन कार्बन यौगिक)
6.	कार्बोक्सिलीकरण के लिए	RUBISCO	PEP कार्बोक्सिलेज एवं RUBISCO
7.	प्रकाश श्वसन	उपस्थित	अनुपस्थित
8.	उत्पादकता	नष्टकारी प्रकाश श्वसन के कारण कम	नष्टकारी श्वसन की अनुपस्थिति के कारण अधिक

(स) क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय चक्र
(Crassulacean Acid Metabolic Cycle)

क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय सामान्यत: माँसल एवं शुष्क वातावरण में पाये जाने वाले पौधों में मिलती है। इन पौधों की पत्तियां मोटी माँसल एवं गूदेदार होती हैं तथा इनके रंध्र (Stomata) रात्रि के समय खुलते हैं एवं दिन में बन्द रहते हैं। ऐसे रन्ध्रों को **तिमिर सक्रिय** (Scotoactive) रन्ध्र कहते हैं। इन पादपों में रात्रि के समय पत्तियाँ CO_2 का अवशोषण करती हैं। इनकी पर्णमध्योतक कोशिकाओं में उपस्थित PEP, CO_2 को ग्रहण कर 4 कार्बन यौगिक ऑक्सेलोऐसीटिक अम्ल का निर्माण करता है। ऑक्सेलोऐसीटिक अम्ल मैलिक अम्ल में परिवर्तित हो जाता है। इस प्रकार रात्रि में CO_2 का स्थिरीकरण मैलिक अम्ल के रूप में होता है।

दिन के समय मैलिक अम्ल के डीकार्बोक्सिलीकरण से CO_2 मुक्त हो जाती है जो हरितलवक में विसरित होकर कैल्विन चक्र के माध्यम से कार्बोहाइड्रेट में अपचयित हो जाती है। इस चक्र की महत्त्वपूर्ण विशेषता यही है कि इसमें CO_2 स्थिरीकरण की प्रक्रिया रात्रि में तथा CO_2 का अपचयन एवं शर्करा निर्माण की प्रक्रिया दिन में एक ही कोशिका में सम्पन्न होती है। यह चक्र मांसलोद्भिद् (Succulents) एवं शुष्कोद्भिद् पादपों मे पाया जाने वाला कार्यिकी अनुकूलन है जिसके द्वारा जल हानि किये बिना ही पौधे कार्बनिक पदार्थो का निर्माण कर लेते हैं। इस उपापचयी अभिक्रिया का सर्वप्रथम अध्ययन क्रेसूलेसी कुल के पादपों पर किया गया था इसलिए इसे क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय कहते हैं। कुछ प्रमुख CAM पादप हैं – *ऐगेव, यक्का, क्रेसूला, अनानास,* नागफनी, *इकाइनोकैक्टस* आदि।

प्रकाशश्वसन
(Photorespiration)

पौधों के प्रकाश संश्लेषी भागों में **प्रकाश की उपस्थिति** में सामान्य श्वसन के अतिरिक्त होने वाला श्वसन जिसमें ऑक्सीजन द्वारा कार्बनिक यौगिकों का ऑक्सीकरण होता है परन्तु ऊर्जा उत्पादन बिल्कुल नहीं होता है एवं CO_2 विमुक्त होती है, को प्रकाशश्वसन कहते हैं। इस क्रिया में भोज्य पदार्थो का श्वसन अभिक्रिया की तरह विघटन होता है परन्तु ऊर्जा मुक्त नहीं होती है इसलिए इसे नष्टकारी क्रिया भी कहा जाता है। प्रकाशश्वसन शब्द का प्रथम प्रयोग **क्रोटकोव** (Krotkov, 1963) द्वारा किया गया था। यह क्रिया केवल C_3 पादपों में होती है। **ऑटो वारबर्ग** (Otto Warberg, 1920) ने बताया कि O_2 की उपस्थिति प्रकाश संश्लेषण दर को संदभित (Retard) करती है। ऑक्सीजन के इस प्रभाव को **वारबग प्रभाव** (Warberg effect) कहा जाता हैं। **ओरेगन** तथा **बौ** (Oregen and Bow, 1971) ने बारबर्ग प्रभाव का स्पष्टीकरण प्रस्तुत करते हुए बताया कि O_2 एवं CO_2 में RUBISCO के लिए प्रतिस्पर्धा होती है। CO_2 की अधिकता में RUBISCO कार्बोक्सीलेज की भांति जबकि ऑक्सीजन की अधिकता में यह कार्बोक्सिलेज के स्थान पर ऑक्सीजिनेज एन्जाइम की तरह कार्य करता है जिससे RUBISCO आक्सीकृत फास्फोग्लाइकोलिक अम्ल (दो कार्बन युक्त यौगिक) का निर्माण करता है। इसलिए इसे **C_2 चक्र** अथवा **ग्लाइकोलेट चक्र** भी कहते हैं। इस कारण से PGA का निर्माण अवरूद्ध हो जाता है तथा कार्बन डाई ऑक्साइड की स्वांगीकरण दर कम हो जाती है। इस चक्र का अध्ययन **डेकर एवं टिओ** (Decker and Tio, 1959) द्वारा किया गया था। प्रकाशीय श्वसन की सम्पूर्ण अभिक्रिया हरितलवक, परऑक्सीसोम व माइटोकॉण्ड्रिया नामक तीन कोशिकांगों में पूर्ण होती हैं। उपरोक्त तीनों कोशिकांग प्रकाश श्वसन में एक इकाई के रूप में कार्य करते हैं।

प्रकाश संश्लेषण को प्रभावित करने वाले कारक
(Factors affecting Photosynthesis)

विभिन्न जैव रासायनिक क्रियाओं के समान ही प्रकाश संश्लेषण भी वातावरणीय व आनुवंशिक कारकों द्वारा प्रभावित होती है। ये कारक बाह्य एवं आन्तरिक प्रकार के होते है। बाह्य कारक या पर्यावरणीय कारक (External or Environmental Factors) प्रकाश, CO_2 की उपलब्धता, तापमान, मृदाजल आदि हैं जो प्रकाश संश्लेषण अभिक्रिया को प्रत्यक्ष या परोक्ष रूप से प्रभावित करते हैं। इन कारकों को

विस्तृत अध्ययन से पूर्व **सेक्स की प्रधान बिन्दु संकल्पना** तथा **ब्लैकमेन के सीमाकारी नियम** का अध्ययन आवश्यक है।

सेक्स की प्रधान बिन्दु संकल्पना (Sach's Cardinal Point hypothesis) :- **सेक्स** (Sach's, 1860) द्वारा प्रतिपादित **प्रधान बिन्दु संकल्पना** (Cardinal point hypothesis) के अनुसार प्रकाश संश्लेषण व किसी भी अन्य कार्यिकी क्रिया को प्रभावित करने वाले कारक के तीन प्रमुख मान (Value) होते हैं।

(i) न्यूनतम मान या बिन्दु - कारक की वह मात्रा जिस पर प्रकाश संश्लेषण की क्रिया प्रारम्भ होती है।

(ii) श्रेष्ठतम या अनुकूलतम मान बिन्दु - कारक की उस मात्रा को प्रदर्शित करता है जिस पर प्रकाश संश्लेषण की दर अधिकतम होती हैं।

(iii) अधिकतम मान या बिन्दु - कारक की वह मात्रा है जिस पर प्रकाश संश्लेषण अभिक्रिया रूक जाती है।

इन तीनों अवस्थाओं को **प्रधान बिन्दु** (Cardinal Points) कहा जाता है।

ब्लैकमेन का सीमाकारी कारकों का सिद्धान्त (Blackman's theory of limiting factors) - **ब्लैकमेन** (Blackman 1905) ने सीमाकारी कारकों का सिद्धान्त प्रतिपादित किया। यह सिद्धान्त वास्तव में पूर्व प्रकाशित **लिबिग का निम्नतम का नियम** (Lebeig's law of minimum) का रूपान्तरण है। ब्लैकमेन के सीमाकारी नियमानुसार यदि कोई प्रक्रिया अनेक कारकों द्वारा प्रभावित होती है, तो अमुक समय में उस प्रक्रिया की दर उस कारक पर निर्भर करती है या उस कारक से सीमित होती है, जो सबसे कम मात्रा में उपस्थित होता है। सीमाकारी कारक में वृद्धि होने से प्रकाश संश्लेषण की दर में भी वृद्धि होती है। जैसे प्रकाश संश्लेषण के लिए प्रकाश उपलब्ध है, परन्तु CO_2 नही हैं। इस स्थिति में प्रकाश संश्लेषण की दर CO_2 की उपलब्धता पर निर्भर करती है। अगर CO_2 एवं प्रकाश दोनों सीमाकारी हैं तो प्रकाश संश्लेषण की दर अधिक सीमाकारी कारक की मात्रा पर निर्भर करेगी।

बाह्य कारक या पर्यावरणीय कारक

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया को प्रभावित करने वाले बाह्यकारक निम्नांकित है :- प्रकाश, तापक्रम, कार्बन डाईऑक्साइड, जल, ऑक्सीजन आदि।

(i) प्रकाश :- प्रकाश संश्लेषण की अभिक्रिया प्रकाश वर्णक्रम के दृश्यमान भाग में ही सम्पन्न होती है जिसका मान 400nm से 700nm के मध्य होता है एवं इसे PAR (Photosynthetically Active Radiations, प्रकाशसंश्लेषीय सक्रिय विकिरण) कहते हैं। प्रकाश संश्लेषण प्रकाश की तीव्रता एवं उसके प्रकार से प्रभावित होती है। प्रकाश संश्लेषण की सर्वाधिक दर दृश्य स्पेक्ट्रम के लाल क्षेत्र में एवं उससे थोड़ी कम नीले क्षेत्र में होती है। हरे रंग में प्रकाश संश्लेषण नहीं होता है। क्योंकि पत्तियाँ इसको अवशोषित नहीं करती हैं। प्रकाश की तीव्रता में वृद्धि से प्रारम्भ में प्रकाश संश्लेषण की दर बढती है, परन्तु उच्च प्रकाश तीव्रता पर इस क्रिया की दर घट जाती है। क्योंकि या तो प्रकाश संश्लेषण को प्रभावित करने वाले अन्य कारक सीमाकारी हो जाते हैं अथवा हरितलवक एवं अन्य कोशिकीय अवयव प्रकाश ऑक्सीकरण द्वारा नष्ट हो जाते हैं, जिसे **आतपन** (Solarization) कहते हैं।

(ii) तापक्रम :- प्रकाश संश्लेषण की क्रिया तापक्रम की व्यापक परास सीमाओं में सम्पन्न होती है। कुछ कोनीफर्स (Conifers) में जैसे - जूनीपैरस में - 35^0C तापक्रम पर भी प्रकाश संश्लेषण की क्रिया सामान्य रूप से हो सकती है। कुछ मरूद्भिद् पादपों में 55^0C एवं गर्म जल में पायी जाने वाली शैवालें 75^0C तापक्रम पर भी प्रकाश संश्लेषण कर सकती हैं। अधिकतर पादपों में प्रकाश संश्लेषण की दर 10^0C से 35^0C पर तेजी से बढती है। परन्तु कुछ समय पश्चात इसमें कमी आने लगती है, क्योंकि उच्च ताप पर प्रकाश संश्लेषी एन्जाइम विकृत (Denature) होने लगते है तथा C_3 चक्र के प्रमुख एन्जाइम RUBISCO की CO_2 के प्रति बंधुता घट जाती हैं।

(iii) कार्बन डाइऑक्साइड :- वायुमण्डल में CO_2 की मात्रा 0.03% (300 ppm) होती है। वातावरण में जैसे-जैसे CO_2 की मात्रा बढती है, वैसे वैसे प्रकाश संश्लेषण की दर में भी कुछ समय तक वृद्धि होती रहती है एवं यह वृद्धि अन्य कारक के सीमाकारी होने तक जारी रहती है। सामान्यत: प्रकाश संश्लेषण की दर में वृद्धि CO_2 की 1% सान्द्रता तक होती है, परन्तु इससे अधिक CO_2 सान्द्रता पादपों पर विषाक्त प्रभाव डालती है जिससे रंध्र बन्द हो जाते हैं, गैसों का विनिमय घट जाता है। C_3 पादपों में CO_2 की सान्द्रता 0.05% बढने के साथ साथ प्रकाश संश्लेषण की दर बढती है जबकि C_4 पादपों में प्रकाश संश्लेषण की दर CO_2 की 0.03% सान्द्रता तक ही बढती है।

(iii) जल (Water) :- जल प्रकाश संश्लेषण अभिक्रिया का एक प्रमुख अभिकारक है क्योंकि यह अभिक्रिया में हाइड्रोजन दाता के रूप में कार्य करता है। पादपों द्वारा कुल अवशोषित जल का केवल 1% भाग ही प्रकाश संश्लेषण में उपयोग किया जाता है। अत: यह प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में सीमाकारी कारक नहीं होता है। यह अप्रत्यक्ष रूप से प्रभावकारी होता है। मृदा जल की अधिक कमी होने पर यह सीमाकारी कारक बन जाता है एवं प्रकाश संश्लेषण की दर को अप्रत्यक्ष रूप से प्रभावित करता है। जल की कमी से रंध्र बन्द हो जाते हैं, जिससे गैसीय विनिमय रूक जाता है तथा पर्ण का जल विभव कम हो जाता है।

(iv) ऑक्सीजन (Oxygen) :- ऑक्सीजन की सान्द्रता में वृद्धि भी प्रकाश संश्लेषण की अभिक्रियाओं को प्रभावित करती है। यह

RUBISCO के लिए प्रतिस्पर्धात्मक संदमक का कार्य करती है। C_3 पादपों में ऑक्सीजन की सान्द्रता में वृद्धि होने पर RUBISCO कार्बोक्सिलेज की जगह ऑक्सीजिनेज एन्जाइम की तरह व्यवहार करने लगता है जिससे प्रकाशीय श्वसन प्रारम्भ हो जाता है।

आन्तरिक कारक (Internal Factors)

प्रकाश संश्लेषण की दर कई प्रकार के आन्तरिक कारकों से प्रभावित होती है। जिनमें कुछ महत्त्वपूर्ण कारक निम्न हैं :-

(1) पर्णहरित (Chlorophyll) :- पर्णहरित प्रकाश संश्लेषण क्रिया का प्रमुख वर्णक है जो प्रकाशीय ऊर्जा को रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करता है। सामान्यत: प्रकाश संश्लेषण की दर पर्ण हरित की मात्रा बढने पर बढती है, यदि अन्य कारको को मानक रखा जाऐं।

(2) संचित भोजन की मात्रा (Amount of stored food):- पादप की कोशिकाओं में प्रकाश संश्लेषी अन्तिम उत्पादों का संचय होता रहता है। इनका निरन्तर संचय प्रकाश संश्लेषण की दर को कम कर देता है परन्तु इन उत्पादों का पादप के दूसरे भागों में स्थानान्तरण होने पर यह दर पुन: बढ जाती है।

(3) पत्ती की आन्तरिक संरचना (Internal structure of leaf) :- प्रकाश संश्लेषण की दर रंध्रों की संख्या, वितरण एवं उनकी संरचना पर निर्भर करती है। रन्ध्रों की अधिक संख्या एवं अधिक समय तक खुला रहना अधिक CO_2 अवशोषण को प्रेरित करता है जिससे प्रकाश संश्लेषण की दर बढ जाती हैं।

महत्त्वपूर्ण बिन्दु

(1) प्रकाश संश्लेषण एक महत्त्वपूर्ण जैविक प्रकिया है जिसमें हरे पादप सूर्य के प्रकाश की उपस्थिति में CO_2 एवं जल द्वारा कार्बनिक यौगिकों का निर्माण करते हैं।

(2) प्रकाश संश्लेषण की अभिक्रिया में जल का ऑक्सीकरण एवं CO_2 का अपचयन होता है।

(3) प्रकाश संश्लेषण हरितलवक में सम्पन्न होती है क्योंकि इसमें विभिन्न प्रकार के वर्णक जैसे पर्णहरित, कैरोटिनॉइड आदि पाये जाते हैं।

(4) हरितलवक के ग्रेना भाग में प्रकाशिक अभिक्रिया एवं स्ट्रोमा भाग में अप्रकाशिक अभिक्रिया सम्पन्न होती हैं।

(5) पर्णहरित-a एक सार्वत्रिक वर्णक है, जो प्रकाशिक अभिक्रिया में अभिक्रिया केन्द्र की तरह कार्य करता है। सहायक वर्णकों द्वारा अवशोषित ऊर्जा को अन्त में अभिक्रिया केन्द्र को स्थानान्तरित कर दिया जाता है।

(6) प्रकाशिक अभिक्रिया में दो प्रकार के प्रकाश तन्त्र (PS-I एवं PS-II) आवश्यक होते हैं। PS-I में 680nm से उच्च एवं PS-II मे 680nm से निम्न तरंग दैर्ध्य वाले प्रकाश का अवशोषण होता है।

(7) प्रकाश संश्लेषण की स्वतन्त्र इकाई क्वाण्टासोम कहलाती है जो दानेदार संरचना के रूप में थाइलेकॉइड की झिल्ली में विद्यमान होती है। यह प्रकाश ऊर्जा को ग्रहण करती है।

(8) पादप को केवल 680nm से उच्च तरंग दैर्ध्य का प्रकाश देने पर प्रकाश संश्लेषण की दर में तीव्रता से कमी आना रेड ड्राप (लाल पतन) कहलाता है।

(9) प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया में जल का प्रकाशिक अपघटन होता है जिससे O_2 मुक्त होती है। इस क्रिया में PSII भाग लेता है। इस क्रिया में मुक्त होने वाले इलेक्ट्रोन, इलेक्ट्रोन परिवहन शृंखला में भाग लेकर ATP एवं $NADPH_2$ का निर्माण करते है। जिनका उपयोग CO_2 के अपचयन में किया जाता है।

(10) CO_2 का अपचयन स्ट्रोमा में होता है। RUBISCO एन्जाइम प्रारम्भिक क्रिया को उत्प्रेरित करता है जिससे 3 कार्बन युक्त 3-PGA का निर्माण होता हैं। इसलिए इस चक्र को C_3 चक्र कहते हैं। इसकी खोज करने वाले वैज्ञानिकों के नाम के आधार पर इसे कैल्विन-बेनसन चक्र भी कहते हैं।

(11) कुछ उष्णकटिबंधीय पादपों में कार्बन स्थिरीकरण का प्रथम उत्पाद 4 कार्बन युक्त ऑक्सेलोऐसिटेट होता है। इन पादपों को C_4 पादप व चक्र को C_4 चक्र कहते हैं।

(12) प्रकाश संश्लेषण में CO_2 के एक अणु के अपचयन के लिए 4 इलेक्ट्रोन का स्थानान्तरण एवं 8 फोटोन की आवश्यकता होती है जिससे 2ATP एवं $2NADPH_2$ बनते हैं।

(13) प्रकाश संश्लेषण की दर कई वातावरणीय कारकों पर निर्भर करती है। जैसे CO_2 की सान्द्रता, जल उपलब्धता, प्रकाश तीव्रता, तापमान इत्यादि

(14) प्रकाश संश्लेषण का अन्तिम उत्पाद सूक्रोज है एवं यह फ्लोयम द्वारा पर्ण से विभिन्न भागों में स्थानान्तरित होकर स्टार्च के रूम में संग्रहित रहता है।

अभ्यासार्थ प्रश्न

बहुवैकल्पिक प्रश्न

(1) पर्णहरित अणु के केन्द्र में कौनसा तत्व पाया जाता हैं

(अ) Fe (ब) Mg

(स) Ni (द) Cu

(2) वर्णक तन्त्र-II का सम्बन्ध है :-

(अ) जल के प्रकाशीय अपघटन से

(ब) CO_2 के अपचयन से

(स) पुष्पन से

(द) उपरोक्त सभी से

(3) प्रकाश तन्त्र-I व प्रकाश तन्त्र-II में अभिक्रिया केन्द्र हैं, - क्रमशः -

(अ) P_{700} एवं P_{680} (ब) P_{680} एवं P_{700}

(स) P_{580} एवं P_{700} (द) P_{700} एवं P_{580}

(4) O_2 का उत्पन्न होना किससे सम्बन्धित है -

(अ) PS-I (ब) PS-II

(स) फाइटोक्रोम (द) उपरोक्त सभी

(5) C_3 एवं C_4 पौधों में एक प्रमुख अन्तर करने वाली प्रक्रिया क्या है :-

(अ) ग्लाइकोलाइसिस (ब) प्रकाशीय श्वसन

(स) वाष्पोत्सर्जन (द) प्रकाश संश्लेषण

(6) प्रकाश संश्लेषण की इकाई है :-

(अ) क्वान्टासोम (ब) माइक्रोसोम

(स) पराक्सीसोम (द) स्फीरोसोम

(7) जल के प्रकाशीय अपघटन हेतु आवश्यक होता है :-

(अ) Mn (ब) Mg

(स) Zn (द) Fe

(8) प्रकाश संश्लेषण क्रिया के दौरान :-

(अ) CO_2 एवं जल दोनों का ऑक्सीकरण होता है

(ब) CO_2 एवं जल दोनों का अपचयन होता है

(स) जल का अपचयन व CO_2 का ऑक्सीकरण होता है

(द) CO_2 का अपचयन एवं जल का ऑक्सीकरण होता है

(9) प्रकाश संश्लेषण में विमुक्त ऑक्सीजन का स्रोत है

(अ) जल (ब) CO_2

(स) उपरोक्त दोनों (द) उपरोक्त में से कोई नहीं

(10) प्रकाश संश्लेषण की अप्रकाशिक अभिक्रिया सम्पन्न होती है :-

(अ) ग्रेना में (ब) स्ट्रोमा में

(स) माइटोकॉन्ड्रिया में (द) उपरोक्त सभी में

(11) निम्न में से क्रेंज आन्तरिकी (Kranz anatomy) पायी जाती है :-

(अ) C_3 पादपों में (ब) C_4 पादपों में

(स) मांसलोद्भिदों में (द) उपरोक्त सभी में।

(12) C_4 चक्र का प्रथम स्थायी उत्पाद है :-

(अ) पाइरूविक अम्ल (ब) आक्जेलोऐसीटिक अम्ल

(स) मैलिक अम्ल (द) उपरोक्त में से कोई नहीं

(13) CO_2 के 6 अणुओं के अपचयन के लिए अचक्रीय फास्फोरिलीकरण में होते हैं-

(अ) $24H^+$ (ब) $36H^+$

(स) $32H^+$ (द) $12H^+$

(14) प्रकाश संश्लेषण सक्रिय विकिरण (PAR) में निम्न तरंग दैर्ध्य पायी जाती है :-

(अ) 340-450nm (ब) 400-700nm

(स) 500-600nm (द) 450-950nm

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण को परिभाषित कीजिये।
2. प्रकाश संश्लेषण का प्रथम स्थायी उत्पाद क्या है ?
3. पर्णहरित-a एवं पर्णहरित-b में क्या अन्तर है ?
4. NADP का पूर्ण नाम बताइये।
5. प्रकाशीय श्वसन में भाग लेने वाले कोशिकांगों के नाम लिखिये।
6. पादप कार्यिकी का जनक किसे कहा जाता है।
7. प्रकाश संश्लेषण में प्रकाशिक एवं अप्रकाशिक अभिक्रिया के स्थल बताइये।
8. सीमाकारी कारक का नियम क्या है ?
9. जैव मण्डल में सर्वाधिक मात्रा में पाया जाने वाला प्रोटीन कौनसा है ।
10. रेडड्राप (लाल पतन) की घटना दृश्य स्पेक्ट्रम के किस भाग में होती है।
11. प्रकाश संश्लेषण में सहयोगी वर्णक कौन कौन से हैं ?
12. प्रकाश श्वसन एक नष्टकारी अभिक्रिया है, क्यों ?

लघूत्तरात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण में प्रयुक्त होने वाले वर्णक कौन कौन से हैं ?
2. हरितलवक की संरचना का संक्षेप में वर्णन कीजिये ।
3. ब्लैकमेन का पादप कार्यिकी में क्या योगदान है।
4. हरितलवक की रासायनिक संरचना को संक्षेप में समझाइये ।
5. C_3 एवं C_4 चक्र में क्या अन्तर है ? समझाइये
6. क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय द्वारा CO_2 स्थिरीकरण होना

शुष्कोद्भिद् एवं मांसलोद्भिद पादपों मे कार्यिकी अनुकूलन है – समझाइये ?

7. प्रकाशीय फास्फोरिलीकरण से आप क्या समझते हैं।

निबन्धात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण की प्रकाशिक अभिक्रिया का वर्णन कीजिये ।
2. कैल्विन-बेन्सन चक्र द्वारा CO_2 के स्थिरीकरण को समझाइये ।
3. प्रकाशिक फास्फोरिलीकरण सें आप क्या समझते है इस प्रक्रिया को विस्तार से समझाइये।
4. हेच-स्लेक चक्र का वर्णन कीजिये एवं इसकी उपयोगिता बताइये।
5. निम्न पर टिप्पणियां लिखिए-

(i) प्रकाश संश्लेषी वर्णक

(ii) प्रकाश तन्त्र-I व प्रकाश तन्त्र-II

(iii) जल का प्रकाशिक अपघटन

(iv) C_4 चक्र का महत्त्व

(v) प्रकाश श्वसन एवं प्रकाश संश्लेषण

6. प्रकाश संश्लेषण को प्रभावित करने वाले कारकों की विस्तारपूर्वक व्याख्या कीजिये।

उत्तरमाला :- 1. (ब) 2. (अ) 3. (अ) 4. (ब) 5. (ब) 6. (अ) 7. (अ) 8. (द) 9. (अ) 10. (ब) 11. (ब) 12. (ब) 13. (अ) 14. (ब)

❑❑❑