अध्याय – 15

प्रकाश संश्लेषण

(Photosynthesis)

सभी सजीवों को अपनी जैविक क्रियाएं सम्पन्न करने के लिए ऊर्जा की आवश्यकता होती है। यह ऊर्जा भोज्य पदार्थों के ऑक्सीकरण द्वारा प्राप्त होती है। पादपों व जन्तुओं में ऊर्जा प्राप्त करने की विधि में अन्तर है, क्योंकि पादप सूर्य के प्रकाश का सीधे ही रासायनिक ऊर्जा में रूपान्तरण करने में सक्षम हैं, जबकि जन्तु प्रत्यक्ष या अप्रत्यक्ष रूप से अपनी जैविक क्रियाएं सम्पन्न करने के लिए आवश्यक ऊर्जा के लिए पादपों पर निर्भर रहते हैं। प्रकाश संश्लेषण को निम्न प्रकार से परिभाषित किया जा सकता है। हरे पौधों द्वारा सूर्य के प्रकाश व पर्णहरित की उपस्थिति में वायुमण्डल से प्राप्त CO_2 व मृदा द्वारा अवशोषित जल को कार्बोहाइड्रेट रूपी रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तन करना प्रकाश संश्लेषण कहलाता है। इसे निम्न रासायनिक समीकरण द्वारा प्रदर्शित किया जा सकता है–

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

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में ऑक्सीजन उप उत्पाद (by product) के रूप में मुक्त होती है।

प्रकाश संश्लेषण का इतिहास (History of photosynthesis)

पौधों द्वारा अपना भोजन स्वयं बनाने की क्षमता का ज्ञान होने से जीव–विज्ञान के क्षेत्र में एक रोचक एवं महत्वपूर्ण शोध का आरम्भ हुआ। प्रकाश संश्लेषण के क्षेत्र में होने वाली महत्वपूर्ण उपलब्धियाँ निम्न हैं–

ह्यूमसवाद – अरस्तु व उनके विद्यार्थी थियोफ्रैस्टस ने (320 BC) बताया कि पौधों का वजन मृदा से आवश्यक तत्वों के अवशोषण के कारण बढ़ता है।

वॉन हेलमोण्ट (Von Helmont; 1577-1644) **का प्रयोग** – वॉन हेलमोण्ट ने 5 पौण्ड वजनी विलो (Willow) के पौधे को एक बड़े गमले में लगाया जिसमें 200 पौण्ड शुष्क मृदा भरी हुई थी, केवल प्ररोह के लिए एक छिद्र छोड़कर गमले को अच्छी तरह ढक दिया। इस प्रकार स्थापित पौधे को केवल वर्षा का जल (आसुत जल) दिया जाता रहा। पाँच वर्ष पश्चात् उन्होंने पाया कि पौधे का वजन 169 पौण्ड 3 औंस हो गया व गमले की मिट्टी में मात्र 2 औंस की कमी पाई गई। इस प्रयोग से यह निष्कर्ष निकाला गया कि पौधों को भोजन केवल जल से ही प्राप्त होता है न की मृदा से। वॉन हेलमोण्ट की यह अवधारणा केवल आंशिक रूप से ही सत्य थी।

स्टीफन हेल्स (Stephen Hales, 1727) जिन्हें पादप कार्यिकी का जनक कहा जाता है, ने सन् 1727 में एक पुस्तक प्रकाशित की जिसमें पादपों में पोषण के बारे में यह बताया कि पादप अपने पोषण का कुछ अंश वायु से प्राप्त करते हैं, तथा इसके लिए उन्हें प्रकाश की आवश्यकता होती है। सम्भवतः यह प्रकाश संश्लेषण के बारे में प्रथम लिखित प्रमाण है।

जोसेफ प्रिस्टले (Joseph Priestley, 1772) ने वास्तव में प्रकाश संश्लेषण की खोज की नींव रखी। उन्होंने यह बताया कि प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में गैसों का आदान–प्रदान होता है। उन्होंने अपने प्रयोगों के आधार पर यह बताने का प्रयास किया कि पौधे जन्तुओं के द्वारा दूषित वायु को शुद्ध करते हैं। प्रिस्टले ने बेलजार में मोमबत्ती जलाने से अशुद्ध हुई वायु को पोदीने के पौधे द्वारा पुनः शुद्ध कर जन्तुओं के श्वसन योग्य बनाया।

जॉन इन्जन हाउज (Jan Ingen Housz) ने सन् 1779 में सर्वप्रथम प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में हरे वर्णक व प्रकाश का महत्व बताया तथा जल निमग्न पादप का उपयोग कर ऑक्सीजन बुलबुलों का निकास दर्शाया।

जीन सेनेबियर (Jean Senebier) ने सन् 1782 में सर्वप्रथम यह बताया कि पादपों में वायु को शुद्ध करने की क्षमता CO_2 की उपस्थिति पर निर्भर करती है।

पादपों में पाये जाने वाले हरे रंग के वर्णक को क्लोरोफिल नाम सन् 1818 में **पैलेटियर** एवं **कैवेन्टऊ** (Pelletier and Caventou) द्वारा दिया गया।

जुलियस रॉबर्ट मेयर (Julius Robert Mayer) ने सन् 1845 में यह बताया कि हरे पादप प्रकाश ऊर्जा को रासायनिक ऊर्जा में बदल देते हैं। इस प्रक्रिया को उन्होंने निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त किया –

[illegible] ⟶ [illegible] ↑

इसी समय लीबिग (Liebig) ने यह बताया कि प्रकाश संश्लेषण में कार्बनिक पदार्थों का निर्माण CO_2 से होता है व इस कार्य में जल (H_2O) की आवश्यकता होती है।

एफ. ब्लैकमेन (F. Blackman) ने सन् 1905 में सर्वप्रथम यह बताया कि प्रकाश संश्लेषण में केवल प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया (Photochemical reaction) ही नहीं होती बल्कि जैव रासायनिक अभिक्रिया (Biochemical reaction) भी होती है, जिसके लिए प्रकाश की आवश्यकता नहीं होती, इस कारण इस प्रक्रिया को अप्रकाशिक अभिक्रिया (Dark reaction) भी कहा जाता है। प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया के दो चरणों में होने के प्रमाण सबसे पहले ब्लैकमेन ने दिये थे, इस कारण इसे ब्लैकमेन अभिक्रिया भी कहा जाता है।

रॉबर्ट हिल (Robert Hill) ने सन् 1937 में प्रकाश संश्लेषण में होने वाली प्रकाशिक व अप्रकाशिक प्रक्रिया में होने वाली अभिक्रियाओं की क्रिया विधियों का विस्तृत अध्ययन कर सबसे पहले यह बताया कि प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में ऑक्सीजन जल द्वारा मुक्त होती है। उन्होंने अपने प्रयोग पृथक्कृत क्लोरोप्लास्ट, प्रकाश, जल एवं उचित हाइड्रोजन ग्राही की उपस्थिति एवं CO_2 की अनुपस्थिति में किये एवं यह बताया कि O_2 की निकासी जल द्वारा होती है।

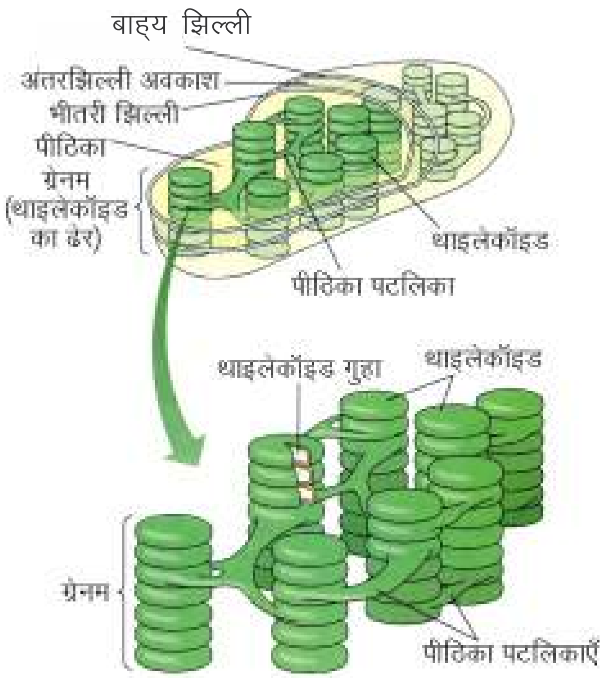
रूबेन एवं सहयोगियों (Ruben et al.) ने सन् 1941 में रेडियो चिन्हित (radio labelled) ऑक्सीजन (^{18}O) का उपयोग कर प्रकाश संश्लेषण में ऑक्सीजन की मुक्ति जल से ही होती है, की पुष्टि की।

मेल्विन केल्विन (Melvin Calvin) एवं साथियों ने 1954 में प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में कार्बन डाइऑक्साइड द्वारा कार्बोहाइड्रेट बनने की सम्पूर्ण प्रक्रिया को क्रमबद्ध रासायनिक अभिक्रियाओं के रूप में समझाया जिनके नाम पर इस चक्र को केल्विन–बैन्सन चक्र या C_3 चक्र (Calvin-Benson cycle or C_3 cycle) कहा जाता है। इस कार्य के लिए उनको 1961 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया था। इसी वर्ष आर्नन ने प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण की खोज की। हैच तथा स्लैक (Hatch and Slack) ने सन् 1967 में कुछ उष्णकटिबन्धीय पादपों में C_4 चक्र का विस्तृत अध्ययन किया।

मिशेल (Mitchell) ने फॉस्फोरिलीकरण के रसायनपरासरी सिद्धान्त (Chemiosmotic theory) का प्रतिपादन किया। इस कार्य के लिए उन्हें सन् 1978 में नोबेल पुरस्कार द्वारा सम्मानित किया गया।

प्रकाश संश्लेषी वर्णक तथा स्थल
(Photosynthetic pigments and site)

सभी हरे पौधे प्रकाश ऊर्जा का रूपान्तरण रासायनिक ऊर्जा में करते हैं। इस कार्य के लिए पौधों में विशेष प्रकार के वर्णक पाये जाते हैं। ये मुख्य रूप से तीन प्रकार के होते हैं– (i) पर्णहरित (Chlorophylls), (ii) कैरोटिनॉइड्स (Carotenoids) तथा (iii) फाइकोबिलिन्स (Phycobilins)। इनमें क्लोरोफिल्स मुख्य वर्णक की तरह कार्य करते हैं, जबकि कैरोटिनॉइड्स व फाइकोबिलिन्स प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में सहायक वर्णकों की तरह कार्य करते हैं। ये सभी वर्णक पादप कोशिका में पाये जाने वाले विशेष कोशिकांग में पाये जाते हैं, जिसे हरितलवक (Chloroplast) कहते हैं। प्रकाश संश्लेषण की क्रिया क्लोरोप्लास्ट में सम्पन्न होती है (चित्र 15.1)।



चित्र 15.1 : क्लोरोप्लास्ट की संरचना (क) आरेख (ख) आन्तरिक त्रिविम दृश्य

क्लोरोप्लास्ट की आधात्री (Stroma) में लिपिड व प्रोटीन्स द्वारा निर्मित इकाई कला से बना नलिकीय (Tubular) तंत्र होता है जिसे थाइलेकॉइड कहते हैं, कई थाइलेकॉइड एक के ऊपर

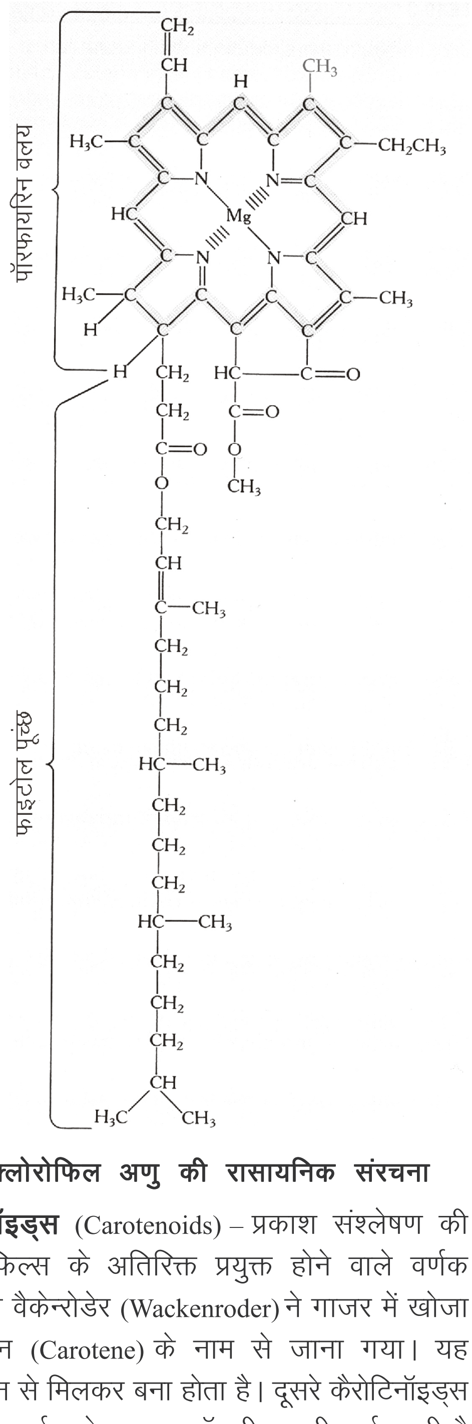
एक व्यवस्थित होकर विशेष प्रकार की रचना का निर्माण करते हैं, जिन्हें ग्रेना कहते हैं (बहुवचन–grana; एकवचन–granum)।

इन्हीं थाइलेकॉइड्स में प्रकाश संश्लेषण से सम्बन्धित प्रकाश रासायनिक अभिक्रियाओं के लिए आवश्यक पदार्थ विद्यमान रहते हैं। थाइलेकॉइड झिल्ली में प्रकाश संश्लेषण की क्रिया के आरम्भन के लिए आवश्यक प्रकाश ऊर्जा को ग्रहण करने वाले वर्णक उपस्थित होते हैं जिनमें क्लोरोफिल प्रमुख हैं। ये वर्णक दृश्य स्पेक्ट्रम में बैंगनी, नीले व लाल रंग के क्षेत्र में अवशोषण करते हैं जो स्पेक्ट्रम के 400 nm से 700 nm के बीच का भाग है अतः इसे प्रकाश संश्लेषी सक्रिय विकिरण (Photosynthetically active radiation, PAR) भी कहा जाता है। क्लोरोफिल्स द्वारा हरे रंग के प्रकाश का परावर्तन हो जाता है जिसके कारण पौधों की पत्तियाँ हरी दिखाई देती है।

1. पर्णहरित (Chlorophylls) – पर्णहरित प्रकाश संश्लेषण में प्रयुक्त होने वाले मुख्य वर्णक हैं। यह मुख्य रूप से लाल, नीले व बैंगनी प्रकाश का अवशोषण करते हैं। लगभग सात प्रकार के क्लोरोफिल वर्णक पाये जाते हैं (Chl-a, Chl-b, Chl-c, Chl-d, Chl-e, Chlorobium chlorophyll and Bacteriochlorophyll)। अंतिम दो प्रकार प्रकाश संश्लेषी जीवाणुओं में पाये जाते हैं। पादपों में Chl-a, मुख्य वर्णक है जो प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में प्रकाश ऊर्जा को ग्रहण करता है। यह सभी यूकेरियोटिक प्रकाश संश्लेषी जीवों में पाया जाता है। क्लोरोफिल–b सहायक वर्णक की तरह कार्य करता है। यह केवल उच्च वर्ग के पौधों एवं हरे शैवालों में पाया जाता है। क्लोरोफिल–b पादपों में सम्पूर्ण क्लोरोफिल के एक चौथाई भाग के बराबर होता है। प्रकाश संश्लेषण में क्लोरोफिल–b भिन्न–भिन्न तरंगदैर्ध्य के प्रकाश को अवशोषित कर उत्तेजित हो जाता है तथा इस ऊर्जा को Chl-a, के अणुओं में स्थानान्तरित कर देता है जो अभिक्रिया केन्द्रों (Reaction centre) की तरह कार्य करते हैं। जहाँ प्रकाश ऊर्जा का वैद्युत आवेशों के पृथक्करण के कारण वैद्युत ऊर्जा में रूपान्तरण हो जाता है, व ये e^- मुक्त करते हैं।

संरचना – क्लोरोफिल एक ध्रुवीय वृहत अणु है। जिसमें एक सुविकसित पोरफाइरिन वलय (Porphyrin ring) का बना शीर्ष व फाइटोल (phytol) श्रृंखला द्वारा निर्मित पुच्छ (Tail) पायी जाती है। क्लोरोफिल-a का अणु सूत्र $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ है। पोरफाइरिन वलय एक चपटी वर्गाकार रचना है जिसमें चार पाइरोल वलय पाई जाती है। प्रत्येक पाइरोल वलय में एक नाइट्रोजन परमाणु पाया जाता है। चारों पाइरोल वलय के केन्द्र में मैग्नीशियम (Mg) अणु पाया जाता है। यह पोरफाइरिन शीर्ष एस्टर बंध द्वारा फाइटोल श्रृंखला से जुड़ा रहता है। क्लोरोफिल-a में पोरफाइरिन शीर्ष की द्वितीय पाइरोल रिंग में तृतीय कार्बन पर मिथाइल ($-CH_3$) समूह व क्लोरोफिल-b में इसी स्थान पर एल्डिहाइड (–CHO) समूह पाया जाता है (चित्र 15.2) क्लोरोफिल अणु का शीर्ष जल अनुरागी (Hydrophobic) होता है जो इसको ध्रुवीय प्रकृति प्रदान करता है।

क्लोरोफिल-a एवं b के अलावा अन्य क्लोरोफिल c, d एवं e होते हैं जो केवल शैवालों में पाये जाते हैं।



चित्र 15.2 : क्लोरोफिल अणु की रासायनिक संरचना

2. कैरोटिनॉइड्स (Carotenoids) – प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में क्लोरोफिल्स के अतिरिक्त प्रयुक्त होने वाले वर्णक कैरोटिनॉइड्स को वैकेन्रोडेर (Wackenroder) ने गाजर में खोजा था जिसे कैरोटीन (Carotene) के नाम से जाना गया। यह हाइड्रोजन व कार्बन से मिलकर बना होता है। दूसरे कैरोटिनॉइड्स जिनमें हाइड्रोजन कार्बन के अलावा ऑक्सीजन भी पाई जाती है

जैन्थोफिल्स (Xanthophyll) कहलाते हैं। ये प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में प्रयुक्त होने वाले सहायक वर्णक हैं। जिस प्रकाशिक ऊर्जा को क्लोरोफिल्स अवशोषित नहीं कर सकते वह सहायक वर्णकों द्वारा अवशोषित कर क्लोरोफिल्स को स्थानान्तरित की जाती है। कैरोटीन एवं जेन्थोफिल कई प्रकार के होते हैं। कैरोटीन जैसे β–कैरोटीन तथा जैन्थोफिल्स जैसे ल्यूटिन सभी हरे पौधों में पाये जाते हैं।

3. फाइकोबिलिन्स (Phycobilins) – ये दो तरह के वर्णक हैं। लाल रंग के वर्णक फाइकोइरीथ्रिन व नीले रंग के वर्णक फाइकोसायनिन कहलाते हैं। ये लाल व नील हरित शैवालों में सहायक वर्णक होते हैं।

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया–विधि
(Mechanism of Photosynthesis)

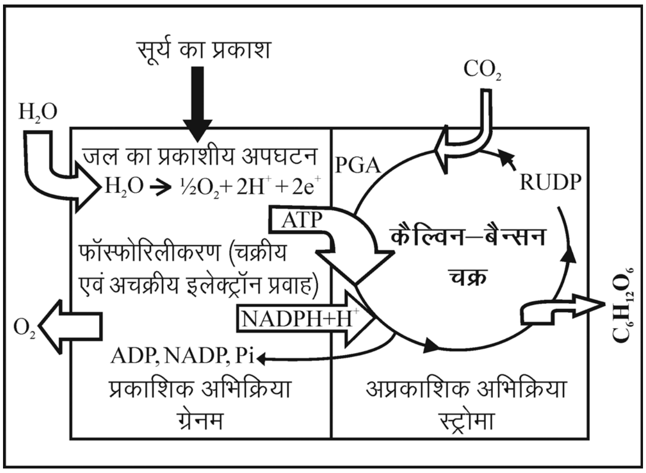
अब तक हुए शोधों के आधार पर प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया को निम्न चरणों में समझा जा सकता है –

1. क्लोरोफिल्स व सहायक वर्णकों द्वारा अवशोषित प्रकाश ऊर्जा का उपयोग जल के प्रकाशिक अपघटन (Photolysis) में होता है। इस प्रक्रिया में O_2, H^+ व e^- विमुक्त होते हैं।
2. इन इलेक्ट्रोन्स का प्रवाह प्रकाश तंत्रों द्वारा चरणों में पूर्ण होता है जिसमें ATP व $NADPH+H^+$ के रूप में ऊर्जा का संग्रह होता है।
3. इस प्रकार बने उच्च ऊर्जा युक्त पदार्थों का उपयोग कार्बन डाइऑक्साइड के अपचयन में होता है जिसके परिणामस्वरूप कार्बोहाइड्रेट्स का निर्माण होता है।

उपरोक्त तथ्यों के आधार पर हम यह कह सकते हैं कि प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया एक ऑक्सीकरण–अपचयन प्रक्रिया है जिसमें जल का ऑक्सीकरण O_2 में तथा कार्बन डाइऑक्साइड का अपचयन कार्बोहाइड्रेट्स में होता है। इसे निम्न रासायनिक समीकरण द्वारा प्रदर्शित किया जा सकता है–

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

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में दो प्रावस्थाएं (Phases) पाई जाती है जिन्हें प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया (Photochemical reaction) व अप्रकाशिक अभिक्रिया (Dark reaction) अथवा ब्लैकमेन अभिक्रिया कहा जाता है। इनमें से प्रथम प्रक्रिया में प्रकाश की आवश्यकता होती है जिससे इस प्रकाश ऊर्जा का उपयोग सीधे ही ऊर्जा वाहक अणु बनाने में होता है। ये ऊर्जा–वाहक अणु अप्रकाशिक अभिक्रिया में ऊर्जा स्रोत के रूप में प्रयुक्त होते हैं अप्रकाशिक अभिक्रिया, प्रकाशिक अभिक्रिया में बने उत्पादों पर निर्भर करती है क्योंकि इन्हीं उत्पादों (रासायनिक ऊर्जा) का उपयोग कार्बोहाइड्रेट्स में C-C सहसंयोजक बंध बनाने में होता है। प्रकाश संश्लेषण में होने वाली प्रकाशिक व अप्रकाशिक अभिक्रियाएं क्रमशः क्लोरोप्लास्ट के ग्रेना तथा स्ट्रोमा भाग में सम्पन्न होती है (चित्र 15.3)।



चित्र 15.3 : प्रकाश संश्लेषण प्रक्रिया में सम्पन्न होने वाली प्रकाशिक व अप्रकाशिक अभिक्रियाएं

प्रकाश की प्रकृति – सामान्यतः प्रकाश विद्युत चुम्बकीय तरंगों का रूप है। दृश्य स्पेक्ट्रम वैद्युत चुम्बकीय तरंगों का एक छोटा–सा भाग है। जिसमें पायी जाने वाली तरंगों का तरंगदैर्ध्य 390–760 नेनो मीटर होता है। इस दृश्य स्पेक्ट्रम में बैंगनी रंग की प्रकाश तरंगों की तरंगदैर्ध्य सबसे कम (390–430 नेनोमीटर) व लाल रंग की प्रकाश तरंगों की तरंगदैर्ध्य सबसे से अधिक (660–760 नेनोमीटर) होती है। लाल रंग की तरंगदैर्ध्य से अधिक तरंगदैर्ध्य वाली विकिरण अवरक्त (infrared) विकिरण कहलाती है। जबकि वह विकिरण जिसकी तरंगदैर्ध्य बैंगनी रंग की किरणों के तरंगदैर्ध्य से कम होती है, पराबैंगनी विकिरण कहलाती है। दृश्य स्पेक्ट्रम की सभी तरंगे संयुक्त रूप से सफेद प्रकाश के रूप में दिखाई देती हैं। प्रकाश की किरणों में उच्च ऊर्जा वाले कण पाये जाते हैं जिन्हें फोटोन (Photon) कहते हैं। इन्हीं कणों की ऊर्जा से प्रकाश संश्लेषण की क्रिया होती है। प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में CO_2 के एक अणु के अपचयन के लिए लगभग 8–10 फोटोन की आवश्यकता होती है, जो प्रकाश संश्लेषण की क्वान्टम आवश्यकता कहलाती है। मुक्त होने वाले O_2 के अणुओं की संख्या तथा अवशोषित होने वाले प्रत्येक क्वान्टम का अनुपात क्वान्टम उत्पादन कहलाता है। लाल प्रकाश की अपेक्षा बैंगनी प्रकाश में होने वाले प्रकाश संश्लेषण में ऊर्जा का ह्रास अधिक होता है। अतः इस क्रिया में क्वान्टम आवश्यकता वास्तविक से अधिक होती है।

(i) **प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया** (Photochemical reaction/Light reaction) – प्रकाश संश्लेषण के इतिहास में यह

बताया जा चुका है कि प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में मुक्त होने वाली O_2 जल के प्रकाशिक अपघटन द्वारा वियोजित होती है। प्रकाश संश्लेषण में सम्पन्न होने वाली प्रकाशिक अभिक्रिया में निम्न रासायनिक घटनाएं होती हैं –

(क) प्रकाश का अवशोषण व क्लोरोफिल अणु का उत्तेजित होना – प्रकाश के निश्चित फोटोन का अवशोषण कर क्लोरोफिल अणु कुछ समय के लिए उत्तेजित अवस्था में आ जाता है।

क्लोरोफिल (सामान्य) + फोटोन ⟶ क्लोरोफिल (उत्तेजित अवस्था)

(ख) जल का प्रकाशिक अपघटन व ऑक्सीजन का निकास – क्लोरोफिल द्वारा अवशोषित की गई प्रकाश ऊर्जा का उपयोग जल के प्रकाशिक अपघटन में होता है। जिससे O_2 का वियोजन होता है, जो श्वसन क्रिया में प्रयुक्त होती है तथा बची हुई O_2 वायुमण्डल में मुक्त हो जाती है। O_2 के एक अणु के निकलने के लिए पानी के दो अणुओं का प्रकाशिक अपघटन होता है। पानी के प्रकाशिक अपघटन की क्रिया निम्न है–

$$2H_2O \xrightarrow{\text{प्रकाश}} 4H^+ + 4e^- + O_2$$

(ग) NADPH का निर्माण – जल के प्रकाशिक अपघटन में मुक्त होने वाली हाइड्रोजन, $NADP^+$ (हाइड्रोजन ग्राही) को अपचयित कर $NADPH + H^+$ का निर्माण करती है।

पानी के दो अणुओं के प्रकाशिक अपघटन के पश्चात् निकलने वाले $4H^+$ से $2NADPH + 2H^+$ बनते हैं, जो कि CO_2 के एक अणु के अपचयन के लिए आवश्यक होते हैं। इस क्रिया में $4e^-$ भी आवश्यक होते हैं जो प्रथम प्रकाश तंत्र से प्राप्त होते हैं–

$$2NADP^+ + 4H + 4e^- \longrightarrow 2NADPH + 2H^+$$

CO_2 के 6 अणुओं के अपचयन के लिए $12NADPH + 12H^+$ आवश्यक होते हैं जो कि पानी के 12 अणुओं के अपघटन के पश्चात् प्राप्त होते हैं।

(घ) प्रकाशिक फॉस्फोरिलीकरण – प्रकाश ऊर्जा द्वारा उत्तेजित क्लोरोफिल से मुक्त होने वाली ऊर्जा का उपयोग ATP संश्लेषण में होता है जिसे प्रकाशिक फॉस्फोरिलीकरण कहते हैं। इस क्रिया का अध्ययन आप इसी अध्याय में आगे करेंगे।

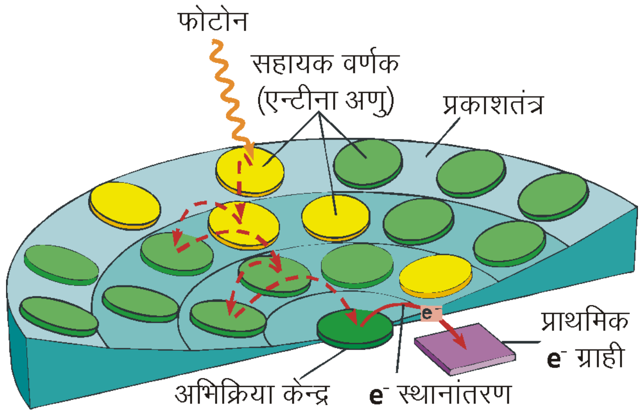
इमर्सन प्रभाव (Emerson effect) – इमर्सन एवं सहयोगियों ने प्रकाश की विभिन्न तरंगदैर्ध्य (Wave lengths) में प्रकाश संश्लेषण की दर का मापन करते हुए यह पता लगाया कि एकवर्णीय स्पैक्ट्रम के लाल क्षेत्र में जहाँ तरंगदैर्ध्य 680 nm (नेनोमीटर) से अधिक होती है, प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया बहुत कम हो जाती है। इसे **"लाल पतन"** (Red drop) कहते हैं।

उन्होंने यह भी देखा कि 680 nm से अधिक तरंगदैर्ध्य वाले प्रकाश के साथ 680 nm से कम तरंगदैर्ध्य वाला प्रकाश भी अंतराली रूप से देने पर, प्रकाश संश्लेषण की दर बढ़ जाती है और ऑक्सीजन अधिक मात्रा में निकलने लगती है।

इससे यह सिद्ध होता है कि दो अलग प्रकार के मिश्रित तरंगदैर्ध्य (680 nm से अधिक व कम) में होने वाले प्रकाश संश्लेषण की दर, दोनों प्रकार के तरंगदैर्ध्य वाले प्रकाश में होने वाली अलग–अलग प्रकाश संश्लेषण के योग से अधिक होती है। इस घटना को **इमर्सन वृद्धिकरण प्रभाव** (Emerson enhancement effect) कहते हैं।

उपरोक्त प्रयोगों के आधार पर इमर्सन इस निष्कर्ष पर पहुँचे कि पादपों में प्रकाश संश्लेषण करने के लिये वर्णकों के कम से कम दो समूह पाये जाते हैं। एक वह जो उच्च या बड़ी तरंगदैर्ध्य के प्रकाश का अवशोषण करते हैं तथा दूसरे वह जो निम्न या छोटी तरंगदैर्ध्य के प्रकाश का अवशोषण करते हैं। इन वर्णक समूहों को क्रमशः **प्रकाश तंत्र**-I (Photosystem-I) एवं **प्रकाश तंत्र**-II (Photosystem-II) कहा जाता है।

थायलेकॉइड में क्लोरोफिल व दूसरे वर्णकों के विन्यास को प्रकाश तंत्र कहा जाता है। प्रत्येक प्रकाश तंत्र में 300 से 400 वर्णक अणु पाये जाते हैं। प्रत्येक प्रकाश तंत्र में एक अभिक्रिया केन्द्र (Reaction centre) तथा इसको चारों तरफ से घेरे हुए सहायक वर्णक पाये जाते हैं। ये सहायक वर्णक प्रकाशिक ऊर्जा को अवशोषित करके अभिक्रिया केन्द्र को दे देते हैं। इन अणुओं को एन्टीना अणु (Antenna molecules) कहते हैं। प्रकाश तंत्र की क्रिया विधि चित्र 15.4 में समझाई गई है।



चित्र 15.4 : प्रकाश तंत्र की क्रिया–विधि

प्रकाश तंत्र-I– प्रकाश तंत्र-I में फोटोन की ऊर्जा का अवशोषण क्लोरोफिल-a के विभिन्न अणु (Chl_{660}, Chl_{670}, Chl_{680}, एवं Chl_{700}) तथा कैरोटिनॉइड करते हैं। जो भिन्न–भिन्न तरंगदैर्ध्य वाली तरंगों का अवशोषण कर अन्त में विशेष प्रकार के क्लोरोफिल-a 700 (P_{700}) अणु जो अभिक्रिया केन्द्र की तरह कार्य करता है, को

स्थानान्तरित कर देते हैं। अभिक्रिया केन्द्र में प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया के कारण उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉन्स का उत्सर्जन होता है। यह प्रकाश तंत्र चक्रीय व अचक्रीय दोनों प्रकार के फोस्फोरिलीकरण में भाग लेता है।

प्रकाश तंत्र-I की कार्य विधि (Mechanism of photosystem-I) – इस प्रकाश तंत्र में सूर्य के प्रकाश के फोटोन क्लोरोफिल-a [P_{700} (pigment-700)] से टकराते हैं तथा फोटोन की क्वान्टम ऊर्जा का अवशोषण कर क्लोरोफिल से 2 इलेक्ट्रॉन उत्सर्जित होते हैं। जिससे क्लोरोफिल अणु ऑक्सीकृत अवस्था में आ जाता है। ये उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन एक आयरन सल्फर प्रोटीन [A(FeS)] द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं जिससे A अपचयित हो जाता है। पुनः ये इलेक्ट्रॉन A से फेरीडॉक्सिन Fd द्वारा ग्रहण कर लिए जाते हैं। अपचयित फेरीडॉक्सिन से इलेक्ट्रॉन $NADP^+$ के द्वारा ग्रहण किये जाते हैं, जो अपचयित होकर $NADPH + H^+$ अवस्था में आ जाता है। $NADPH + H^+$ एक शक्तिशाली अपचयनकारी (Strong reductant) है। इस प्रकार बनी NADPH + H^+ अप्रकाशिक अभिक्रिया में CO_2 के अपचयन में काम आती है। इसे कोशिका की स्वांगीकारी या अपचयन शक्ति (Assimilatory or Reducing power) भी कहा जाता है।

प्रकाश तंत्र-II – प्रकाश तंत्र-II में फोटोन ऊर्जा का अवशोषण क्लोरोफिल-a 673, क्लोरोफिल-b व फाइकोबिलिन्स करते हैं। इस वर्णक तंत्र में भी इन अणुओं द्वारा भिन्न–भिन्न तरंगदैर्ध्य की प्रकाश तरंग का अवशोषण कर अभिक्रिया केन्द्र (P_{680}) को स्थानान्तरण कर दिया जाता है। इस प्रकाश तंत्र में Chl_a673, Chl_b650, तथा जैन्थोफिल्स एन्टीना का कार्य करते हैं। इस प्रकाश तंत्र में प्रकाश तंत्र I की तुलना में कम तरंगदैर्ध्य वाली फोटोन ऊर्जा का अवशोषण होता है। इस प्रकाश तंत्र का उपयोग केवल अचक्रीय प्रकाश फोस्फोरिलीकरण में होता है।

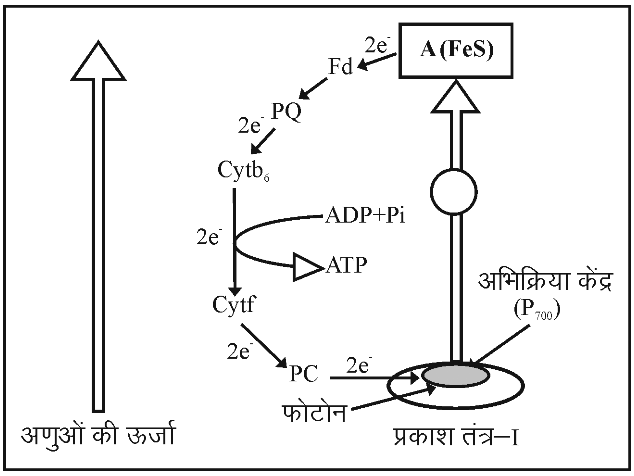
प्रकाश तंत्र-II की कार्य विधि (Mechanism of photosystem-II)- इस प्रकाश तंत्र में जल का प्रकाशिक अपघटन होता है। प्रकाश तंत्र-II में इलेक्ट्रॉन स्थानान्तरण श्रृंखला की शुरूआत इस प्रकाश तंत्र के वर्णकों द्वारा विशेष तरंगदैर्ध्य वाली प्रकाश तरंगों के अवशोषण से होती है। जब क्लोरोफिल प्रकाश तरंगों का अवशोषण करता है तो यह उत्तेजित अवस्था में आ जाता है, जिससे इसमें से इलेक्ट्रॉन मुक्त होते हैं। यह मुक्त होने वाले इलेक्ट्रॉन्स, ग्राही अणु फीयोफाइटिन (Pheophytin) द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं। क्लोरोफिल अणु अब प्रबल ऑक्सीकारक की तरह कार्य करता है। जिससे जल के अणु का अपघटन हो जाता है एवं O_2 मुक्त होती है। यह प्रक्रिया जल का प्रकाशिक अपघटन (Photolysis of water) कहलाती है। इसमें मैंग्नीज आयन महत्त्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं व क्लोराइड तथा कैल्शियम आयन भी योगदान करते हैं। जल के अपघटन द्वारा मुक्त होने वाले इलेक्ट्रॉन P_{680} द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं। P_{680} द्वारा यौगिक (Pheophytin) को स्थानान्तरित इलेक्ट्रॉन्स प्लास्टोक्वीनोंन (PQ) → साइटोक्रोम b_6 एवं f होते हुए प्लास्टोसायनिन (PC) द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं जिससे यह अपचयित हो जाता है। अपचयित प्लास्टोसायनिन से ये इलेक्ट्रॉन्स प्रकाश तंत्र-II के P_{700} अणु द्वारा ग्रहण कर लिये जाते हैं (P_{700} इलेक्ट्रॉन ग्रहण उस अवस्था में ही करता है जब उसके इलेक्ट्रॉन प्रकाश फोटोन द्वारा उत्सर्जित किये जा चुके हों)। इलेक्ट्रॉन श्रृंखला में प्लास्टोसायनिन प्रकाश तंत्र-II व प्रकाश तंत्र-I के बीच योजक कड़ी का कार्य करता है।

$$H_2O \xrightarrow[\text{क्लोरोफिल}]{\text{फोटोन}} \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

इलेक्ट्रॉन स्थानान्तरण शृंखला (Electron transfer chain) – प्रकाश संश्लेषण में प्रकाश द्वारा क्लोरोफिल अणुओं से मुक्त हुए इलेक्ट्रॉनों से होने वाली अभिक्रियाओं को इलेक्ट्रॉन स्थानान्तरण शृंखला कहा जाता है। जिसे सबसे पहले सन् 1939 में राबर्ट हिल (Robert Hill) ने बताया था।

प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण (Photophosphorylation) – पादप क्लोरोप्लास्ट में सूर्य के प्रकाश की उपस्थिति में ADP से ATP के निर्माण की प्रक्रिया प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण कहलाती है। इस क्रिया को ऑर्नन व उनके सहयोगियों ने खोजा था। प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण क्रिया दो प्रकार से होती है–

1. चक्रीय फॉस्फोरिलीकरण (Cyclic photophosphorylation)– प्रकाश तंत्र-I में P_{700} से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन्स A→ Fd → $Cytb_6$ / f → प्लास्टोसायनिन से होते हुए ये P_{700} अणु में वापस लौट आते हैं। इस प्रकार वापस लौटते इलेक्ट्रॉन्स प्लास्टोक्वीनोन (plastoquinone, PQ) व Cyt-f के मध्य ADP से ATP का निर्माण करते हैं। क्योंकि इस क्रिया में इलेक्ट्रॉन P_{700} से उत्सर्जित होकर पुनः P_{700} में चक्रीय क्रिया द्वारा पहुँच जाते हैं तथा ATP का निर्माण करते हैं, इस कारण इसे चक्रीय फॉस्फोरिलीकरण कहते हैं (चित्र 15.5)।



चित्र 15.5 : प्रकाशिक अभिक्रिया में सम्पन्न होने वाला चक्रीय फॉस्फोरिलीकरण

2. अचक्रीय प्रकाश फॉस्फारिलीकरण (Noncyclic photosphorylation) – यह फॉस्फोरिलीकरण दोनों प्रकाश तंत्रों PS I एवं PS II के द्वारा होता है। इस क्रिया में P_{680} द्वारा उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन्स पुनः P_{680} में नहीं आकर एक रेखीय पथ द्वारा Pheo ⟶ प्लास्टोक्वीनोन ⟶ साइटोक्रोम-b_6.f ⟶ प्लास्टोसायनिन से होते हुए P_{700} में पहुँच जाते हैं। P_{680} से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन्स पुनः P_{680} में नहीं पहुँचते इस कारण यह प्रक्रिया अचक्रीय फॉस्फोरिलीकरण कहलाती है। इसमें PS II के इलेक्ट्रॉन्स के द्वारा ATP एवं PS I से निकले हुए इलेक्ट्रॉन्स के द्वारा $NADPH+H^+$ बनता है।

चक्रीय एवं अचक्रीय प्रकार के फॉस्फोरिलीकरण में महत्त्वपूर्ण अन्तर सारिणी 15.1 में दिये गये हैं।

सारणी 15.1 : चक्रीय एवं अचक्रीय प्रकाश फास्फोरिलीकरण में अन्तर

क्र.सं.	चक्रीय प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण	अचक्रीय प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण
1.	जल का प्रकाशिक अपघटन नहीं होता है।	जल का प्रकाशिक अपघटन होता है।
2.	ऑक्सीजन का निकास नहीं होता।	ऑक्सीजन बाहर निकलती है।
3.	यह केवल एक ही प्रकाश तंत्र (PS-l) के द्वारा सम्पन्न होता है।	यह दोनों प्रकाश तंत्रों से सम्पन्न होता है।
4.	$NADPH+H^+$ का संश्लेषण नहीं होता।	$NADPH+H^+$ का संश्लेषण होता है।

फॉस्फोरिलीकरण की प्रक्रिया मिशेल के रसायन परासरी सिद्धान्त की आधुनिक अवधारणा से समझाई जा सकती है।

अतः प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया में भाग लेने वाले दो वर्णक/प्रकाश तंत्रों द्वारा जल अपघटन के कारण ऑक्सीजन मुक्त होती है तथा ATP व $NADPH+H^+$ का निर्माण होता है। ATP को **स्वांगीकरण शक्ति** व $NADPH+H^+$ को **अपचायक शक्ति** कहा जाता है (चित्र 15.6)।

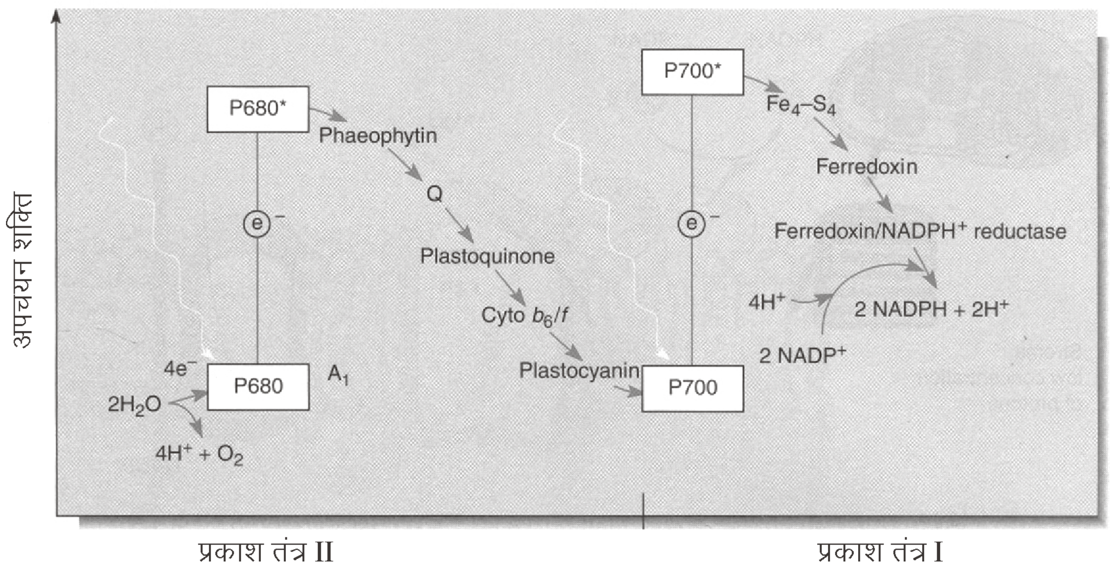
(ii) **अप्रकाशिक/प्रकाशहीन अभिक्रिया** (Dark reaction/ Light independent reaction) – प्रकाश संश्लेषण में सम्पन्न होने वाली यह क्रिया क्लोरोप्लास्ट के स्ट्रोमा (Stroma) में सम्पन्न होती है तथा इसमें प्रकाश की आवश्यकता नहीं होती है। इस प्रक्रिया में वायुमण्डल द्वारा अवशोषित CO_2 विभिन्न एन्जाइमों द्वारा अपचयित होकर कार्बोहाइड्रेट्स का निर्माण करती है। इस प्रक्रिया को कार्बन स्थिरीकरण भी कहा जाता है। CO_2 के अपचयन के लिए आवश्यक ऊर्जा प्रकाशिक अभिक्रिया में बनने वाले ATP तथा $NADPH+H^+$ अणुओं से प्राप्त होती है। विभिन्न पादपों में कार्बन स्थिरीकरण निम्न तीन भिन्न प्रक्रियाओं द्वारा सम्पन्न होता है–

(क) कैल्विन–बैन्सन चक्र (Calvin-Benson cycle/C_3 cycle)

(ख) हैच–स्लेक चक्र (Hatch-Slack cycle/C_4 cycle)

(ग) क्रेसूलेशियन अम्ल उपापचय चक्र (Crassulacean acid metabolism; CAM cycle)

(क) कैल्विन–बैन्सन चक्र (Calvin-Benson cycle) – प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया में कार्बनडाइऑक्साइड का कार्बोहाइड्रेट में परिवर्तन का पथ रेडियोएक्टिव ट्रेसर तकनीक (Radioactive tracer technique) द्वारा कैल्विन, बैन्सन तथा साथियों ने सन्



चित्र 15.6 : प्रकाशिक अभिक्रिया में सम्पन्न होने वाला अचक्रीय फॉस्फोरिलीकरण

1946–1953 के मध्य बताया था। इस कार्य के लिए उन्होंने शैवालों (*क्लोरेला* एवं *सिनडेसमस*) का संवर्धन किया व इन संवर्धित शैवालों को प्रकाश संश्लेषण के लिए रेडियोधर्मिता युक्त (Radio labelled) कार्बनडाईऑक्साइड $^{14}CO_2$ प्रदान की गई। इस प्रकार प्रदान की गई कार्बनडाईऑक्साइड से बनने वाले यौगिकों की थोड़े–थोड़े अंतराल पर रेडियोधर्मिता के आधार पर पहचान की गई। इस प्रक्रिया में सबसे पहले बनने वाला स्थिर यौगिक तीन कार्बन परमाणु युक्त 3–फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल था, इस कारण इस चक्र को C_3 चक्र भी कहा जाता है। उन्होंने रेडियोएक्टिव कार्बन (^{14}C) युक्त यौगिकों की रेखीय श्रृंखला बनाकर यह बताया कि किस तरह से $^{14}CO_2$ के प्रवेश से लेकर कार्बोहाइड्रेट्स का निर्माण होता है। इस कार्य के लिए इन्हें 1961 में नोबेल पुरस्कार द्वारा सम्मानित किया गया। कैल्विन–बैन्सन चक्र में CO_2 के अपचयन को निम्न क्रमबद्ध पदों में समझा जा सकता है–

(I) कार्बोक्सिलीकरण (II) अपचयन (III) RuBP का पुनरुत्पादन

(I) **राइबुलोज 1,5–बाईफॉस्फेट का कार्बोक्सिलीकरण** – फॉस्फोरिलीकरण द्वारा बनने वाला राइबुलोज–1,5–बाईफॉस्फेट CO_2 ग्राही के रूप में कार्य करता है। राइबुलोज बाईफॉस्फेट के 6 अणु, RuBP कार्बोक्सीलेज (Rubisco) एन्जाइम की उपस्थिति में 6–6 अणु जल एवं CO_2 से क्रिया कर 12 अणु 3–फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल का निर्माण करते हैं, जो अप्रकाशिक अभिक्रिया का पहला स्थायी यौगिक है।

$$\underset{\text{(6 अणु)}}{\text{राइबुलोज–1,5–बाईफॉस्फेट}} + 6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{(RUBISCO)}]{\text{RuBP कार्बोक्सीलेज}} \underset{\text{12 (अणु)}}{\text{फॉस्फोग्सिरिक अम्ल}}$$

(II) **अपचयन**

1. फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल का फॉस्फोरिलीकरण – फॉस्फोग्लिसरिक काइनेज एन्जाइम की उपस्थिति में 3–फॉस्फोग्लिसरिक अम्ल के 12 अणु ATP के 12 अणुओं का उपयोग कर 12 अणु 1,3–डाइफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल एवं 12 अणु ADP का निर्माण करते हैं।

$$\underset{\text{(12 अणु)}}{\text{3–फॉस्फोग्लिसरिक एसिड}} \xrightarrow[\text{12 ATP} \rightarrow \text{12 ADP}]{\text{फॉस्फोग्लिसरिक काइनेज}} \underset{\text{(12 अणु)}}{\text{1,3–डाइफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल}}$$

2. 1,3–डाइफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल का अपचयन – कार्बोक्सिलीकरण एवं फॉस्फोरिलीकरण के पश्चात् 1,3–डाईफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल का अपचयन प्रकाशिक अभिक्रिया में बनने वाली अपचयन शक्ति (Reducing power) $NADPH+H^+$ के द्वारा होता है। इस अभिक्रिया में ट्रायोज फॉस्फेट डीहाइड्रोजीनेज एन्जाइम की उपस्थिति में 12 अणु 1,3–डाईफास्फोग्लिसरिक अम्ल से 12 अणु 3–फॉस्फोग्लिसरल्डिहाइड (3-PGAL), $NADP^+$ एवं फॉस्फोरिक अम्ल (H_3PO_4) के बनते हैं।

$$\underset{\text{(12 अणु)}}{\text{1,3–डाइफॉस्फोग्लिसरिक अम्ल}} \xrightarrow[\text{12 NADPH+H}^+ \rightarrow \text{12 NADP}^+]{\text{ट्रायोज फॉस्फेट डीहाईड्रोजीनेज}} \underset{\text{(12 अणु)}}{\text{3–फॉस्फोग्लिसरल्डिहाइड}} + 12H_3PO_4$$

इस प्रकार बनने वाले 3–फॉस्फोग्सिरल्डिहाइड के 12 अणुओं में से दो अणु मिलकर हेक्सोज (ग्लुकोज) शर्करा का निर्माण करते हैं जो बाद में सुक्रोज अथवा स्टार्च में रूपान्तरित हो जाती है तथा शेष बचे 10 अणु पुनः कई क्रमबद्ध जैवरासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा 6 अणु राईबुलोज मोनो फॉस्फेट का निर्माण करते हैं जो इस चक्र को निरन्तरता प्रदान करते हैं।

3. हेक्सोज शर्करा का निर्माण – फॉस्फोट्रायोज आइसोमरेज एन्जाइम की उपस्थिति में 3–फोस्फोग्लिसरल्डिहाइड का एक अणु, डाइहाइड्रोक्सी एसिटोन फॉस्फेट (DHAP) में परिवर्तित हो जाता है।

$$\text{3–फॉस्फोग्लिसरल्डिहाइड} \xrightarrow{\text{फॉस्फोट्रायोज आइसोमरेज}} \text{डाइहाइड्रोक्सीएसिटोन फॉस्फेट}$$

फ्रक्टोज–1, 6–डाईफॉस्फेट का निर्माण – एक–एक अणु डाइहाइड्रोक्सीएसिटोन फॉस्फेट व 3–फॉस्फोग्लिसरल्डिहाइड के एल्डोलेज एन्जाइम की उपस्थिति में संयुक्त होकर फ्रक्टोज–1, 6–डाइफॉस्फेट का निर्माण करते हैं।

$$\text{3-PGAL + DHAP} \xrightarrow{\text{एल्डोलेज}} \text{फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट}$$

फ्रक्टोज–6– फॉस्फेट का निर्माण – फॉस्फेटेज एन्जाइम की उपस्थिति में जल–योजन द्वारा फ्रक्टोज–1, 6– डाईफॉस्फेट से फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट तथा फॉस्फोरिक एसिड बनते है।

ग्लुकोज का निर्माण – फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट पहले ग्लूकोज–1–फॉस्फेट में तथा बाद में ग्लूकोज में परिवर्तित हो जाता है।

उपरोक्त अभिक्रिया श्वसन में सम्पन्न होने वाली ग्लाइकोलाइसिस की प्रक्रिया के विपरीत (Reverse) होती है। इस कारण इन्हें ग्लाइकोलाइटिक उत्क्रमण (Glycolytic reversal) भी कहा जाता है।

(III) **राइबुलोज–5–फॉस्फेट का पुनः उत्पादन** (Regeneration of ribulose-5-phosphate)

राइबुलोज–5–फॉस्फेट के अणुओं का पुनः बनना राइबुलोज फॉस्फेट की पुनः उत्पत्ति कहलाती है। राइबुलोज फॉस्फेट की पुनः उत्पत्ति शेष बचे 10 अणु 3-PGAL से निम्न क्रमबद्ध जैवरासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा सम्पन्न होती है।

(क) डाइहाड्रोक्सी एसिटोन फॉस्फेट का निर्माण – ट्रायोज फॉस्फेटेज आइसोमरेज एन्जाइम की उपस्थिति में 3-PGAL के 4 अणुओं से डाइहाइड्रोक्सी एसिटोन फॉस्फेट के 4 अणु बनते हैं।

$$\underset{\text{(4 अणु)}}{\text{3-PGAL}} \xrightarrow{\text{ट्रायोज फॉस्फेटेज आइसोमरेज}} \underset{\text{(4 अणु)}}{\text{DHAP}}$$

(ख) फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट का निर्माण – डाइहाइड्रोक्सी एसिटोन फॉस्फेट के दो अणु 3–फॉस्फोग्लिसरल्डिहाइड के दो अणुओं से क्रिया कर फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट के 2 अणुओं का निर्माण करते हैं। इस क्रिया को एल्डोलेज एन्जाइम उत्प्रेरित करता है।

$$\text{3-PGAL + DHAP} \xrightarrow{\text{एल्डोलेज}} \text{फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट}$$

(ग) फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट का निर्माण – फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट के दो अणुओं में 2 अणु जलयोजन द्वारा फॉस्फेटेज एन्जाइम की उपस्थिति में फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट व फॉस्फोरिक अम्ल का निर्माण होता है।

$$\underset{\text{(2 अणु)}}{\text{फ्रक्टोज–1,6–डाइफॉस्फेट}} \xrightarrow[2H_2O \;\; 2H_3PO_4]{\text{फॉस्फेटेज}} \underset{\text{(2 अणु)}}{\text{फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट}}$$

(घ) जाइलुलोज व इरिथ्रोज फॉस्फेट का निर्माण – उपरोक्त अभिक्रिया में बनने वाले फ्रक्टोज–6–फॉस्फेट के दो अणु, 2 अणु 3-PGAL से मिलकर 2–2 अणु जाइलुलोज–5–फॉस्फेट व इरिथ्रोज–4–फॉस्फेट का निर्माण करते हैं। इस क्रिया को उत्प्रेरित ट्रांसकीटोलेज एन्जाइम करता है।

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

(ङ) सिडोहेप्टुलोज–1, 7–डाइफॉस्फेट का निर्माण– इरिथ्रोज–4–फॉस्फेट, शेष बचे दो DHAP अणुओं से क्रिया कर सिडोहेप्टुलोज–1, 7–डाइफॉस्फेट का निर्माण करते हैं। इस क्रिया को उत्प्रेरित ट्रांसएल्डोलेज एन्जाइम करता है।

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

उपरोक्त अभिक्रिया में बनने वाले दो अणु सिडोहेप्टुलोज–1,7–डाईफॉस्फेट, फॉस्फेटेज एन्जाइम की उपस्थिति में जल–योजन द्वारा दो–दो अणु फॉस्फोरिक अम्ल व सिडोहेप्टुलोज–7–फॉस्फेट का निर्माण करते हैं।

$$\text{सिडोहेप्टुलोज–1,7–डाइफॉस्फेट} \xrightarrow[2H_2O \;\; 2H_3PO_4]{\text{फॉस्फेटेज}} \text{सिडोहेप्टुलोज–7–फॉस्फेट}$$

(च) राइबोज–5–फॉस्फेट व जाइलुलोज–5–फॉस्फेट का निर्माण– उपरोक्त अभिक्रिया में बनने वाले दो अणु सिडोहेप्टुलोज–7–फॉस्फेट, शेष बचे 2 अणु 3-PGAL से ट्रांसकीटोलेज एन्जाइम की उपस्थित में दो–दो अणु राइबोज–5–फॉस्फेट व जाइलुलोज–5–फॉस्फेट का निर्माण करते हैं।

सिडोहेप्टुलोज–7–फॉस्फेट (2 अणु) + 3-PGAL (2 अणु) —फॉस्फेटेज→ राइबोज–5–फॉस्फेट (2 अणु) + जाइलुलोज–5–फॉस्फेट (2 अणु)

(छ) उपरोक्त अभिक्रियाओं में बनने वाले चार अणु जाइलुलोज–5–फॉस्फेट व 2 अणु राईबोज–5–फॉस्फेट निम्न अभिक्रियाओं द्वारा 6 अणु राइबुलोज–5–फॉस्फेट के बनाते हैं।

(1) राइबोज–5–फॉस्फेट (2 अणु) —फॉस्फोपेन्टोज आइसोमरेज→ राइबुलोज–5–फॉस्फेट (2 अणु)

(2) जाइलुलोज–5–फॉस्फेट (4 अणु) —फॉस्फोपेन्टोज एपिमरेज→ राइबुलोज–5–फॉस्फेट (4 अणु)

(ज) राइबुलोज मोनोफास्फेट का फॉस्फोरिलीकरण – क्लोरोप्लास्ट के स्ट्रोमा में सम्पन्न होने वाली अप्रकाशिक अभिक्रिया में CO_2 को ग्रहण करने वाला यौगिक राइबुलोज–1,5–बाईफॉस्फेट [RuBP(5 carbon compound)] है, जिसका निर्माण राइबुलोज मोनोफॉस्फेट (राइबुलोज–5–फॉस्फेट) के (फॉस्फोपेन्टो काइनेज एन्जाइम की उपस्थिति में) फॉस्फोरिलीकरण द्वारा होता है। इस प्रक्रिया में ATP का उपयोग होता है तथा ADP बनती है। कार्बनडाईऑक्साइड के 6 अणुओं को ग्रहण करने के लिए 6 अणु राइबुलोज–1,5–बाईफॉस्फेट की आवश्यकता होती है। अतः 6 अणु राइबुलोज मोनो फॉस्फेट का फोस्फोरिलीकरण ATP के 6 अणुओं द्वारा होता है।

राइबुलोज–5–फॉस्फेट (6 अणु) —फॉस्फोपेन्टो काइनेज (6 ATP → 6 ADP)→ राइबुलोज–1,5–बाईफॉस्फेट (6 अणु)

इस प्रकार राइबुलोज–5–फॉस्फेट के 6 अणुओं से ATP की क्रिया के पश्चात् राइबुलोज 1–5–बाई फॉस्फेट के 6 अणुओं का निर्माण होता है जो कि पुनः अभिक्रिया में प्रयुक्त होते हैं।

प्रकाश श्वसन (Photorespiration) – यह हरे पौधों में प्रकाश की उपस्थिति में होने वाली क्रिया है, जिसमें पौधे ऑक्सीजन ग्रहण कर बिना ऊर्जा का निर्माण किए कार्बनिक पदार्थों का ऑक्सीकरण करते हैं तथा इस प्रक्रिया में कार्बनिक पदार्थों के ऑक्सीकरण के कारण CO_2 मुक्त होती है। अतः इस क्रिया में श्वसन की तरह भोज्य पदार्थों का विघटन तो होता है परन्तु ऊर्जा मुक्त नहीं होती इस कारण इसे नष्टकारी क्रिया भी कहा जाता है। यह क्रिया केवल C_3 पादपों में ही होती है। इस क्रिया में CO_2 की अधिकता में RUBISCO (राइबुलोज बाईफास्फेट कार्बोक्सीलेज ऑक्सीजिनेज) एन्जाइम जो कि CO_2 को RUBP से जोड़ता है, ऑक्सीजिनेज एन्जाइम की तरह कार्य करने लग जाता है। यह सम्पूर्ण क्रिया हरितलवक परऑक्सीसोम व माइटोकॉन्ड्रिया में सम्पन्न होती है। इसमें सर्वप्रथम 2 कार्बन युक्त पदार्थ ग्लाइकोलेट बनता है। इसलिए इसे C_2 चक्र अथवा ग्लाइकोलेट चक्र भी कहते हैं। इस चक्र का सर्वप्रथम अध्ययन डेकर एवं टिओ (Decker and Tio, 1959) ने किया। यह चक्र अधिकतर उन पौधों में होता है जिनमें C_3 चक्र के द्वारा (CO_2) का स्थिरीकरण होता है।

(ख) हैच–स्लैक चक्र या C_4 चक्र (Hatch-Slack Cycle or C_4 Cycle) – इस चक्र में पहला स्थायी यौगिक एक चार कार्बन परमाणु युक्त डाइकार्बोक्सिलिक अम्ल बनता है। इस कारण इस चक्र को C_4 चक्र भी कहा जाता है। गन्ने के पौधे में सन् 1957 में **कोर्टचॉक** (Kortschak) व सहयोगियों ने यह बताया कि प्रकाश संश्लेषण के दौरान बनने वाला पहला उत्पाद एक चार कार्बन परमाणु युक्त डाईकार्बोक्सिलिक अम्ल होता है। उष्णकटिबंधीय (Tropical) पादपों में उक्त चार कार्बन परमाणु युक्त यौगिक की पहचान की तथा कार्बनडाईऑक्साइड स्थिरीकरण

के नये प्रकार को बताया जिसे हैच–स्लेक अथवा C_4 चक्र कहा जाता है। यह चक्र एकबीजपत्री पादपों (मक्का, गन्ना, बाजरा, रागी) के अतिरिक्त कुछ द्विबीजपत्री पादपों जैसे– *अमरेंथस* (Amaranthus), *यूफोरबिया* (Euphorbia) व कई खरपतवारों (Weeds) में पाया जाता है। वे पौधे जिनमें C_4 चक्र पाया जाता है, C_4 पौधे (C_4 plants) कहलाते हैं।

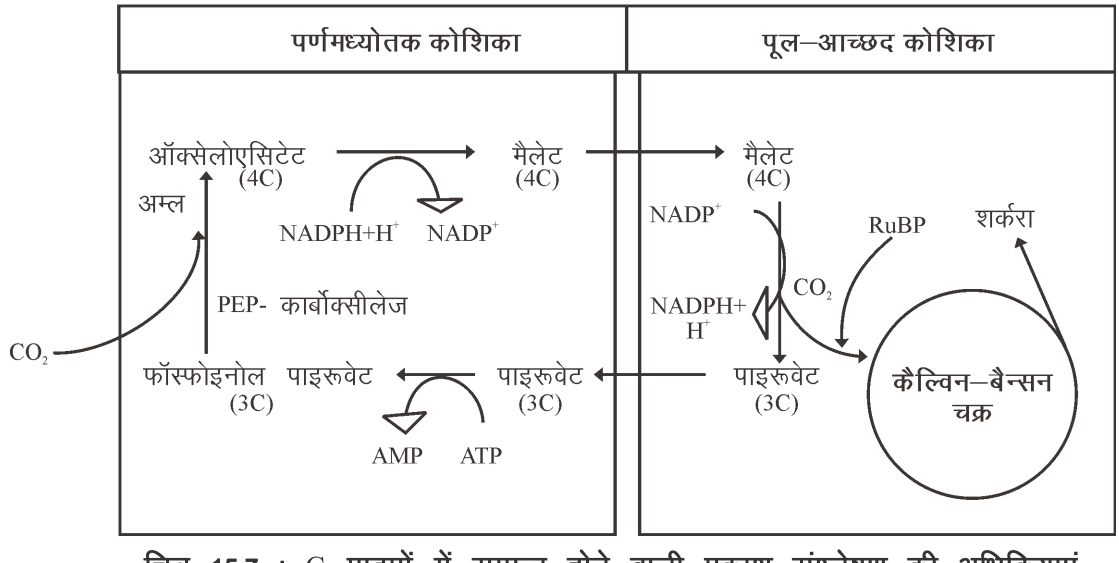
C_4 पौधों की पत्तियों में दो प्रकार की प्रकाशसंश्लेषी कोशिकाएँ पायी जाती हैं जिन्हें क्रमशः पर्ण मध्योतक कोशिकाएँ (Mesophyll cells) व पूल–आच्छद (Bundle sheath) कोशिकाएँ कहते हैं। पूल–आच्छद कोशिकाएँ, संवहन बण्डल पर माला (Wreath) रूपी रचना में आच्छद रहती हैं। जर्मन भाषा में रीथ (Wreath=kranz) को क्रेंज कहा जाता है। अतः पत्तियों की इस प्रकार की शारीरिकी क्रेंज शारीरिकी (Kranz anatomy) कहलाती है। C_4 पौधों की पत्तियों में पाये जाने वाले हरितलवक (Chloroplast) दो प्रकार (Dimorphic) के होते हैं। पर्णमध्योतक कोशिकाओं में पाये जाने वाले हरितलवक छोटे व सुविकसित ग्रेना युक्त होते हैं, जबकि पूल–आच्छद कोशिकाओं में पाये जाने हरितलवक आकार में बड़े व इनमें ग्रेना सामान्यतः अनुपस्थित होता है तथा थाइलेकॉइड केवल स्ट्रोमा पट्टलिकाओं के रूप में पाये जाते हैं। C_4 पादपों में प्रकाशिक अभिक्रियाएं पर्णमध्योतक कोशिकाओं में सम्पन्न होती है। जबकि कार्बनडाईऑक्साइड स्वांगीकरण (CO_2 assimilation) पूल–आच्छद कोशिकाओं में सम्पन्न होता है।

C_4 पादपों में प्रकाश श्वसन (Photorespiration) अनुपस्थित होता है। इस चक्र की मुख्य विशेषताएं ये हैं– 1. ये दो प्रकार की कोशिकाओं के सहयोग से सम्पन्न होता है। 2. पूल–आच्छद कोशिकाओं में CO_2 की सांद्रता बढ़ जाती है, जो कार्बोक्सिलीकरण में सहयोग करती है व प्रकाश श्वसन को रोकती है।

C_4 **चक्र की क्रिया विधि** (Mechanism of C_4 Cycle) – C_4 चक्र में वायुमण्डल से CO_2 रंध्रों के द्वारा पर्णमध्योतक कोशिकाओं के कोशिकाद्रव्य में प्रवेश करती है, जहाँ यह 3 कार्बन युक्त प्राथमिक ग्राही **फॉस्फाइनोल पाइरूविक अम्ल** (Phosphoenol pyruvic acid, PFP) द्वारा ग्रहण कर ली जाती है। परिणामस्वरूप 4 कार्बन युक्त यौगिक ऑक्सेलोएसिटिक अम्ल (Oxaloacetic acid) का निर्माण होता है, जो इस प्रक्रिया का प्रथम स्थायी उत्पाद है। यह अभिक्रिया फॉस्फोइनोल पाइरूवेट कार्बोक्सीलेज एन्जाइम (PEP carboxylase, PEPCO) द्वारा उत्प्रेरित होती है। यह प्रक्रिया CO_2 स्थिरीकरण अथवा कार्बोक्सिलीकरण कहलाती है। ऑक्सेलोएसिटिक अम्ल के अपचयन के पश्चात् मैलिक अम्ल पर्णमध्योतक कोशिकाओं के कोशिका द्रव्य से पूल–आच्छद कोशिका में प्रवेश करता है जहाँ डीकार्बोक्सिलीकरण (Decarboxylation) के पश्चात् CO_2 की सान्द्रता बढ़ जाती है। यह CO_2 अब C_3 चक्र में प्रवेश कर शर्करा का निर्माण करती है तथा बनने वाला 3 कार्बन परमाणु युक्त यौगिक (पाइरूविक एसिड) पुनः पर्णमध्योतक कोशिकाओं में प्रवेश कर जाता है। पर्णमध्योतक कोशिकाओं में पाइरूविक अम्ल, फॉस्फोइनोल पाइरूविक अम्ल का निर्माण करता है जो इस चक्र को निरन्तरता प्रदान करता है। इस प्रक्रम में 6 CO_2 के स्थिरीकरण में 30 ATP का उपयोग होता है। सम्पूर्ण चक्र को चित्र 15.7 के द्वारा समझा जा सकता है।

महत्त्व (Importance) – C_4 चक्र C_3 चक्र से अधिक दक्ष (Efficient) है क्योंकि –

1. C_4 पौधों में प्रकाश श्वसन अनुपस्थित होता है, इस कारण इन पौधों की उत्पादकता C_3 पौधों की अपेक्षा 3 से 4 गुना तक बढ़ जाती है।
2. इस चक्र का प्रमुख एन्जाइम (PEPCO) CO_2 की कम सान्द्रता पर भी क्रियाशील रहता है तथा



चित्र 15.7 : C_4 पादपों में सम्पन्न होने वाली प्रकाश संश्लेषण की अभिक्रियाएं

3. यह चक्र उच्च तापक्रम (30-45° C) पर भी क्रियाशील रहता है।

C_3 व C_4 चक्र में महत्वपूर्ण अन्तर निम्न सारणी 15.2 में दर्शाये गये हैं।

(ग) क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय [Crassulacean Acid Metabolism (CAM)] – जैसा कि पहले बताया जा चुका है कि C_3 एवं C_4 पादपों में CO_2 का प्रवेश पत्ती में दिन के समय होता है अर्थात् पत्ती में पाये जाने वाले रंध्र दिन में खुले रहते हैं। दिन में वाष्पोत्सर्जन की दर अधिक होती है। क्रेसूलसियन अम्ल उपापचय सामान्यतः माँसलोभिद् (Succulent) एवं शुष्क वातावरण में पाये जाने वाले पौधों में होता है। इन पादपों में रंध्र रात्रि के समय खुलते हैं तथा दिन में बन्द रहते हैं। अतः ये पौधे रात्रि में CO_2 को कार्बनिक अम्लों के रूप में (C_4 पादपों की तरह) एकत्रित कर लेते हैं एवं दिन में डीकार्बोक्सिलीकरण के द्वारा इन कार्बनिक अम्लों से मुक्त होने वाली CO_2 का उपयोग केल्विन–बैन्सन चक्र द्वारा कार्बोहाइड्रेट निर्माण में कर लिया जाता है।

अतः मॉसलोद्भिद् प्रकार के शुष्कोदभिद् पादपों में यह एक प्रकार का कार्यिकीय अनुकूलन है जिसके द्वारा बिना जल हानि के पौधे कार्बनिक पदार्थों का निर्माण कर लेते हैं। इस उपपाचयी क्रिया विधि का अध्ययन सबसे पहले क्रेसूलेसी कुल के पौधों में किया गया था इस कारण इसे क्रेसूलेसियन अम्ल उपापचय कहते हैं।

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

पादपों द्वारा होने वाली प्रकाश संश्लेषण की क्रिया वातावरणीय एवं आनुवंशिक कारकों द्वारा प्रभावित होती है। यहाँ वातावरणीय कारकों का अध्ययन बाह्य कारकों एवं आनुवंशिक कारकों का अध्ययन आन्तरिक कारकों के रूप में करेंगे–

(i) **बाह्य कारक** (External factors) – प्रकाश, कार्बनडाइऑक्साइड की उपलब्धता, तापमान, मृदा–जल आदि महत्त्वपूर्ण बाह्य कारक हैं जो प्रकाश संश्लेषण की क्रिया को प्रत्यक्ष अथवा परोक्ष रूप से प्रभावित करते हैं। इन कारकों के अध्ययन से पहले ब्लैकमेन के सीमाकारी कारकों के नियम का अध्ययन करना आवश्यक है।

ब्लैकमेन के सीमाकारी कारकों के नियम से पहले प्रकाश संश्लेषण को प्रभावित करने वाले कारकों के बारे में यह अवधारणा थी कि किसी कारक की वह मात्रा जिस पर प्रकाश संश्लेषण की क्रिया आरम्भ होती है उसे न्यूनतम बिन्दु, जिस मात्रा पर अधिकतम होती है उसे अनुकूलतम बिन्दु तथा वह अधिकतम मात्रा जिस पर प्रकाश संश्लेषण की क्रिया रूक जाती है उसे अधिकतम बिन्दु कहते हैं। इन तीनों अवस्थाओं को कार्डिनल बिन्दु (Cardinal points) कहा जाता है।

ब्लैकमेन (1905) के सीमाकारी कारकों के नियम के अनुसार यदि कोई प्रक्रिया अनेक कारकों द्वारा प्रभावित होती है, तो उस प्रक्रिया की दर सबसे कम मात्रा में उपस्थित या सबसे धीमे कारक पर निर्भर करती है। जैसे कि प्रकाश संश्लेषण की क्रिया

सारणी 15.2 : C_3 तथा C_4 चक्र में अन्तर

लक्षण	C_3 चक्र	C_4 चक्र
1. अनुकूल तापमान	20-25°C	30-45°C
2. क्रेंज शारीरिकी	नहीं पाई जाती है।	पाई जाती है।
3. CO_2 स्थिरीकरण का स्थल	केवल पर्ण मध्योतक कोशिकाओं में होता है।	पर्ण मध्योतक एवं पूल–आच्छद कोशिकाओं में होता है।
4. प्रथम स्थायी उत्पाद	PGA (3 कार्बन पदार्थ)	ऑक्सेलोएसिटिक अम्ल (4 कार्बन पदार्थ)
5. CO_2 स्थिरीकरण के पथ	कैल्विन–बैन्सन चक्र	पर्ण मध्योतक कोशिकाओं में कैल्विन–बैन्सन चक्र तथा पूल–आच्छद कोशिकाओं में हेच–स्लैक चक्र
6. CO_2 ग्राही	RUBP (5 कार्बन पदार्थ)	PEP (3 कार्बन पदार्थ–प्राथमिक ग्राही)
7. कार्बोक्सिलीकरण के लिए मुख्य एन्जाइम	RUBISCO	PEP कार्बोक्सीलेज व RUBISCO
8. CO_2 स्थिरीकरण की दर	कम	अधिक
9. प्रकाश श्वसन	अधिक होता है	नहीं होता।
10. उत्पादकता	कम	अधिक

के लिये प्रकाश उपलब्ध है परन्तु CO_2 नहीं अतः प्रकाश संश्लेषण की दर CO_2 की उपलब्धता पर निर्भर करती है। अगर CO_2 व प्रकाश दोनों ही सीमाकारी हैं तो प्रकाश संश्लेषण की दर अधिक सीमाकारी कारक की मात्रा पर निर्भर करेगी।

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया विधि को प्रभावित करने वाले प्रमुख बाह्य कारक निम्न हैं–

प्रकाश (Light) – प्रकाश संश्लेषण की क्रिया प्रकाश स्पेक्ट्रम के दृश्य भाग (400 नेनोमीटर से 700 नेनोमीटर) में ही सम्पन्न होती है जिसे PAR कहते हैं। यह क्रिया प्रकाश के प्रकार एवं उसकी तीव्रता द्वारा प्रभावित होती है। प्रकाश संश्लेषण की अधिकतम दर दृश्य स्पैक्ट्रम के लाल भाग में एवं उससे कम नीले रंग में होता है। हरे रंग में प्रकाश संश्लेषण नहीं होता है। ज्यों–ज्यों प्रकाश की तीव्रता बढ़ती है प्रकाश संश्लेषण की दर प्रारम्भ में बढ़ती है परन्तु उच्च प्रकाश तीव्रता पर इस क्रिया की दर घट जाती है। क्योंकि या तो प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में भाग लेने वाले अन्य कारक सीमाकारी हो जाते हैं या क्लोरोफिल वर्णकों का विनाश हो जाता है।

क्लोरोफिल का विनाश ऑक्सीजन की उपस्थिति में होता है, अतः इसे क्लोरोफिल का प्रकाशिक ऑक्सीकरण (Photo-oxidation) कहते हैं। प्रकाश प्रखरता/तीव्रता के प्रति विभिन्न जातियों के पौधों की सहिष्णुता भी भिन्न–भिन्न होती है। उसके आधार पर कुछ पौधे तीव्र सूर्य के प्रकाश के आदि होते हैं जिन्हें सूर्यानुरागी (Heliophyte) व कुछ पौधे छाया में वृद्धि करते हैं। जिन्हें छायानुरागी (Sciophyte) पौधे कहते हैं।

तापक्रम (Temperature) – प्रकाश संश्लेषण की क्रिया तापक्रम की सीमाओं में सम्पन्न होती है। कोनीफरस में –35°C तापक्रम पर भी प्रकाश संश्लेषण की क्रिया हो सकती है। कुछ मरूद्भिद् पादपों में (55°C) पर भी प्रकाश संश्लेषण की क्रिया सम्पन्न होती है। अत्यधिक तापक्रम पर प्रकाश संश्लेषण की क्रिया की दर में कमी आती है, क्योंकि – (1) उच्च ताप पर प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में भाग लेने वाले एन्जाइम विकृत हो जाते हैं तथा (2) C_3 चक्र में भाग लेने वाले एन्जाइम RUBISCO की CO_2 से बंधुता (Affinity) घट जाती है। C_4 पौधे कम तापक्रम के प्रति संवेदी होते हैं, क्योंकि इस क्रिया में भाग लेने वाला एन्जाइम पाइरूवेट डाई काइनेज निम्न तापक्रम के लिए संवेदी होता है।

अलग–अलग वातावरण में पाये जाने वाले पौधे तापक्रम के प्रति भिन्न रूप में संवेदी होते हैं।

कार्बनडाइऑक्साइड (CO_2) – वायुमण्डल में कार्बनडाइऑक्साइड की मात्रा 0.03 प्रतिशत तक होती है जो दूसरी गैसों की तुलना में बहुत कम है। C_3 व C_4 पादपों की उपलब्ध CO_2 की मात्रा के प्रति अनुक्रिया भिन्न–भिन्न होती है। पादपों में जब दूसरे कारक सीमाकारी नहीं हो तब CO_2 की सान्द्रता 0.05 प्रतिशत तक बढ़ने के साथ–साथ प्रकाश संश्लेषण की दर बढ़ती है। जबकि C_4 पादपों में प्रकाश संश्लेषण की दर 0.03 प्रतिशत तक CO_2 की सान्द्रता के बढ़ने तक ही बढ़ती है। वैज्ञानिकों के अनुसार 2020 तक वातावरण में CO_2 की सान्द्रता अनुमानित 0.06 प्रतिशत तक बढ़ जायेगी जिससे C_3 पौधों में वृद्धि ज्यादा होगी।

जल (Water) – पौधों द्वारा मृदा से अवशोषित जल के केवल 1 प्रतिशत भाग का ही प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में उपयोग होता है। अतः यह प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में सीधे प्रयोग में आने वाले पदार्थ के रूप में सीमाकारी कारक नहीं होता है।

(ii) **आन्तरिक कारक** (Internal factors) – प्रकाश संश्लेषण की दर को प्रभावित करने वाले प्रमुख आन्तरिक कारक निम्न हैं–

पर्णहरित (Chlorophyll) – सामान्य परिस्थितियों में यह सीमाकारी कारक नहीं है। पर्णहरित प्रकाश संश्लेषण की क्रिया के लिए अति आवश्यक कारक है। इसकी अनुपस्थिति में प्रकाश संश्लेषण की क्रिया सम्भव नहीं है।

संचित भोजन की मात्रा (Amount of stored food) – पादपों की कोशिकाओं में संचित भोजन की मात्रा बढ़ने के साथ प्रकाश संश्लेषण की दर घटती है। प्रकाश संश्लेषज (Photo synthates) का पौधे के दूसरे भागों में स्थानान्तरण हो जाने पर यह दर पुनः बढ़ जाती है।

अतः प्रकाश संश्लेषण एक प्रकाश व जैवरासायनिक प्रक्रिया है। जो उपरोक्त कारकों द्वारा प्रभावित होती है।

प्रकाश संश्लेषजों का स्थानान्तरण (Transportation of Photosynthates)

प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया में बनने वाले कार्बोहाइड्रेट्स प्रकाश संश्लेषज कहलाते हैं। जिनका निर्माण पौधों की हरी पत्तियों एवं हरे भागों में होता है। इन उच्च ऊर्जा वाले कार्बनिक पदार्थों का पत्तियों से पौधों के अन्य भागों जैसे– जड़ एवं तने के ऊतकों में स्थानान्तरण फ्लोएम द्वारा होता है। इन पदार्थों का संग्राहक ऊतकों तक होने वाला स्थानान्तरण फसलों की उत्पादकता बढ़ाता है। पौधों में सुक्रोज प्रमुख कार्बोहाइड्रेट है, जिसका स्थानान्तरण पत्तियों से संग्राहक अंगों तक होता है। क्योंकि यह एक अनअपचायक शर्करा है व रासायनिक रूप से स्थायी है। संग्राहक भागों में यह स्टार्च के रूप में संचित रहती है।

यह प्रकाश संश्लेषज पादपों के अन्य भागों में सम्पन्न होने वाली जैवरासायनिक अभिक्रियाओं को श्वसन द्वारा ऊर्जा प्रदान करते हैं।

प्रकाश संश्लेषण का महत्त्व

(Significance of Photosynthesis)

प्रकाश संश्लेषण की क्रिया पृथ्वी पर सभी सजीवों के लिए महत्त्वपूर्ण है क्योंकि यही ऐसी क्रिया है जिससे सूर्य के प्रकाश रूपी भौतिक ऊर्जा का रूपान्तरण कार्बोहाइड्रेट रूपी रासायनिक ऊर्जा में होता है। पृथ्वी पर पाये जाने वाले सभी जीव प्रत्यक्ष या परोक्ष रूप से अपने भोजन के लिये पौधों पर निर्भर रहते हैं। इस क्रिया के द्वारा ही पेड़–पौधे प्रकाश ऊर्जा को कार्बनिक पदार्थों में रूपान्तरित करते हैं, जिससे इनका जैव–भार बढ़ता है, जिसका मानव तथा इस पृथ्वी पर पाये जाने वाले अन्य विषमपोषी जीव प्रत्यक्ष या अप्रत्यक्ष रूप से उपयोग करते है। इस क्रिया के द्वारा ही प्राण वायु O_2 वायुमण्डल में बनी रहती है जो जैव मण्डल में पाये जाने वाले जीवों के लिए काम आती है।

दूसरे शब्दों में हम यह कह सकते हैं कि पृथ्वी पर पाये जाने वाले सभी वायवीय जीवों का जीवन प्रकाश संश्लेषण की क्रिया के बिना संभव नहीं है। इस कारण से ही वैज्ञानिक समुदाय तरह–तरह के प्रयोग कर फसलों की उच्च उत्पादकता वाली किस्में उत्पन्न करते हैं। सभी देशों की सरकारें व अन्तर्राष्ट्रीय समाजसेवी संस्थाएं वृक्षारोपण पर बल देते हैं, जिससे सूर्य की अथाह प्रकाश ऊर्जा का रासायनिक ऊर्जा में रूपान्तरण हो सके।

रसायन संश्लेषण (Chemosynthesis)

कुछ जीवाणु अकार्बनिक पदार्थों के ऑक्सीकरण द्वारा मुक्त होने वाली रासायनिक ऊर्जा का उपयोग कार्बनिक (भोज्य) पदार्थ बनाने में करते हैं, यह क्रिया रसायन संश्लेषण कहलाती है। कुछ महत्त्वपूर्ण रसायन संश्लेषी जीवाणु निम्न हैं–

(i) ***नाइट्रोसोमोनास* व *नाइट्रोकोकस*** – ये जीवाणु अमोनिया का ऑक्सीकरण नाइट्राइट में करते हैं व इस क्रिया में मुक्त होने वाली रासायनिक ऊर्जा का उपयोग कार्बनिक पदार्थ बनाने में किया जाता है।

(ii) **आयरन जीवाणु** – जैसे *फैरोबेसिलस* व *लेप्टोथ्रिक्स* आदि फैरस (Fe^{+2}) का ऑक्सीकरण फैरिक (Fe^{+3}) में करते हैं व मुक्त होने वाली ऊर्जा का उपयोग कार्बनिक पदार्थों के संश्लेषण में करते हैं।

रसायनी संश्लेषण के कुछ अन्य उदाहरण सल्फर जीवाणु (*थायोथ्रिक्स*), हाइड्रोजन जीवाणु (*बेसिलस पेन्टोट्रोपस*) व कार्बन जीवाणु (*बेसिलस ओलिगोकार्बोफिलस*) है।

महत्वपूर्ण बिन्दु

1. प्रकाश संश्लेषण एक महत्त्वपूर्ण जैविक क्रिया है जिसमें हरे पादप सूर्य के प्रकाश की उपस्थिति में कार्बनडाइऑक्साइड व जल द्वारा जटिल कार्बनिक यौगिकों का निर्माण करते हैं।
2. प्रकाश संश्लेषण की क्रिया क्लोरोप्लास्ट में सम्पन्न होती है, जिसमें पाये जाने वाले थायलेकॉइड में हरे वर्णक क्लोरोफिल्स व सहायक वर्णक जिन्हें कैरोटिनॉइड कहते हैं, पाये जाते हैं।
3. थायलेकॉइड एक दूसरे के ऊपर व्यवस्थित होकर ग्रेना का निर्माण करते हैं जहाँ प्रकाश संश्लेषण की प्रकाशिक अभिक्रियायें सम्पन्न होती हैं।
4. क्लोरोफिल-a प्रकाश रासायनिक अभिक्रियाओं में अभिक्रिया केन्द्र की तरह कार्य करता है।
5. प्रकाश ऊर्जा का अवशोषण प्रारम्भ में कई क्लोरोफिल अणुओं एवं अन्य सहायक वर्णकों द्वारा होता है, जो बाद में इस प्रकाश ऊर्जा का अभिक्रिया केन्द्र में स्थानान्तरित कर देते हैं। ये सभी वर्णक मिलकर दो प्रकाश तंत्रों का निर्माण करते हैं, जिन्हें प्रकाश तंत्र-I व प्रकाश तंत्र-II कहा जाता है।
6. प्रकाश रासायनिक अभिक्रिया के दौरान जल का प्रकाशिक अपघटन होता है जिसमें O_2 मुक्त होती है। यह क्रिया प्रकाश तंत्र-II के द्वारा होती है। इस क्रिया में मुक्त होने वाले इलेक्ट्रॉन्स, इलेक्ट्रॉन परविहन श्रृंखला की शुरूआत करते हैं। इस प्रक्रिया में बनने वाले ATP व $NADPH+H^+$ का उपयोग CO_2 के अपचयन में किया जाता है। जिससे कार्बोहाइड्रेट्स का निर्माण होता है।
7. कार्बनडाइऑक्साइड का अपचयन स्ट्रोमा में होता है जहाँ इस क्रिया के लिए आवश्यक सभी एन्जाइम पाये जाते हैं। RUBISCO एन्जाइम प्रारम्भिक अभिक्रिया उत्प्रेरित करता है, जिससे 3 कार्बन परमाणु युक्त यौगिक 3–फॉस्फोग्लिसरिक अम्लका निर्माण होता है। इस कारण कार्बन स्थिरीकरण का यह पथ C_3 चक्र कहलाता है। इस चक्र को सबसे पहले कैल्विन व साथियों ने समझाया था इस कारण इसे कैल्विन–बैन्सन चक्र भी कहा जाता है। C_3 पादपों में होने वाले प्रकाश श्वसन में स्थिरीकृत कार्बनिक यौगिकों का ह्रास होता है परन्तु ऊर्जा अणुओं का निर्माण नहीं होता है।
8. कुछ पादपों में कार्बन स्थिरीकरण का पहला उत्पाद चार कार्बन युक्त योगिक होता है अतः इन पादपों को C_4 पादप व इस चक्र को C_4 चक्र कहा जाता है। C_4 पादपों में प्रकाश श्वसन नहीं होता है।
9. पादपों में प्रकाश संश्लेषण की दर कई वातावरणीय कारकों पर निर्भर करती है जिसमें से CO_2 की सान्द्रता, प्रकाश की तीव्रता, जल की उपलब्धता व तापमान प्रमुख हैं। प्रकाश संश्लेषण की दर पत्ती की आयु तथा क्लोरोफिल व सहायक वर्णकों की मात्रा पर भी निर्भर करती है।

10. प्रकाश संश्लेषण का अन्तिम उत्पाद सुक्रोज है, जिसका निर्माण पर्णमध्योतक कोशिका के कोशिकाद्रव्य में होता है तथा इसका पौधे के अन्य भागों में स्थानान्तरण फ्लोयम ऊतकों द्वारा होता है।

अभ्यासार्थ प्रश्न

बहुचयनात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण में मुक्त होने वाली ऑक्सीजन का स्रोत है–
   (अ) जल (ब) कार्बनडाइऑक्साइड
   (स) ग्लूकोज (द) अ, ब दोनों
2. प्रकाश तंत्र-I का अभिक्रिया केन्द्र है–
   (अ) P_{700} (ब) P_{660}
   (स) P_{680} (द) P_{450}
3. प्रकाश संश्लेषण की अप्रकाशिक अभिक्रिया सम्पन्न होती है–
   (अ) स्ट्रोमा में (ब) ग्रेना में
   (स) माइटोकॉन्ड्रिया में (द) उपरोक्त सभी में
4. निम्न में से C_4 पादप कौन–सा है–
   (अ) सूर्यमुखी (ब) मटर
   (स) आलू (द) *अमरेन्थस*
5. C_4 चक्र में कार्बनडाइऑक्साइड का प्राथमिक स्थिरीकरण निम्न में से किसके द्वारा होता है–
   (अ) RuBP (ब) ऑक्सेलो एसिटिक अम्ल
   (स) PEP (द) फॉस्फोग्लाइकोलिक अम्ल
6. प्रकाश संश्लेषण का प्रथम चरण है–
   (अ) तीन परमाणु युक्त यौगिकों का जुड़कर ग्लुकोज बनाना
   (ब) ATP का निर्माण
   (स) जल का आयनीकरण
   (द) प्रकाश–फोटोन के कारण क्लोरोफिल से इलेक्ट्रॉन का उत्तेजित होना
7. निम्न में से क्रेन्ज शारीरिकी (Kranz anatomy) पायी जाती है–
   (अ) C_3 पादप में (ब) C_2 पादप में
   (स) C_4 पादप में (द) मॉंसलोद्भिदों में
8. निम्न में से क्लोरोफिल का संरचनात्मक घटक है–
   (अ) Mg^{++} (ब) Mn^{++}
   (स) Zn^{++} (द) Fe^{++}
9. प्रकाश श्वसन निम्न में से किसका लाक्षणिक लक्षण है–
   (अ) C_3 पौधों में (ब) CAM पौधों में
   (स) C_4 पौधों में (द) सभी पौधों में
10. पादपों में होने वाली अप्रकाशिक अभिक्रिया (C_3 चक्र) का पहला स्थायी उत्पाद है–
   (अ) PGA (ब) RUBP
   (स) PEP (द) OAA

अतिलघुत्तरात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण को परिभाषित कीजिये।
2. हरे पौधों में प्रकाश ऊर्जा को रासायनिक ऊर्जा में रूपांतरित करने वाले वर्णकों को समझाइये।
3. प्रकाश संश्लेषण का रासायनिक समीकरण लिखिये।
4. प्रकाशिक एवं अप्रकाशिक अभिक्रिया में अन्तर बताइये।
5. "रेड ड्रॉप" को समझाइये।
6. इमर्सन वृद्धिकरण प्रभाव को समझाइये।
7. प्रकाश तंत्र-I एवं प्रकाश तंत्र-II में अन्तर बताइये।
8. प्रकाश श्वसन को परिभाषित कीजिये।
9. C_3 एवं C_4 पादपों में अन्तर लिखिये।
10. कार्बन डाइऑक्साइड के अपचयन के लिये आवश्यक प्रारम्भिक एन्जाइम का नाम लिखिये।
11. क्लोरोप्लास्ट को समझाइये।

लघुत्तरात्मक प्रश्न

1. प्रकाश संश्लेषण के इतिहास का संक्षिप्त में वर्णन कीजिय।
2. क्लोरोफिल वर्णक क्या होता है इसकी संरचना लिखिये।
3. प्रकाश तंत्र-I की क्रिया विधि को समझाइये।
4. चक्रीय एवं अचक्रीय प्रकाश फॉस्फोरिलीकरण का सचित्र वर्णन कीजिये।
5. प्रकाश संश्लेषण का महत्व बताइये।
6. प्रकाश संश्लेषण की क्रिया विधि सचित्र समझाइये।

निबन्धात्मक प्रश्न

1. प्रकाश तंत्र-I एवं प्रकाश तंत्र-II का सचित्र वर्णन लिखिये।
2. पादपों में कार्बन स्थिरीकरण की प्रक्रियाओं का सचित्र वर्णन कीजिये।
3. प्रकाश संश्लेषण को प्रभावित करने वाले कारकों का वर्णन कीजिये तथा इसके महत्व को समझाइये।
4. केल्विन–बैन्सन चक्र का सचित्र वर्णन कीजिये।

उत्तरमाला: 1 (अ) 2 (अ) 3 (अ) 4 (द) 5 (स) 6 (द) 7 (स) 8 (अ) 9 (अ) 10 (अ)