

บทที่ 10

**PHOTOSYNTHESIS : PIGMENTS & ENERGY**

# การสังเคราะห์แสง

## 1. บทนำ

การสังเคราะห์แสง เป็นขบวนการที่พืชนำพลังงานแสงไปเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี ในขบวนการนี้ พืชจะใช้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อไปสร้างสารคาร์โบไฮเดรตอย่างง่าย ๆ และได้ ออกซิเจนเป็นผลพลอยได้ออกมา คาร์โบไฮเดรตที่ได้จะถูกนำไปใช้สร้างสารประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการดำรงชีพของพืช เช่น โปรตีน ไขมัน และแป้ง เป็นต้น ต่อมาสารเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และสร้างใบ ลำต้น ราก ดอก ผล เมล็ด และเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในต้นพืช มนุษย์ได้นำส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืชมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมายตลอดเวลา นอกจากนี้สัตว์บางชนิดยังใช้พืชเป็นอาหารอีกด้วย และต่อมาสัตว์ก็จะเป็นอาหารของมนุษย์ จะเห็นได้ว่า การสังเคราะห์แสง เป็นขบวนการหนึ่งที่ทำให้พืชดำรงชีพอยู่ได้ และยังเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์และสัตว์ในทางอ้อมอีกด้วย

## 2. ข้อสังเกตและการค้นพบในอดีต

Van Helmont (1648) ได้ปลูกต้นหลิว (willow) ต่อมาประมาณ 5 ปี ได้พบว่า ต้นหลิวมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากมาย ในขณะที่ดินที่ใช้ปลูกต้นหลิวมีน้ำหนักลดลงเพียงเล็กน้อย และตลอดเวลาการปลูก เขาได้ใช้น้ำรดต้นหลิวเพียงอย่างเดียว และเขาได้สรุปว่า พืชเจริญเติบโตจากน้ำ

ความคิดของ Van Helmont นี้ได้เกี่ยวข้องกับอากาศและมีส่วนชี้ให้เห็นว่า การเจริญเติบโตของพืชเกี่ยวข้องกับดินเพียงเล็กน้อย ซึ่งด้านความคิดของชาวกรีกโบราณที่ว่า พืชได้รับอาหารจากดินโดยตรง และชาวกรีกได้พบว่า เมื่อใส่เศษพืชและซากสัตว์ลงในดินแล้ว พืชจะเจริญงอกงามดีขึ้น

Joseph Prestley (1771-72) ได้ทำการทดลองเป็นเรื่องแรกเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสง และพบว่า มีแก๊สออกซิเจนถูกปล่อยออกมาขณะที่มีการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้น

Jan Ingen-Housz (1778-79) ได้ทำการทดลองพืชในครอบแก้ว และพบว่า (1)

การสังเคราะห์แสงสามารถเปลี่ยนอากาศเสียให้เป็นอากาศดีได้ (2) เฉพาะพืชที่มีสีเขียว  
ในที่ที่มีแสงเท่านั้น ที่สามารถเปลี่ยนอากาศเสียให้เป็นอากาศดีได้

อากาศเสียในการทดลองคืออากาศในครอบแก้วหลังจากจุดเทียนไข และอากาศดีคืออากาศในครอบแก้วที่สามารถจุดเทียนไขติด

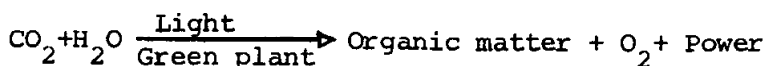
Jean Senebier (1782) ได้แสดงให้เห็นว่าพืชที่มีสีเขียวจะสร้างแก๊สออกซิเจนได้ก็ต่อ  
เมื่อมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Nicholar Theodore de Saussure (1804) ได้แสดงให้เห็นว่า (1) การสร้างแก๊ส  
ออกซิเจนในการสังเคราะห์แสงของพืชจะต้องมีแสงเข้าเกี่ยวข้องด้วย (2) ปฏิกริยาดัง-  
กล่าวจะต้องมีน้ำมาเกี่ยวข้องด้วย

ข้อสรุปของ de Saussure นี้สนับสนุนการทดลองของ Ingen-Housz

Dutrochet (1837) ได้พิสูจน์ว่าคลอโรฟิลล์มีความสำคัญในการสังเคราะห์แสง

Mayer (1842) ได้อธิบายว่า ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่พืชใช้ในขบวนการสังเคราะห์  
แสง พืชรับพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้  
ดังนี้

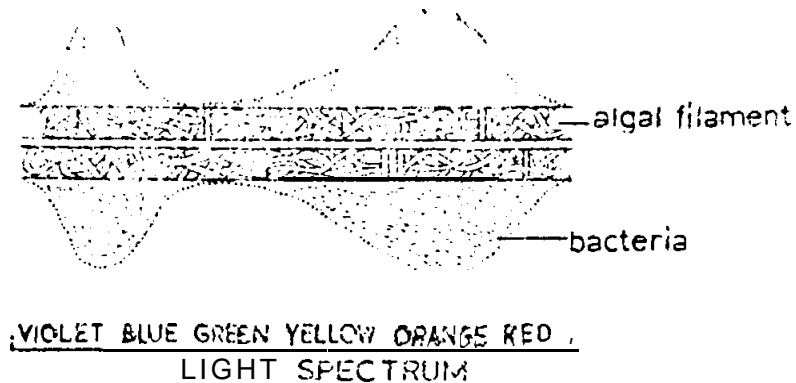


Liebig (1845) ได้อธิบายว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกี่ยวข้องกับการสร้างอินทรีย์สาร  
ในขบวนการสังเคราะห์แสง

Sachs (1864) ได้รายงานว่ามี การสร้างคาร์โบไฮเดรตในการสังเคราะห์แสง โดยใช้  
ใบพืชที่ติดอยู่กับต้นพืชในการทดลอง

Engelman (1882) ได้ทำการทดลอง เรื่องแสงสีต่าง ๆ ในการสังเคราะห์แสงของสา-  
หร่ายสีเขียว โดยใช้แอโรบิกแบคทีเรียชนิดเคลื่อนที่ได้ (motile aerobic bacteria)

เป็นตัววัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา และพบว่า สาหร่ายสีเขียวมีการสังเคราะห์แสงได้ดีในแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดง (ดูรูปที่ 1)



รูปที่ 1 แสดงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียขณะที่สาหร่ายสีเขียวได้รับแสงสีต่าง ๆ F.F. Blackman (1905) ได้แสดงให้เห็นว่า ขบวนการสังเคราะห์แสงส่วนหนึ่งไม่ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแสงโดยตรง

Warburg (1923) ใช้สาหร่าย *Chlorella* เป็นพื้นฐาน (basic system) ในการศึกษาเรื่องการสังเคราะห์แสง

Van Neil (1930) แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียบางชนิดใช้  $H_2S$  แทนการใช้น้ำในขบวนการสังเคราะห์แสง

Robert Hill (1937) ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า การสังเคราะห์แสงในส่วนของที่ต้องใช้แสง (light reaction) เกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์

Ruben (1943) พบว่าแก๊สออกซิเจนได้มาจากโมเลกุลของน้ำ

Melvin Calvin and Andrew Benson (1940-50) ได้อธิบายการตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ  $C_3$  โดยใช้  $^{14}CO_2$  ในการทดลอง (ดูรายละเอียดในหัวข้อ

Carbon reduction reaction หน้า . . . . .j

Kortschak (1954) พบการสร้าง  $C_4$  - dicarboxylic acid ในใบอ้อยที่ได้รับแสง

Daniel Arnon (1954) พบว่า Light reaction และ Dark reaction ของการสังเคราะห์แสง เป็นปฏิกิริยาที่แยก เป็น ๒ ตอน

Emerson และคณะ (1957) พบว่าแสงสีน้ำเงินกับแสงสีแดงร่วมกัน จะทำให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นได้ดีกว่าแสงสีน้ำเงินหรือแสงสีแดงเพียงอย่างเดียวรวมกัน จูคำอธิบายเรื่อง Emerson Effect หน้า 1๑๐

Woodward (1960) ได้วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลคลอโรฟิลล์ -เอ และสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ - เอ ในห้องปฏิบัติการได้

Arnon (1967) ได้อธิบายเรื่อง photosystem 2 ระบบที่เกิดขึ้นในขบวนการสังเคราะห์แสง

Hatch and Slack (1966) ได้อธิบาย  $C_4$  - dicarboxylic acid pathway

Lactch (1968-69) อธิบายโครงสร้างอย่างละเอียดของbundle sheath และ mesophyll

Rouhani (1973) ได้อธิบาย pathway ในพืช CAM

### 3. Photosynthetic Pigments

สิ่งมีชีวิตที่มีการสังเคราะห์แสงจะมี pigments ชนิดต่าง ๆ อยู่หลายชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น ๓ ประเภทดังนี้คือ (1) Chlorophylls (2) carotenoids และ (3) phycobilins Pigment ที่มีความเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง (photosynthetic pigments) ที่สำคัญนั้นได้แก่ประเภท Chlorophyll สำหรับอีก ๒ ประเภทเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงทางอ้อม รายละเอียดของ pigments ทั้งสามประเภทมีดังนี้

#### 3.1 Chlorophyll

คลอโรฟิลล์ที่พบในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงมีดังต่อไปนี้

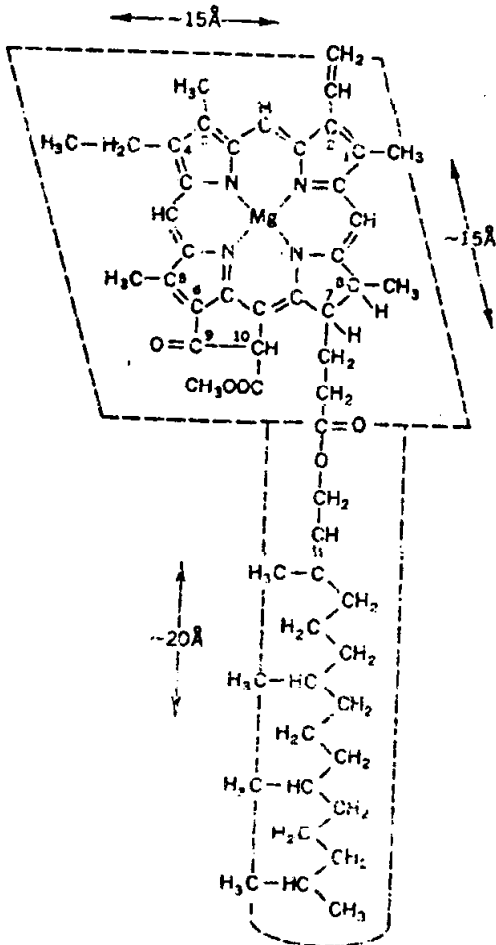
- |                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| (1) Chlorophyll-a | (2) Chlorophyll-b |
|-------------------|-------------------|

- |                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| (3) Chlorophyll-c          | (4) Chlorophyll-d           |
| (5) Chlorophyll-e          | (6) Bacterio chlorophyll-a  |
| (7) Bacterio chlorophyll-b | (8) Bacterio chlorophyll-c  |
| (9) Bacterio chlorophyll-d | (10) Chlorobium chlorophyll |

คลอโรฟิลล์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน และสามารถพบในสิ่งมีชีวิตที่ต่างกัน

(ดูตารางที่ 1)

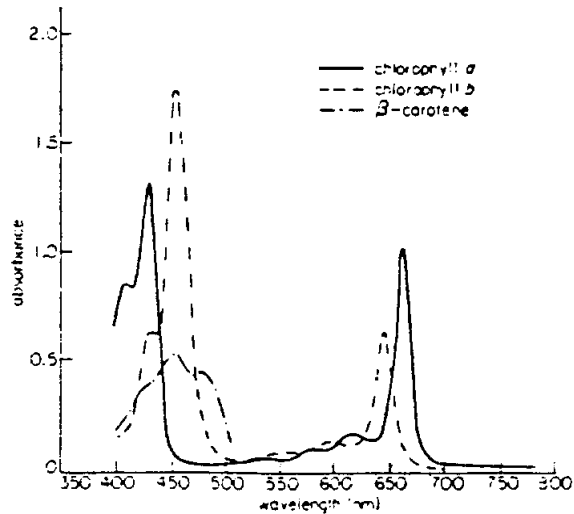
(1) Chlorophyll-a คลอโรฟิลล์-เอ เป็น pigment ที่พบได้ในสิ่งมีชีวิตที่



พบได้ในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสง  
ได้ ยกเว้น แบคทีเรีย หรืออาจจะ  
กล่าวอย่างหนึ่งได้ดังนี้คือ สิ่งมีชีวิต  
ที่มีการสังเคราะห์แสงและปล่อยแก๊ส  
ออกซิเจนออกมาจะมี chlorophyll-a  
อยู่ในเซลล์ที่มีสีเขียว คลอโรฟิลล์-เอ  
มีน้ำหนักโมเลกุล ๘๖๖.5 ประกอบด้วย  
โครงสร้าง 2 ส่วนคือ porphyrin  
ring กับ phytol chain (ดูรูปที่ 2)  
porphyrin มีลักษณะค่อนข้างแบน  
เป็นเหลี่ยม ขนาดประมาณ 15 Å ×  
15 Å ตรงกลางมีธาตุแมกนีเซียม  
เป็นองค์ประกอบ สำหรับ phytol  
chain เป็นโครงสร้างที่ต่อจาก ring  
มีความยาวประมาณ 20 Å มีคาร์-  
บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ 20 อะตอม

รูปที่ ๒ แสดงโครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์-เอ  
ส่วนบนเป็น porphyrin ring และส่วนล่างเป็น  
phytol chain

คลอโรฟิลล์-เอ ที่ละลายในอีเธอร์สามารถดูดแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 430 nm ได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 662 nm แต่สามารถดูดแสงได้ช่วงคลื่นก่อนสีแดง (615 nm) ได้น้อยมาก (ดูรูปที่ 3)

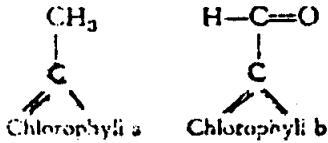


รูปที่ 3 แสดง absorption spectra ของคลอโรฟิลล์-เอ, คลอโรฟิลล์-บีและเบตาแคโรทีน

สำหรับคลอโรฟิลล์-เอ ที่อยู่ในสภาพธรรมชาติ (อยู่ในเซลล์) สามารถดูดแสงสีแดงได้ดี เช่น เราอาจพบว่าคลอโรฟิลล์-เอ ในเซลล์ดูดแสงในช่วงคลื่นตั้งแต่ 670 ถึง 673 nm ได้ดีที่สุด (ในกรณีนี้ เราเรียกคลอโรฟิลล์-เอ นั้นว่า Chl  $a_{670}$  ซึ่งย่อมาจาก chlorophyll- $a_{670}$  หรืออาจจะเป็นช่วงคลื่นตั้งแต่ 680 ถึง 683 nm (คลอโรฟิลล์-เอ นั้นมีชื่อว่า Chl  $a_{680}$ ) ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ อาจมีคลอโรฟิลล์ชนิดพิเศษที่สามารถดูดแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้ 700 nm ได้ดีที่สุด (คลอโรฟิลล์ชนิดพิเศษประกอบด้วยคลอโรฟิลล์-เอประมาณ 450 โมเลกุล) ซึ่งเราเรียกว่า  $P_{700}$  (P ย่อมาจาก pigment ฉะนั้น  $P_{700}$  ก็คือ กลุ่มของคลอโรฟิลล์-เอที่สามารถดูดคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 700 nm ได้ดีนั่นเอง) สำหรับในช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน คลอโรฟิลล์-เอในเซลล์จะดูดแสงที่มีคลื่นแสง 435 nm ได้ดีที่สุด จะเห็นได้

ว่า คลอโรฟิลล์-เอ จะดูดแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินในคลื่นยาวกว่าคลอโรฟิลล์-เอที่ละลายอยู่ในอีเธอร์ เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะคลอโรฟิลล์ในเซลล์มีโปรตีนและไขมันล้อมรอบอยู่ จึงทำให้การดูดแสงเปลี่ยนไป

(2) Chlorophyll-b คลอโรฟิลล์-บีสามารถพบในพืชชั้นสูงทุกชนิดและ



สำหรับสีเขียว มีโครงสร้าง

โมเลกุลคล้ายกับคลอโรฟิลล์-เอ

ประกอบด้วย porphyrin ring

(4 pyrrole rings) และ

phytyl chain แตกต่างจากคลอ-

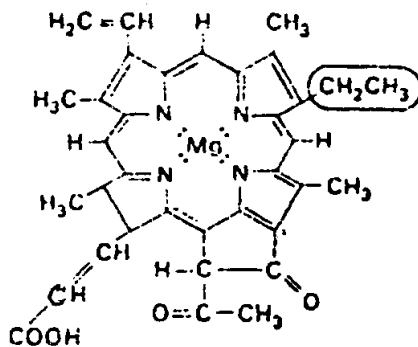
โรฟิลล์-เอที่ pyrrole ring ที่ 2

(คาร์บอนตำแหน่งที่ 3) มี aldehyde

group unu methyl group

รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันระหว่างคลอโรฟิลล์-เอ กับคลอโรฟิลล์-บี

คลอโรฟิลล์-บีละลายได้ดีที่สุด methyl alcohol คลอโรฟิลล์ที่ละลายในอีเธอร์จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 430 nm ได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่แสงที่มีความยาวคลื่น 644 nm สำหรับในสภาพธรรมชาติ คลอโรฟิลล์-บีสามารถดูดแสงได้ดีหลายความยาวคลื่น ซึ่งมีดังนี้คือ 480 nm, 640 nm และ 650nm (ซึ่งเราเรียกว่า Chl b<sub>480</sub>, Chl b<sub>640</sub> และ Chl b<sub>650</sub> ตามลำดับ)



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์-บี

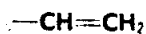


(3) Chlorophyll-c เราสามารถพบคลอโรฟิลล์-ซีได้ในสาหร่ายสีน้ำตาล และในไดอะตอม แต่คลอโรฟิลล์-ซีจะไม่มีในพืชชั้นสูง โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ชนิดนี้ไม่มี phytyl chain และที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 จะมี vinyl group หรือ ethyl group เกาะอยู่ ในธรรมชาติพบว่า มีทั้งคลอโรฟิลล์-ซีที่มี vinyl group และคลอโรฟิลล์-ซีที่มี ethyl group ผลสมกันอยู่ คลอโรฟิลล์-ซีในสารละลายจะดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 425 nm และ 625 nm ได้ดี และในธรรมชาติคลอโรฟิลล์-ซีจะดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 645 nm ได้ดีที่สุด

(4) Chlorophyll-d มีรายงานว่าพบคลอโรฟิลล์-ดี ในสาหร่ายสีแสด

บางชนิด (อ้างตาม Geulach,

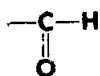
1970) คลอโรฟิลล์-ดี มี aldehyde



vinyl group

(formyl) group แทนที่ vinyl group ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2

Kumar et.al. (1976) เชื่อว่า



formyl group

คลอโรฟิลล์-ดีเกิดจากออกซิโคลัสคลอโรฟิลล์-เอในสภาพการทดลองเพราะ

ไม่เคยมีการตรวจพบคลอโรฟิลล์-ดีในเซลล์ของสาหร่ายสีแสดและที่มีรายงาน

ว่าพบคลอโรฟิลล์-ดีในสาหร่ายสีแสดนั้น

ก็เพราะว่าการทดลองนั้นอยู่ในสภาพ

เลียนแบบธรรมชาติ จึงทำให้คลอโร-

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของ vinyl group และ formyl group

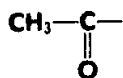
ฟิลล์-เอถูกออกซิโคลัสให้เป็นคลอโรฟิลล์-ดีขึ้นได้ คลอโรฟิลล์-ดีที่ละลายในอีเธอร์จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 447 nm และ 688 nm ได้ดี

(5) Chlorophyll-e คลอโรฟิลล์-อี เป็นสารที่พบในพืชชั้นต่ำจำพวก Xanthophyta เรายังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอนของคลอโรฟิลล์ชนิดนี้ คลอโรฟิลล์-ดีที่ละลายในเมทิลแอลกอฮอล์จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 415 nm และ 654 nm

ตารางที่ 1 แสดงชนิดของคลื่นแสงที่คลอโรฟิลล์ดูดได้ดีที่สุด และแหล่งที่พบคลอโรฟิลล์แต่ละชนิด

pigments	peaks (nm)	occurrences	references
1 Chlorophyll-a	430, <b>b62</b> in ether. 435, between 670 and 700 in cells	all photosynthetic or- ganism except bacteria	Nobel 1970 Geulach, 1970
2 Chlorophyll-b	430, <b>664</b> in ether 480, <b>b40</b> in cells	all higher plants, green algae	Kumar & Singh, 1976
3 Chlorophyll-c	425, <b>625</b> in solvent 645 in cells	brown algae diatom	Geulach, 1970 Malik & Srivastava, 1979
4 Chlorophyll-d	497, <b>688</b> in ether	red algae	Geulach, 1970 Kumar & Singh, 1976
5 Chlorophyll-e	415, 654 in methanol	Xanthophyta	Kumar & Singh, 1976
6 bacterio- chlorophyll-a	358, 391, 577, 773 in ether	photosynthetic bacteria red algae	Kumar & Singh, 1976 Malik & Srivastava, 1979
7 bacterio- chlorophyll-b	?	?	
8 bacterio- chlorophyll-c	?	photosynthetic bacteria	Malik & Srivastava, 1979
9 bacterio- chlorophyll-d	?	photosynthetic bacteria	Malik & Srivastava, 1979
10 Chlorobium chlorophyll	650, <b>660</b>	<u>Chlorobium</u> sp.	Nobel; 1970

(6) Bacteriochlorophyll-a, -b, -c & -d ในแบคทีเรีย ที่มีการสังเคราะห์แสงทุกชนิด ยกเว้น Rhodospseudomonas มีแบคทีริโอคลอโรฟิลล์-เอ และใน Rhodospseudomonas จะมีคลอโรฟิลล์-บี โครงสร้างของแบคทีริโอคลอโรฟิลล์-เอ คล้ายคลึงกับโครงสร้างของคลอโรฟิลล์-เอที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของแบคทีริโอคลอโรฟิลล์-เอจะมี acetyl group แทนที่ vinyl group และที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 4 จะ



acetyl group



vinyl group

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของ acetyl group และ vinyl group

ถูกรีดิวซ์ สำหรับโครงสร้างโมเลกุลของแบคทีริโอคลอโรฟิลล์-บี ยังไม่ทราบแน่นอน

สำหรับแบคทีริโอคลอโรฟิลล์-ซีและ-ดี มีรายงานว่าพบในแบคทีเรียที่มีการสังเคราะห์แสงบางชนิด และยังไม่มียาละเอียด

แบคทีริโอคลอโรฟิลล์สามารถดูดแสงได้ดีในหลายความยาวคลื่น เช่น มีรายงานว่า สามารถดูดแสง มีความยาวคลื่น 800 nm 850 nm และ 890nm ได้ดี

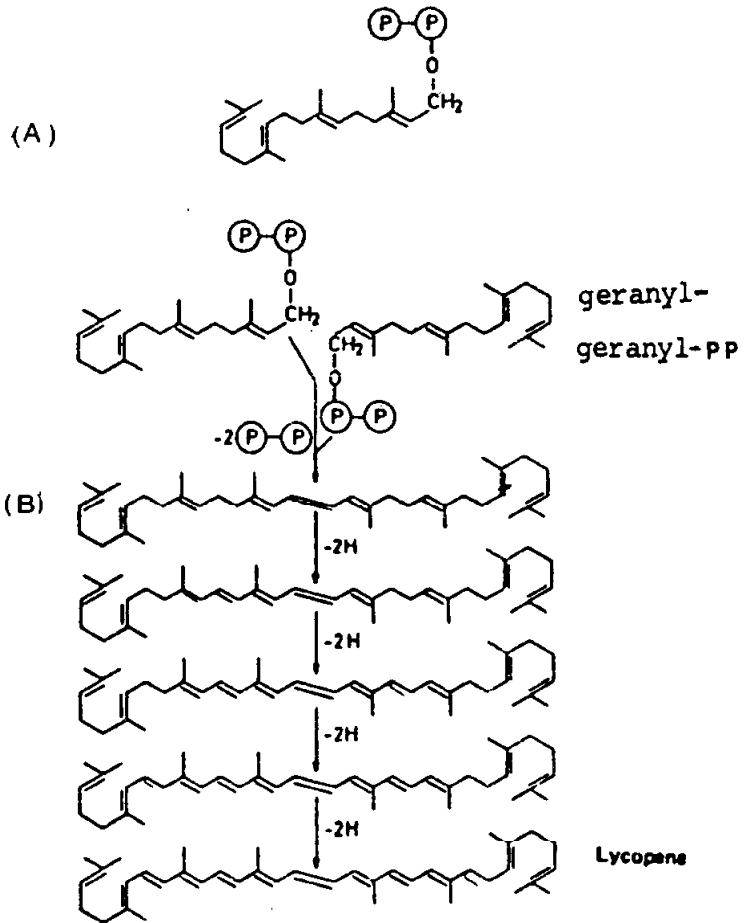
(7) Chlorobium chlorophyll เป็นคลอโรฟิลล์ที่พบในแบคทีเรียสีเขียวที่ใช้  $\text{H}_2\text{S}$  เป็นตัวให้อิเล็กตรอน คลอโรฟิลล์ประเภทนี้มีอย่างน้อย ๒ ชนิดคือ ชนิดที่ดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 650 nm เรียกว่า chlorobium chlorophyll 650 และอีกชนิดหนึ่งดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 660 nm ได้ดี ซึ่งเรียกว่า chlorobium chlorophyll 660

### 3.2 Carotenoids

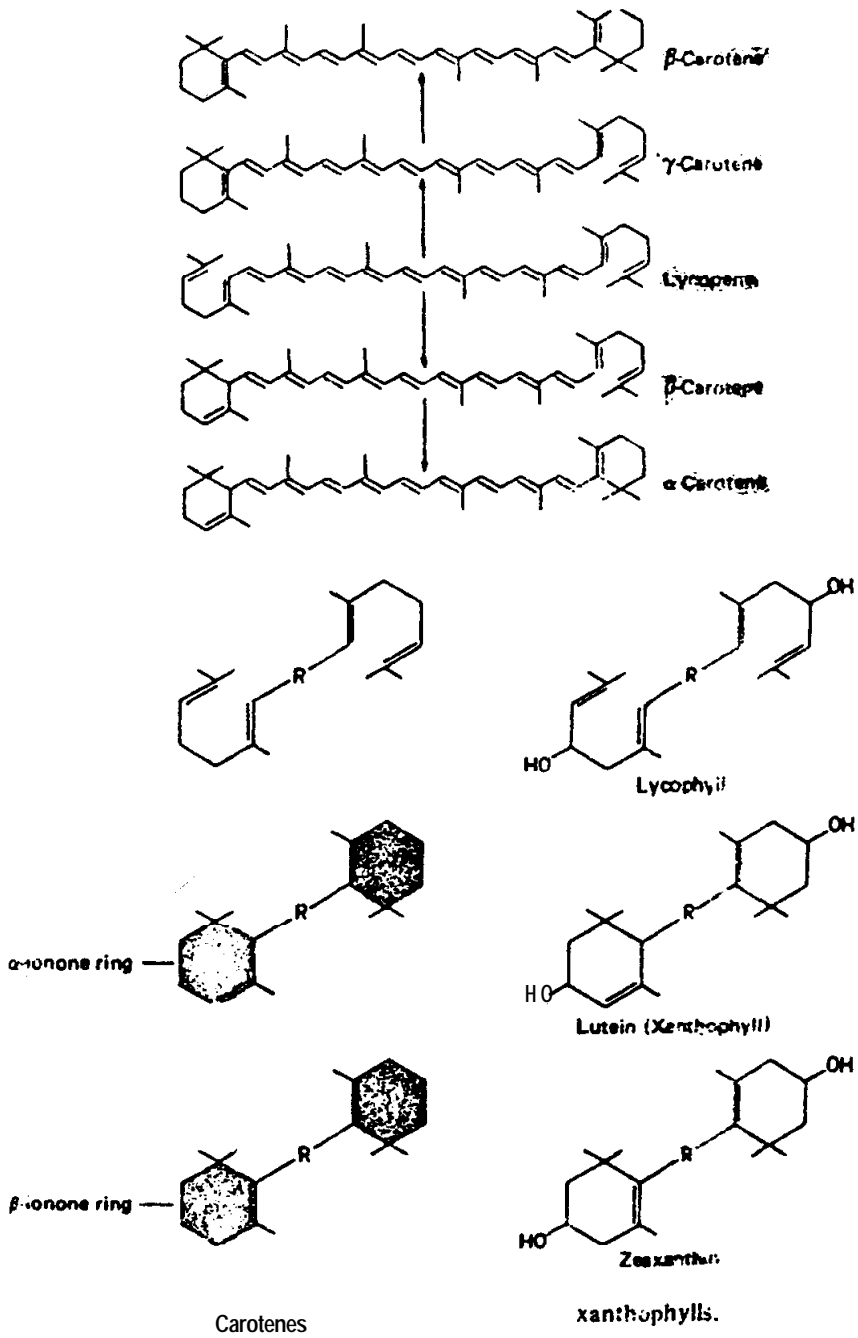
แคโรทีนอยด์เป็น pigments ที่พบในสิ่งมีชีวิตที่มีการสังเคราะห์แสง รวมถึง

พืชชั้นสูง พืชชั้นต่ำ และแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้ แคโรทีนอยด์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แคโรทีน (carotenes) และแซนโทฟิลล์ (Xanthophylls)

(1) แคโรทีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนจำนวน 40 อะตอมเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างของโมเลกุลอาจต่อกันเป็น chain ยาว และมี double bond หลายคู่ หรือที่ปลาย chain อาจมี ring ก็ได้ สารแคโรทีนเกิดจาก geranyl-geranyl

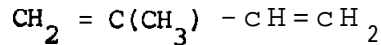


รูปที่ 8 (A) แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ geranyl-geranyl pyrophosphate  
 (B) แสดงการสร้างไลโคพีนจาก geranyl-geranyl pyrophosphate



รูปที่ 9 (A) แสดงการสร้างเบต้าแคโรทีน แกมมาแคโรทีน และแอลฟาแคโรทีนจากไลโคพีน (B) แสดงโครงสร้างของจำพวกแคโรทีนและแซนโทฟิลล์

pyrophosphate 2 โมเลกุลมาต่อกัน โดยที่หางโมเลกุลทั้งสองสร้าง double bond ขึ้นต่อกันเป็นโมเลกุลเช่นกัน geranyl-geranyl pyrophosphate แต่ละโมเลกุลประกอบด้วย isoprene 4 โมเลกุล Isoprene มีคาร์บอน 5 อะตอม เป็นองค์ประกอบและมี double bond 2 คู่ ซึ่ง เขียนเป็นสูตรดังนี้



รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างไอโซพรีน

หลังจากที่ geranyl-geranyl pyrophosphate ต่อกันแล้วจะมีการดึง ไฮโดรเจนออก 5 คู่ และสุดท้ายจะได้สารแคโรทีนตัวแรกคือ lycopene สารชนิดนี้มีสี แดง (รูปที่ 8)

จากนั้นจะมีการสร้าง ring ขึ้นที่ปลายของโมเลกุล lycopene 1 หรือ 2 จนกระทั่งได้สารแคโรทีนชนิดอื่น ๆ เช่น  $\beta$ -carotene,  $\gamma$ -carotene และ  $\alpha$ -carotene (รูปที่ 9A)

แคโรทีนที่พบในพืชในปริมาณที่มากที่สุดได้แก่  $\beta$ -carotene และมักจะ พบ  $\alpha$ -carotene น้อยกว่าเสมอในปริมาณตั้งแต่ 0.1 ถึง 3.5 % และแคโรทีน ที่พบมากในสาหร่ายก็คือ  $\beta$ -carotene เช่นเดียวกัน

(2) แซนโทฟิลล์ เป็นสารที่เกิดจากการออกซิไดส์สารแคโรทีนและเป็นสารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยเสมอ โครงสร้างของแซนโทฟิลล์อาจประกอบด้วย hydroxyl group, keto group, epoxy group หรือ methyl group อาจจะมี ring หรือเป็น chain ก็ได้ (รูปที่ 9B) แซนโทฟิลล์ที่พบในพืชชั้นสูงมีหลายชนิด เช่น lutein, violaxanthin, neoxanthin, cryptoxanthin และ zeaxanthin สำหรับในสาหร่ายสีน้ำตาลจะแซนโทฟิลล์ชนิดพิเศษ เรียกว่า fucoxanthin

แซนโทฟิลล์ที่พบในพืชชั้นสูงและสาหร่ายสีเขียวในปริมาณมากที่สุดได้แก่  
lutein

ในสารจำพวกแคโรทีนอยด์ด้วยกัน พืชที่มีสีเขียวจะมีแซนโทฟิลล์มากเป็น  
2 เท่าของแคโรทีน และสารจำพวกแซนโทฟิลล์ที่พบในพืชมีปริมาณแตกต่างกัน (ดูตาราง  
ที่ 2)

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารจำพวกแซนโทฟิลล์ในใบไม้สีเขียว

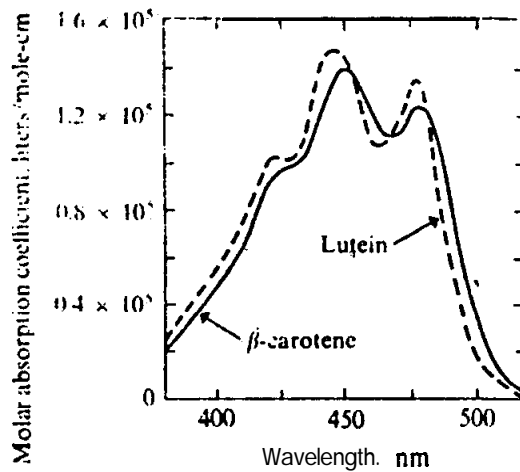
pigments	Relative amount % of total
lutein	40
violaxanthin	34
neoxanthin	19
cryptoxanthin	4
zeaxanthin	2

สารแคโรทีนอยด์ที่พบในคลอโรพลาสต์ และ chromatophore จะอยู่ในรูป  
ของสารที่เกาะติดอยู่กับโปรตีน ดังนั้นจึงไม่ละลายน้ำ Goodwin (1960) ได้ให้ความ  
เห็นว่า แคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์อาจติดกับโปรตีนโมเลกุลเดียวกันได้ สารประกอบดัง  
กล่าวเรียกว่า photosynthin เป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่ในขบวนการสังเคราะห์  
แสง

หน้าที่สำคัญของแคโรทีนอยด์ที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงมี 2 ประการคือ  
รับพลังงานจากแสงและส่งต่อให้กับคลอโรฟิลล์-เอ และป้องกันมิให้คลอโรฟิลล์ถูกออกซิไดส์  
ในสภาพที่มีแสงและ  $O_2$  (การออกซิไดส์ในสภาพที่มีแสงเรียกว่า photooxidation)

คลื่นแสงที่แคโรทีนอยด์ดูดซับได้แตกต่างกับของคลอโรฟิลล์ ตัวอย่างเช่น

$\beta$ -carotene ที่ละลายใน n-hexane จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400 nm ถึง 550 nm โดยมี peak absorption 3 จุด คือ ที่แสงความคลื่น 425 nm, 451 nm และ 483 nm คลื่นแสงที่  $\beta$ -carotene ใน n-hexane ดูดได้ดีที่สุดได้แก่ 451 nm สำหรับ lutein ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง เมื่อละลายในเอทิลแอลกอฮอล์ จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถึง 550 nm ซึ่งใกล้เคียงกับ  $\beta$ -carotene โดยมี peak absorption ที่แสงความยาวคลื่น 420 nm, 447 nm และ 477 nm คลื่นแสงที่ lutein ในเอทิลแอลกอฮอล์ดูดได้ดีที่สุด ได้แก่ 447 nm (รูปที่ 11) ในสภาพธรรมชาติสารแคโรทีนอยด์จะดูดแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าที่ละลายอยู่ในสารละลาย ประมาณ 20-30 nm



รูปที่ 11 แสดง absorption spectra ของลูทีนและเบต้าแคโรทีน

พลังงานแสงที่แคโรทีนอยด์ดูดไว้จะถูกถ่ายให้กับคลอโรฟิลล์-เอ และนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสงต่อไป และมีหลักฐานยืนยันว่าการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ก็เกิดจากการที่แคโรทีนอยด์รับพลังงานจากแสง (แล้วส่งถ่ายพลังงานให้กับคลอโรฟิลล์)

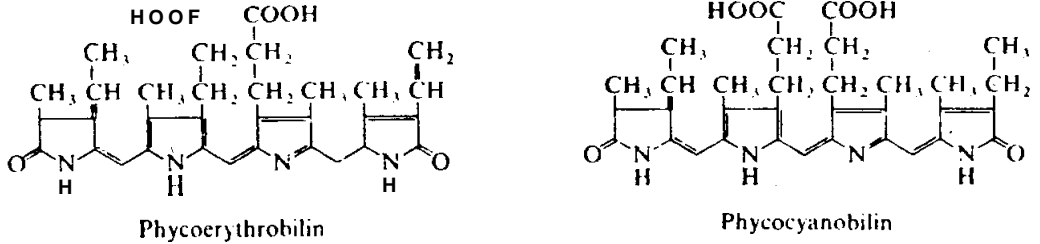
หน้าที่ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของแคโรทีนอยด์คือ ป้องกันมิให้คลอโรฟิลล์ถูก



ออกซิไดส์ในสภาพที่มีแสง พลังงานจากแสงที่คลอโรฟิลล์ดูดไว้ทำให้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น ซึ่งรวมทั้งคลอโรฟิลล์ด้วย ในสภาพเช่นนี้คลอโรฟิลล์จะถูกออกซิไดส์จนหมดสภาพ แต่ถ้ามีแคโรทีนอยด์อยู่จะป้องกันมิให้เกิดการออกซิไดส์คลอโรฟิลล์ขึ้น ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียพวก Chlamydomonas ชนิดที่ไม่มีสารแคโรทีนอยด์จะพบว่ามิมีสีเข้ชาเขียวเพราะขาดคลอโรฟิลล์ เนื่องจากคลอโรฟิลล์ถูกทำลายโดยขบวนการโฟโตออกซิเดชัน อีกตัวอย่างหนึ่งพบว่า แบคทีเรียพวก Rhodospseudomonas ชนิดที่ขาดแคโรทีนอยด์มีการสังเคราะห์แสงได้ดีในสภาพที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน และถ้าให้แบคทีเรียชนิดนี้สังเคราะห์แสงในที่ที่มีแก๊สออกซิเจน แบคทีเรียเหล่านี้จะตาย กรณีเช่นนี้จะไม่เกิดกับแบคทีเรียที่มีแคโรทีนอยด์ ในเรื่องนี้อาจอธิบายได้ว่า ในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนและแสง คลอโรฟิลล์ในแบคทีเรียจะถูกออกซิไดส์ การสังเคราะห์แสงจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ทำให้แบคทีเรียขาดสารที่จำเป็นต่อการดำรงชีพ สุดท้ายแบคทีเรียตาย. Nobel (1970) ได้ให้ความเห็นว่า ถ้าการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ถูกยับยั้ง แก๊สออกซิเจนจะเป็นโทษต่อสิ่งมีชีวิตที่มีการสังเคราะห์แสง (รวมถึงพืชชั้นสูงด้วย — ผู้เขียน)

### 3.3 Phycobilin

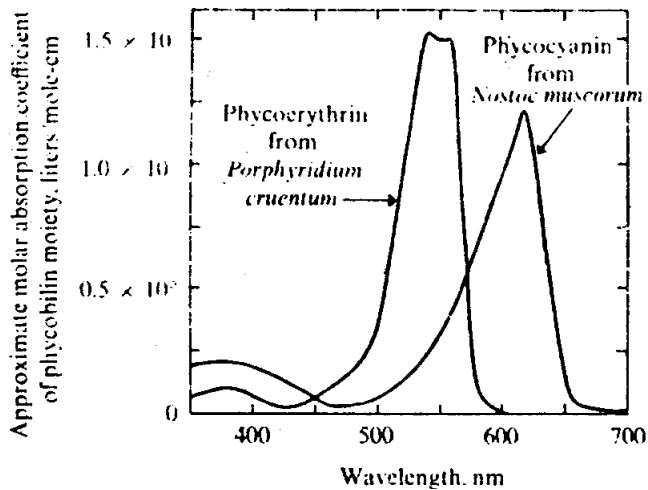
ไฟโคบิลินเป็น pigment อีกประเภทหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง มีโครงสร้างทั่วไปประกอบด้วย pyrrole ring 4 วง เรียงต่อกันเป็นเส้นตรง โครงสร้างของไฟโคบิลินจึงแตกต่างกับโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ (pyrrole ring ของคลอโรฟิลล์เกาะกันเป็นวง) ในสภาพธรรมชาติไฟโคบิลินจะเกาะอยู่กับสารโปรตีน โดยมี covalent bond เป็นตัวเชื่อม สารโปรตีนที่มีไฟโคบิลินติดอยู่อาจมี pigment ชนิดอื่นเกาะติดอยู่ด้วยก็ได้ ไฟโคบิลินพบมากในสาหร่ายสีแดงและสาหร่ายสีเขียวแกมสีน้ำตาลเงิน ในสาหร่ายประเภทนี้มีหลายชนิดที่มีสารไฟโคบิลินในปริมาณที่มากกว่าสารคลอโรฟิลล์ ไฟโคบิลินที่สำคัญมีสองชนิดคือ (1) phycoerythrobilin และ (2) phycocyanobilin โครงสร้างของสารทั้งสองอยู่ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ phycoerythrobilin      phycocyanobilin

(1) Phycoerythrobilin ไฟโคเอรีโธรบิลินที่เกาะอยู่กับสารโปรตีน เรียกว่า phycoerythrin เป็นสารที่ละลายน้ำได้และมีสีแดง โดยทั่วไป พบในสาหร่ายสีแดง และอาจพบได้ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด ไฟโคเอรีทรินที่ละลายในน้ำดูดแสงสีน้ำเงินแสงสีเขียว และแสงสีเหลืองที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 430-570 nm ได้ดี โดยมี maximum absorption ที่คลื่นแสงประมาณ 545 nm (ดูรูปที่ 13)

(2) Phycocyanobilin ไฟโคไซยานินที่เกาะอยู่กับสารโปรตีน เรียกว่า phycocyanin เป็นสารที่ละลายน้ำได้และมีสีน้ำเงิน โดยทั่วไปพบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและอาจจะพบในสาหร่ายสีแดงบางชนิด ไฟโคไซยานินที่ละลายอยู่ในน้ำดูดแสงสีเหลืองและแสงสีส้มในช่วงระหว่าง 550-660 nm ได้ดี โดยมี maximum



รูปที่ 13 แสดง absorption spectra ของไฟโคเอรีทริน และไฟโคไซยานิน