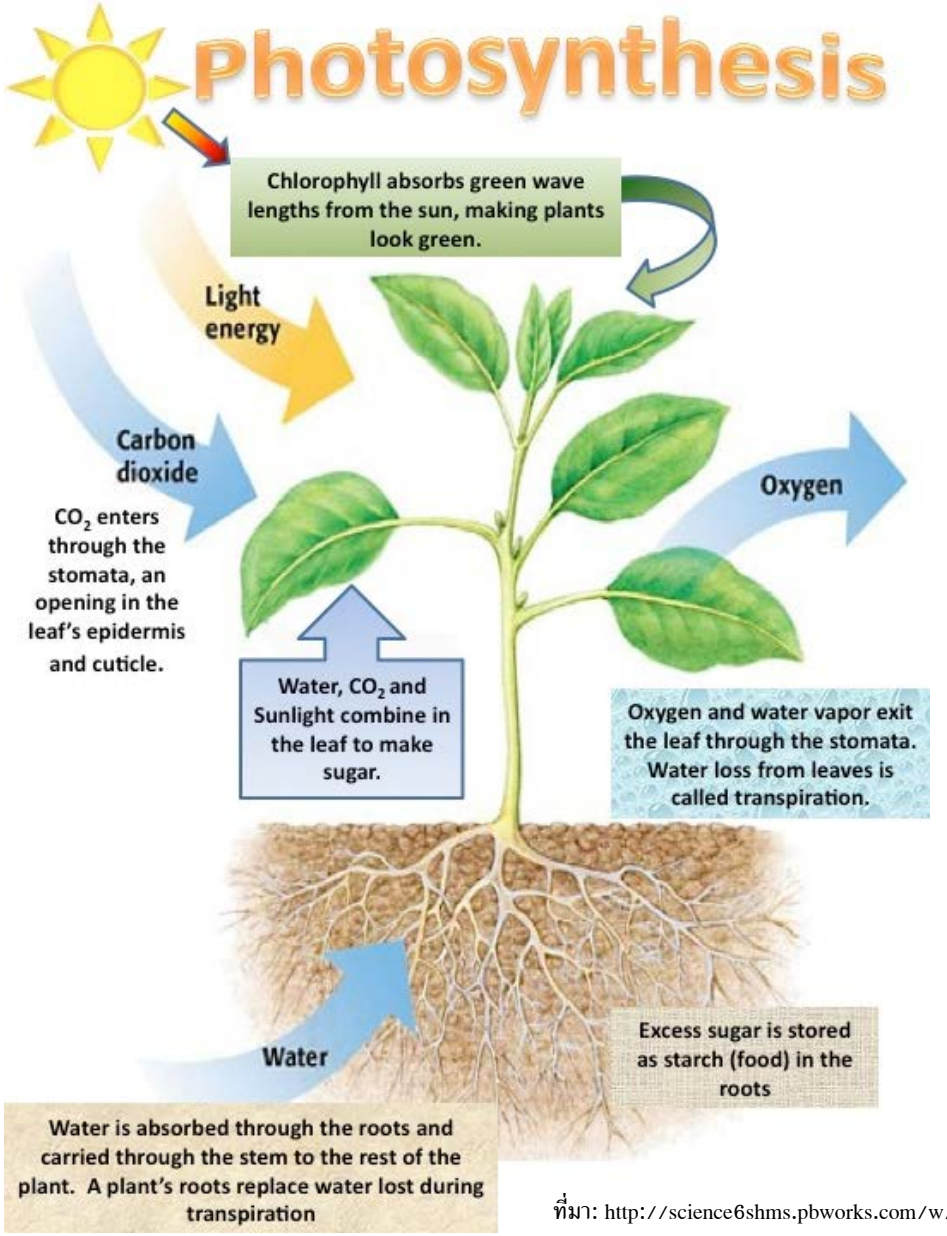
# การสังเคราะห์แสง
# (Photosynthesis)

- รายวิชา หลักชีววิทยา (Principle of Biology) : 01424111
- สอนโดย อ.ดร. ปิยะมาศ ศรีรัตน์

# การสังเคราะห์แสง




## กระบวนการสังเคราะห์แสง

เป็นกระบวนการที่สิ่งมีชีวิตเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี โดยเก็บสะสมไว้ในสารอินทรีย์ที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น และพลังงานเคมีที่สร้างขึ้นนี้จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในโลกนี้ได้ใช้ประโยชน์

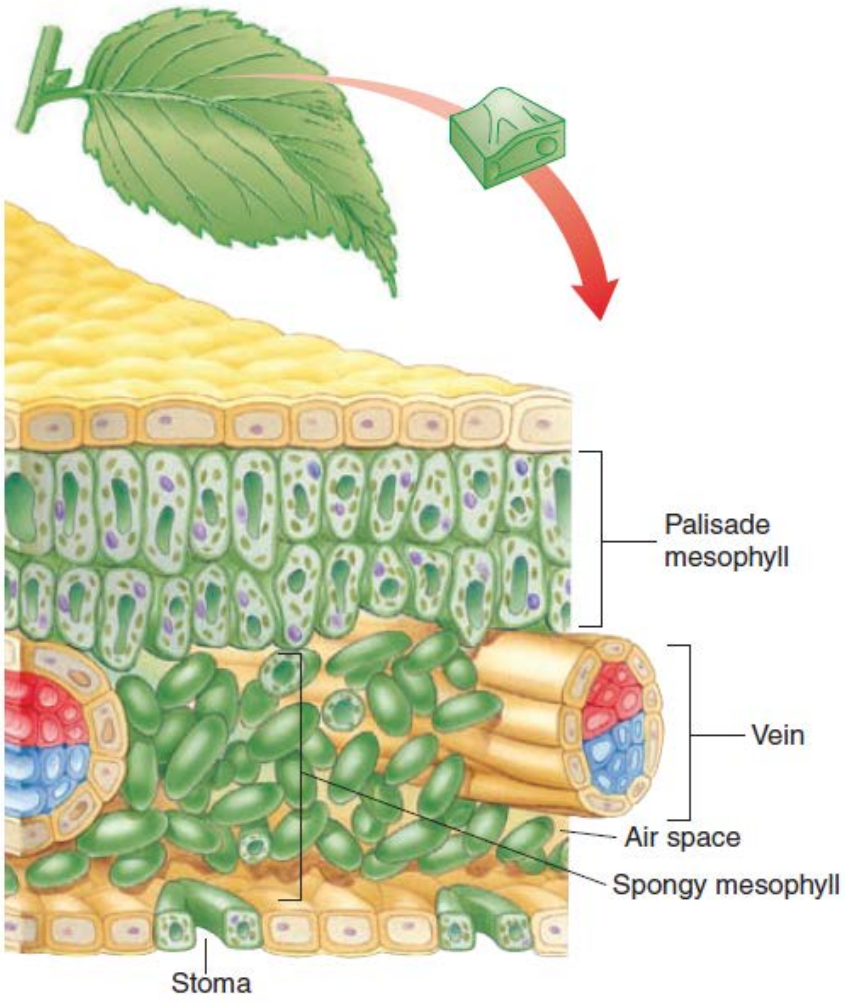
สมการรวมของกระบวนการสังเคราะห์แสง

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow[\text{Chlorophyll}]{\text{Light energy}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O$$

Carbon dioxide — Water — Glucose — Oxygen — Water

ที่มา: http://science6shms.pbworks.com/w/page/25870917/photosynthesis

# การสังเคราะห์แสง




(a) This leaf cross section reveals that the mesophyll is the photosynthetic tissue. $CO_2$ enters the leaf through tiny pores or stomata, and $H_2O$ is carried to the mesophyll in veins.

## การสังเคราะห์แสง เกิดขึ้นที่ไหน ?

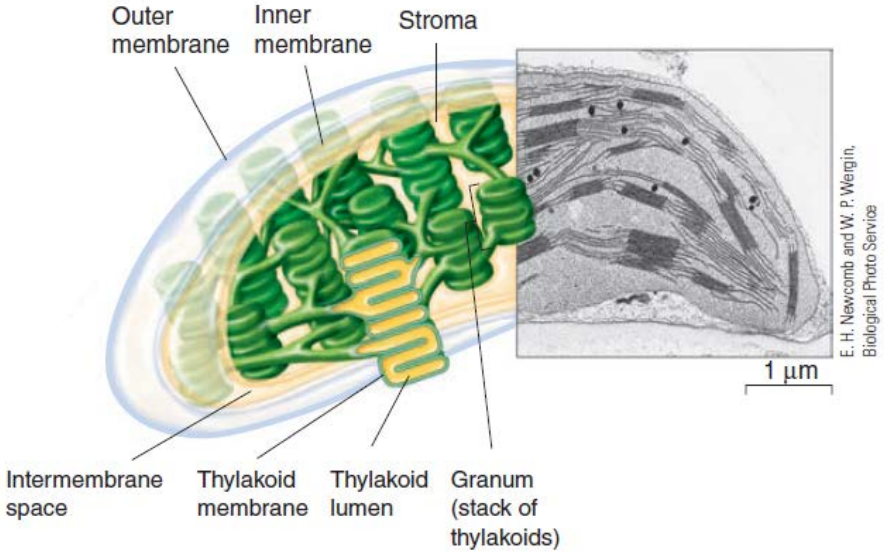
- **ใบพืช** -- เป็นส่วนที่มีคลอโรฟิลล์มากที่สุด
- **Palisade mesophyll** เป็นส่วนที่มีคลอโรพลาสต์มากที่สุด
- **Spongy mesophyll** เป็นส่วนที่เก็บแป้งซึ่งเปลี่ยนจากน้ำตาลที่สร้างขึ้นจาก Palisade cell (เก็บชั่วคราว จนกว่าจะนำไปใช้)
- **Stoma** = ช่องว่างระหว่าง guard cell ที่ให้ก๊าซผ่านเข้า-ออกที่ผิวใบ

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# การสังเคราะห์แสง

- การสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์

- ส่วนประกอบ
  - outer membrane
  - inner membrane
  - stroma
  - thylakoid membrane
  - grana หรือ grana lamellae โดยแต่ละตั้งเรียกว่า granum
  - lumen หรือ thylakoid space

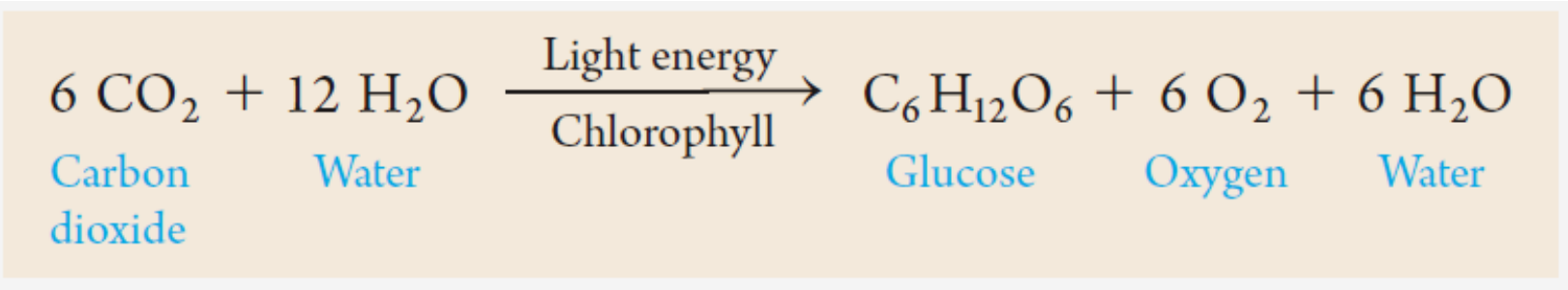



(b) In the chloroplast, pigments necessary for the light-capturing reactions of photosynthesis are part of thylakoid membranes, whereas the enzymes for the synthesis of carbohydrate molecules are in the stroma.

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

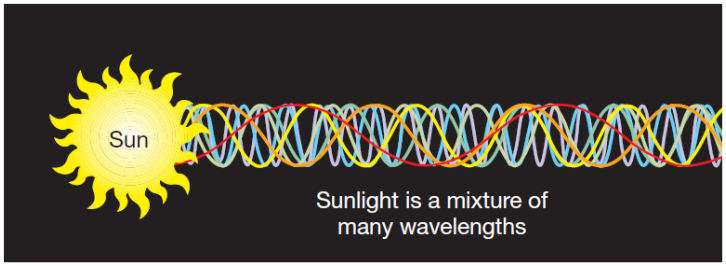
# องค์ประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง

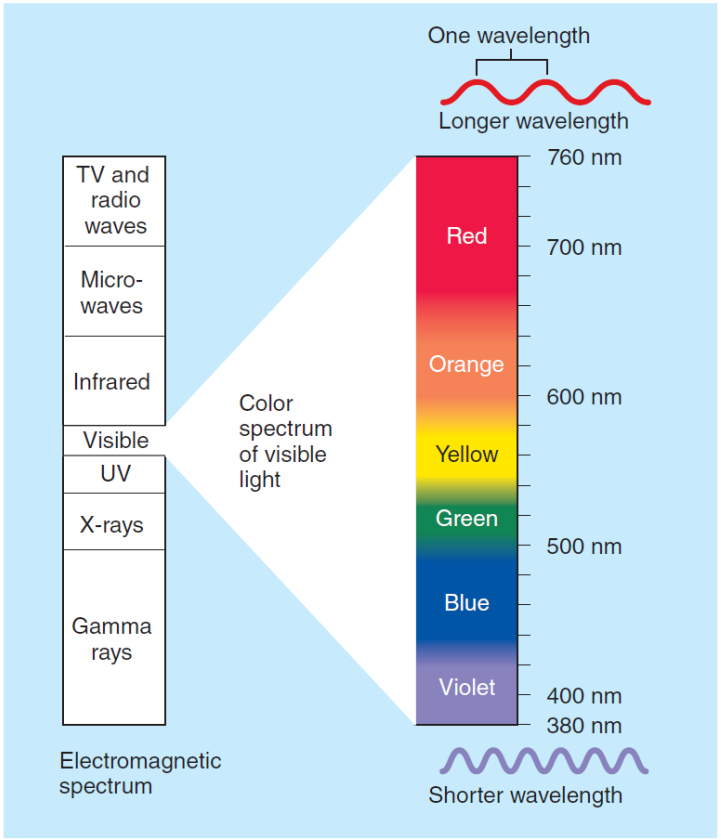
- แสงสว่าง (Light) --- เป็นแหล่งพลังงาน
- รงควัตถุ (Photosynthetic pigment) --- สำหรับดูดซับพลังงานแสง
- คาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) --- เป็นวัตถุดิบ
- น้ำ ($H_2O$) --- เป็นวัตถุดิบ




ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# แสง (Light)

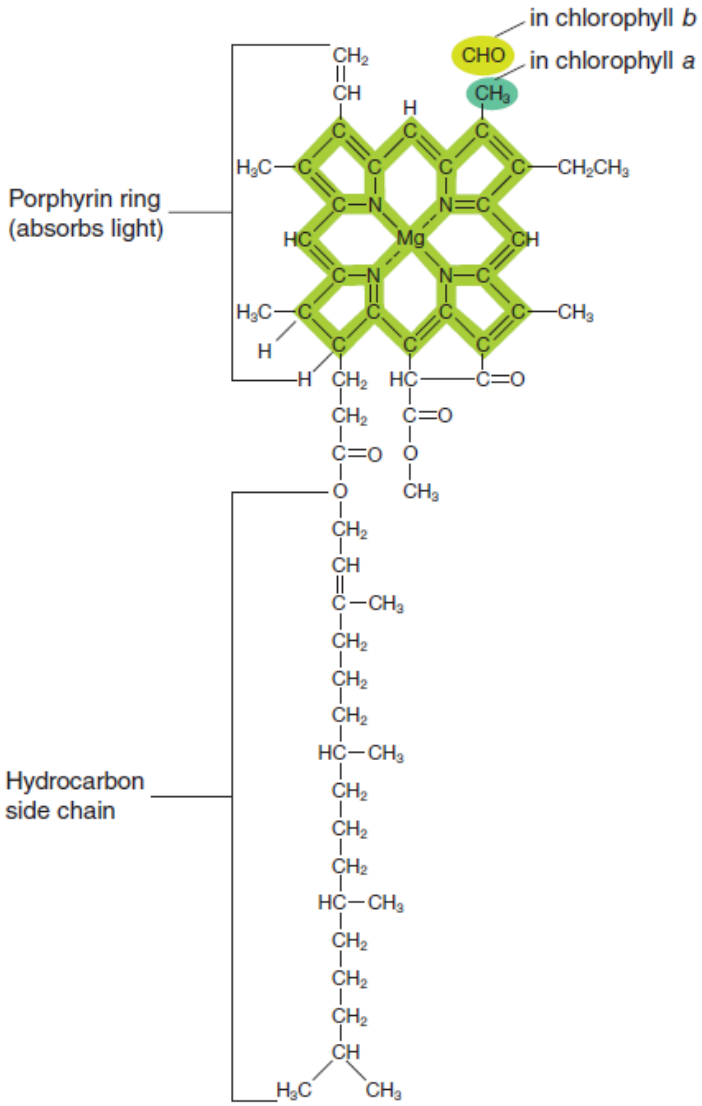



- แสง ที่มีประโยชน์มีความยาวช่วงคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ประกอบด้วยอนุภาคพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) พลังงานของโฟตอนแปรผกผันกับความยาวคลื่น
- พลังงานแสงถูกดูดกลืนโดยรงควัตถุ(pigment) 3 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ คาโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน (ในพืชไม่มีไฟโคบิลิน)
- การดูดกลืนพลังงานแสงของรงควัตถุสอดคล้องกับประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# รงควัตถุ (Photosynthetic pigments)




## คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)

- เป็นอนุพันธ์ของสารจำพวก porphyrin
- โครงสร้างประกอบด้วย

– <u>ส่วนหัว</u> (Hydrophilic)

: ทำหน้าที่ดูดพลังงานแสง

: เป็นไพโรลแบบวงแหวน 4 วง มี Mg อยู่ตรงกลาง

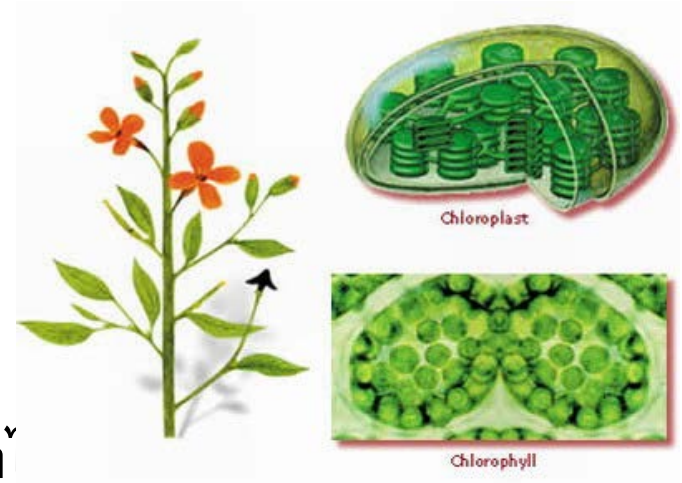
– <u>ส่วนหาง</u> --> ไฮโดรคาร์บอนช่วยยึดกับระบบแสง

** ปกติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลาย เช่น อีเธอร์ อะซิโตน

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# รงควัตถุ (Photosynthetic pigments)

## คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)




มี 4 ชนิด: chlorophyll a, b, c และ d

- chlorophyll a --- มีสีเขียวแกมน้ำเงิน
  พบในพืชสีเขียวและพืชทุกชนิดที่สังเคราะห์แสง
- chlorophyll b --- มีสีเขียวแกมเหลือง พบในพืชชั้นสูงและสาหร่ายสีเขียว
- chlorophyll c --- พบในพืชสาหร่ายสีน้ำตาลและสาหร่ายสีทอง
- chlorophyll d --- พบในพืชสาหร่ายสีแดง

# รงควัตถุ (Photosynthetic pigments)

- **แคโรทีนอยด์ (Carotenoid)**
  - เป็นรงควัตถุที่มีสีเหลือง ส้ม แดง น้ำตาล
  - เช่น carotene, xanthophyll
  - อยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์ในไทลาคอยด์เมมเบรน
  - ดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน (400 – 500 nm) แล้วถ่ายทอดพลังงานให้คลอโรฟิลล์
  - ปกป้องคลอโรฟิลล์ไม่ให้ถูกทำลาย โดยอะตอมของออกซิเจนที่เป็นอนุมูลอิสระ

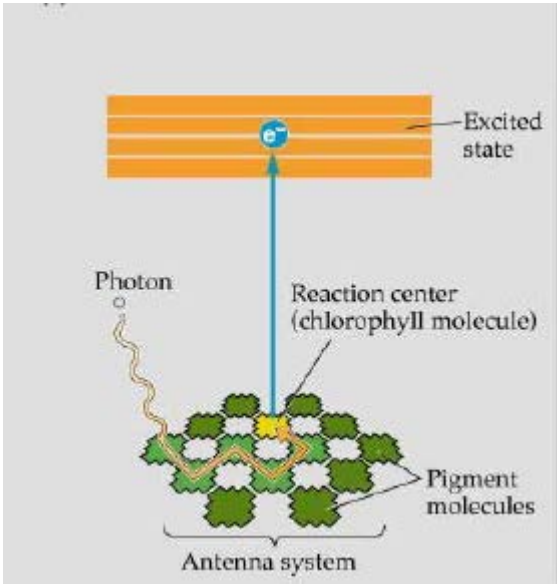
- **ไฟโคบิลิน (Phycobilin)**
  - เป็นรงควัตถุที่ไม่พบในพืชชั้นสูง โดยมากเป็นรงควัตถุเสริมที่พบในสาหร่ายสีน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง
  - แบ่งเป็น ไฟโคอิริทริน ซึ่งดูดแสงสีเขียว และไฟโคไซยานินดูดแสงสีส้มแดง

# Antenna complex

- **antenna complex** คือ การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระบบของรงควัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ที่ thylakoid membrane เพื่อให้การตรึงพลังงานแสงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

- **antenna complex** ประกอบด้วย แคโรทีนอยด์ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ เอ ทำงานร่วมกันในการรับพลังงานแสง แล้วส่งพลังงานนั้นเข้าสู่**ศูนย์กลางปฏิกิริยา** (**reaction center**) ซึ่งคือโมเลกุลของ**คลอโรฟิลล์เอชนิดพิเศษ** 2 โมเลกุล

คลอโรฟิลล์เอชนิดพิเศษ 2 โมเลกุลเมื่อได้รับพลังงานในช่วงคลื่นที่เหมาะสม อิเล็คตรอนจะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้นจากภาวะเดิมที่อยู่ที่ ground state จะถูกกระตุ้นไปอยู่ในภาวะที่มีพลังงานสูงขึ้น คือ ภาวะ excited state พร้อมที่จะปลดปล่อยอิเล็คตรอนนี้ให้กับตัวรับอิเล็คตรอนตัวถัดไป



# การสังเคราะห์แสง

- การสังเคราะห์แสง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน เกิดต่อเนื่องกันในคลอโรพลาสต์

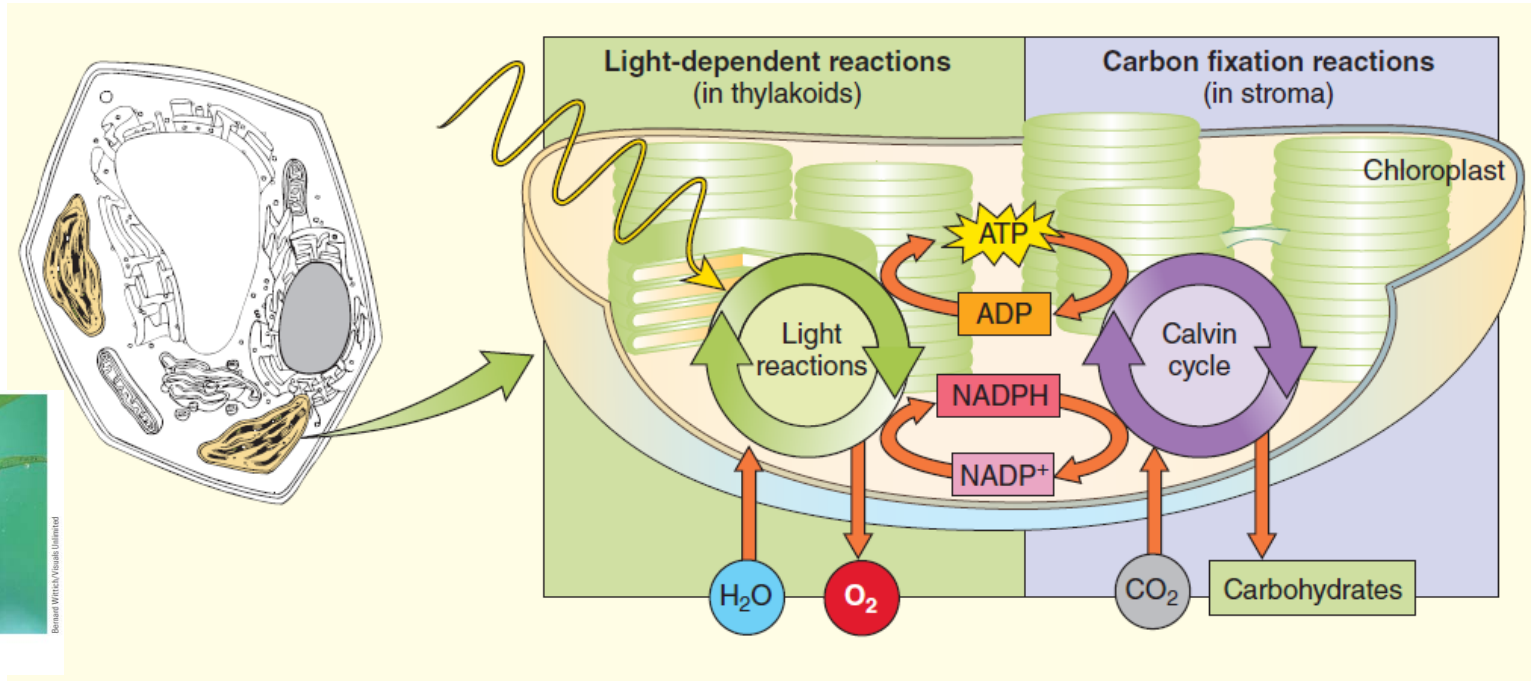
1. ปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Light-dependent reactions)

---

2. ปฏิกิริยาการสร้าง (Synthesis reaction หรือ Carbon fixation reactions)

---

FIGURE 9-9 Oxygen produced by photosynthesis




ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# ปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Light-dependent reaction

- เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี
- กระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณ thylakoid
- รงควัตถุต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณ thylakoid ซึ่งอยู่รวมกันเป็นกลุ่มโดยมีการเกาะตัวอยู่กับโปรตีนหลายชนิด กลุ่มของโปรตีนบน thylakoid ที่มีรงควัตถุประกอบอยู่ด้วยนี้เรียกว่า ระบบแสง (photosystem) ทำหน้าที่รับพลังงานแสงมาใช้ในการสร้างสารที่มีพลังงานสูง คือ ATP และ NADPH เพื่อนำพลังงานที่ได้ไปใช้ในการสร้างสารอินทรีย์ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

$$12\,H_2O + 12\,NADP^+ + 18\,ADP + 18\,P_i \xrightarrow[\text{Chlorophyll}]{\text{Light}} 6\,O_2 + 12\,NADPH + 18\,ATP$$

# ระบบแสง (Photosystem)

- การรับแสง เกิดที่ thylakoid โดยระบบแสง (Photosystem)

- พืชชั้นสูงมีระบบแสง 2 ระบบ คือ
  - Photosystem I
    : รงควัตถุที่สำคัญ = chlorophyll a
    ศูนย์กลางปฏิกิริยาที่ $P_{700}$
  - Photosystem II
    : รงควัตถุที่สำคัญ = chlorophyll a, b และ แคโรทีนอยด์
    ศูนย์กลางปฏิกิริยาที่ $P_{680}$

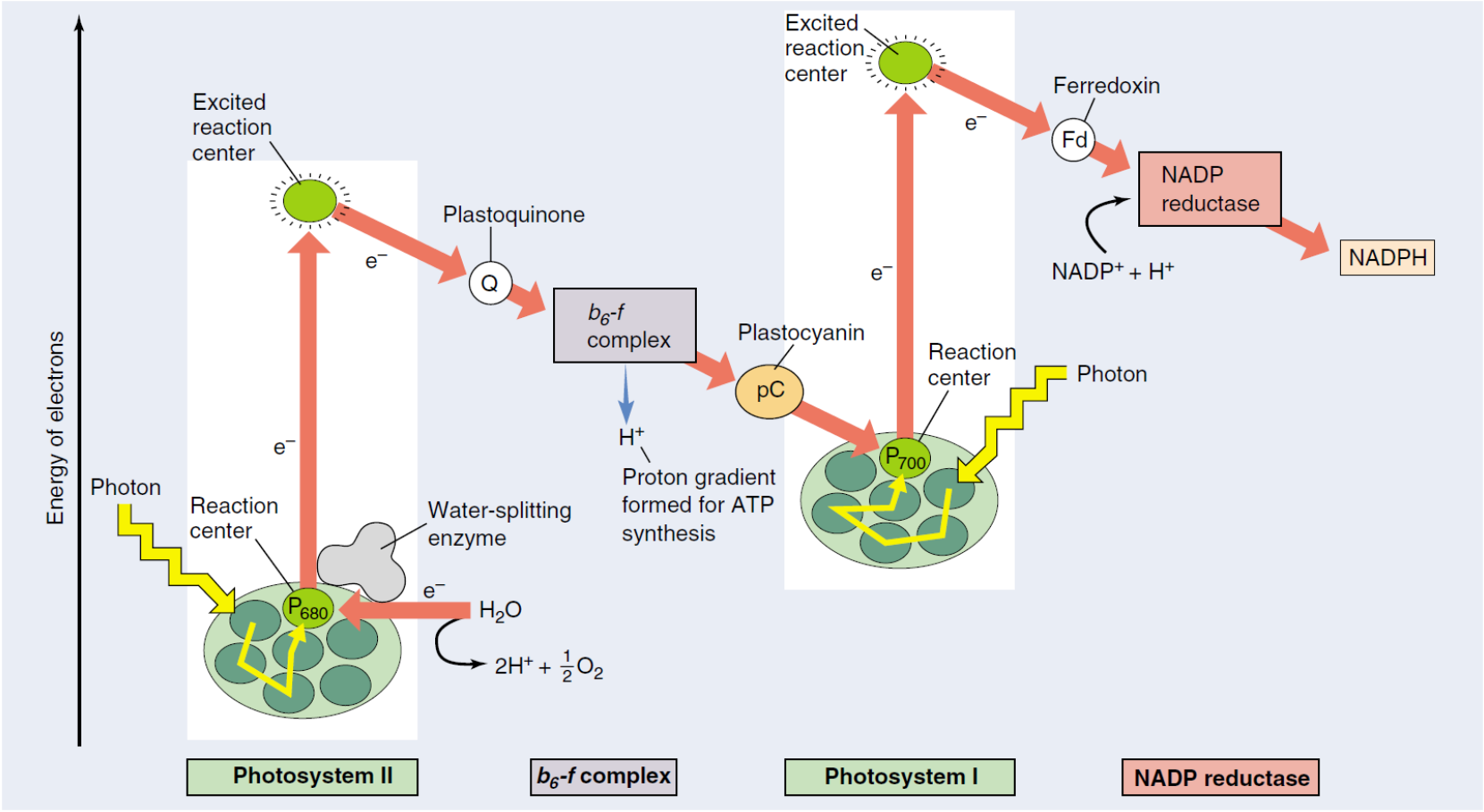
- ระบบแสงทั้งสองจะทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อให้สามารถเกิดการส่งพลังงานในการสร้าง ATP และ NADPH

# การถ่ายทอดอิเลคตรอนและการสังเคราะห์ ATP (Photophosphorylation)

- เป็นกระบวนการที่พืชใช้แสงสว่างเพื่อสร้างสารเคมีที่มีพลังงานสูง (ATP)
- แบ่งเป็น 2 แบบ คือ
  - อิเลคตรอนเคลื่อนที่เป็นวัฏจักร (Cyclic photophosphorylation)
    - Photosystem I
    - ให้สารให้พลังงานสูง ATP
  - อิเลคตรอนเคลื่อนที่ไม่เป็นวัฏจักร (Noncyclic photophosphorylation)
    - Photosystem II ($P_{680}$) และ Photosystem I ($P_{700}$)
    - ให้สารให้พลังงานสูง ATP
    - ให้สารให้พลังงานสูง $NADPH_2$

# การถ่ายทอดอิเลคตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรในปฏิกิริยาที่ใช้แสง

## (The noncyclic photophosphorylation)

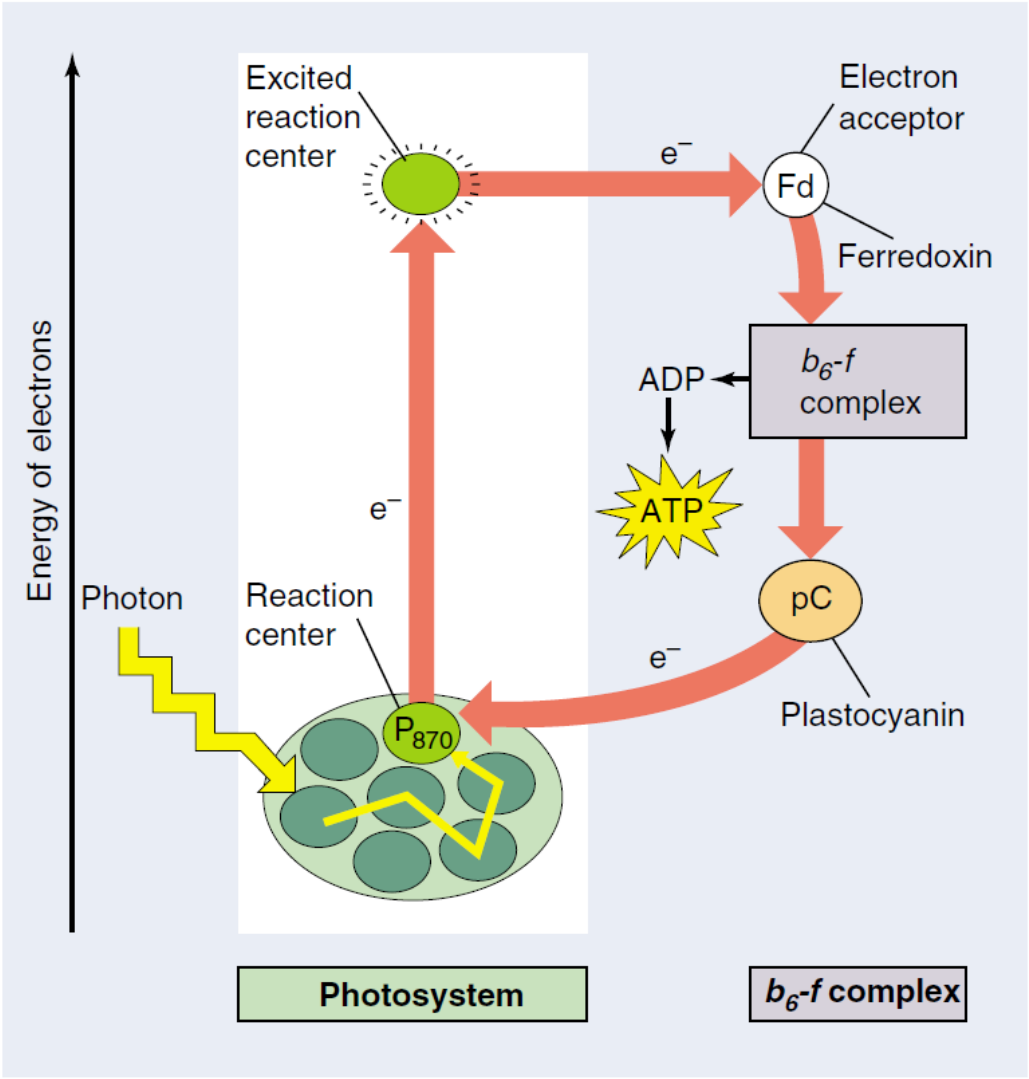



**A Z diagram of photosystems I and II.** Two photosystems work sequentially. First, a photon of light ejects a high-energy electron from photosystem II; that electron is used to pump a proton across the membrane, contributing chemiosmotically to the production of a molecule of ATP. The ejected electron then passes along a chain of cytochromes to photosystem I. When photosystem I absorbs a photon of light, it ejects a high-energy electron used to drive the formation of NADPH.

ที่มา: http://www.mhhe.com/biosci/genbio/raven6b/graphics/raven06b/other/raven06b_10.pdf.

# การถ่ายทอดอิเลคตรอนแบบเป็นวัฏจักรในปฏิกิริยาที่ใช้แสง

## (The cyclic photophosphorylation)




- พลังงานแสงที่ถูกถ่ายทอดในกรณีนี้จะไม่ถูกนำไปสังเคราะห์ NADPH แต่สามารถนำไปใช้สร้าง ATP ได้
- การถ่ายทอดอิเลคตรอนแบบเป็นวัฏจักรนี้อาจเกิดขึ้นได้ในภาวะที่พืชต้องการ ATP เพิ่มขึ้น หรือในภาวะที่ ไม่มี $NADP^+$ เพียงพอที่จะนาไปสร้างเป็น NADPH

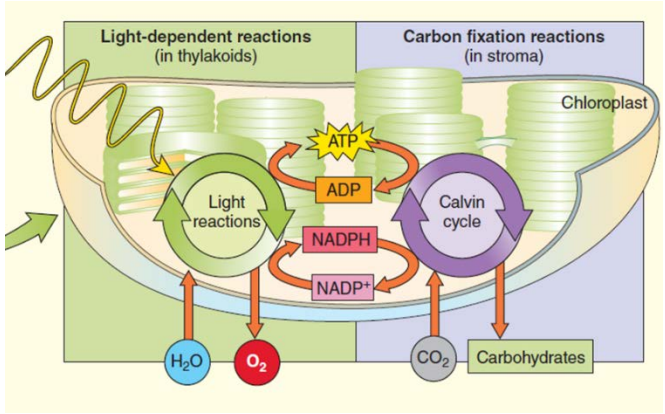
**The path of an electron in purple sulfur bacteria.** When a light-energized electron is ejected from the photosystem reaction center ($P_{870}$), it passes in a circle, eventually returning to the photosystem from which it was ejected.

ที่มา: http://www.mhhe.com/biosci/genbio/raven6b/graphics/raven06b/other/raven06b_10.pdf.

# ปฏิกิริยาการสร้าง

## (Synthesis reaction หรือ Carbon fixation reactions)

- ไม่ได้ใช้แสงโดยตรง – ใช้ผลผลิตจากปฏิกิริยาที่ใช้แสง ($NADPH_2$, ATP)
- บริเวณที่รับแสงตลอดเวลา ปฏิกิริยาที่ใช้แสง และ ปฏิกิริยาการสร้าง เกิดพร้อม ๆกันตลอดเวลา
- เกิดขึ้น ใน stroma
- เกิดขึ้นได้ 3 แนวทาง
  1. กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืชซีสาม
  2. กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืชซีสี่
  3. กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืช CAM

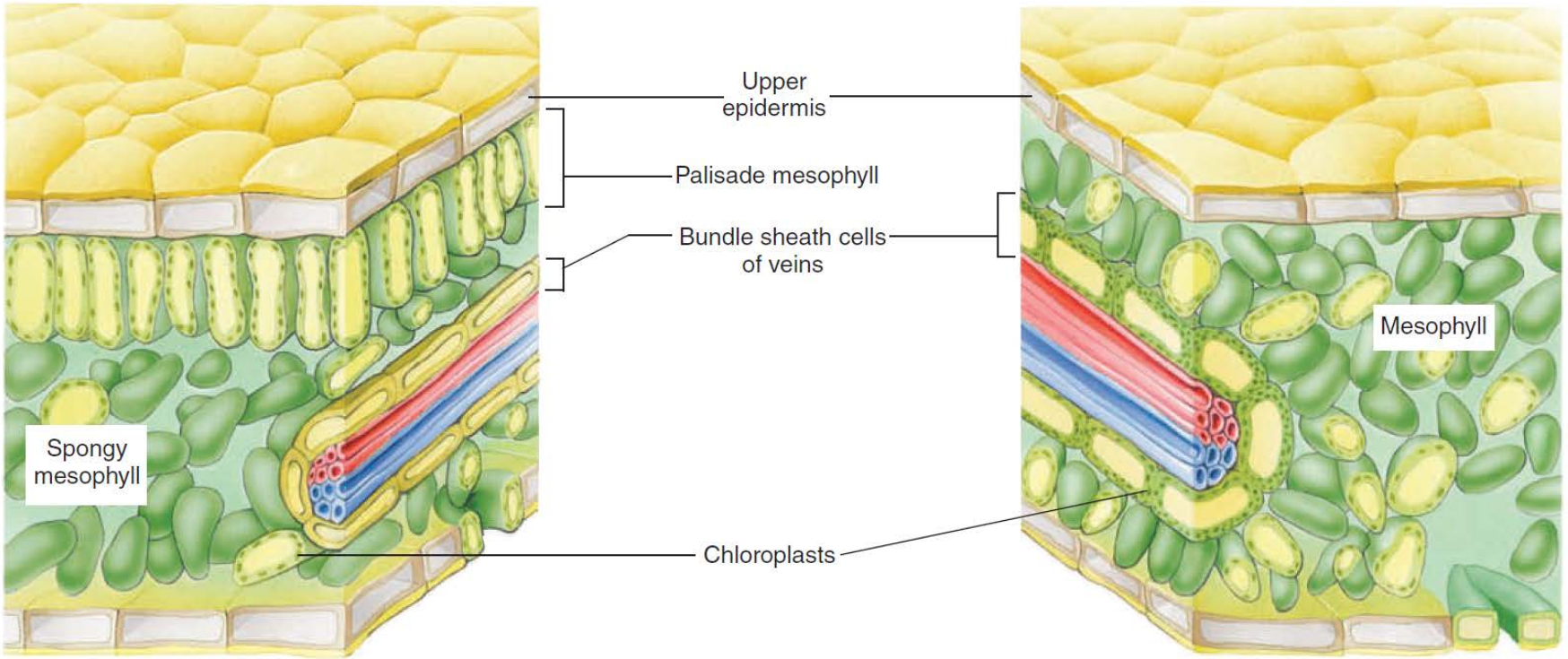



In carbon fixation, the energy of ATP and NADPH is used in the formation of organic molecules from $CO_2$. The carbon fixation reactions may be summarized as follows:

$$12\ NADPH + 18\ ATP + 6\ CO_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 12\ NADP^+ + 18\ ADP + 18\ P_i + 6\ H_2O$$

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# พืช $C_3$ และ พืช $C_4$




**(a)** In $C_3$ plants, the Calvin cycle takes place in the mesophyll cells and the bundle sheath cells are nonphotosynthetic.

**(b)** In $C_4$ plants, reactions that fix $CO_2$ into four-carbon compounds take place in the mesophyll cells. The four-carbon compounds are transferred from the mesophyll cells to the photosynthetic bundle sheath cells, where the Calvin cycle takes place.

**FIGURE 9-15** $C_3$ and $C_4$ plant structure compared

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืชซีสาม ($C_3$-Carbon fixation pathway)

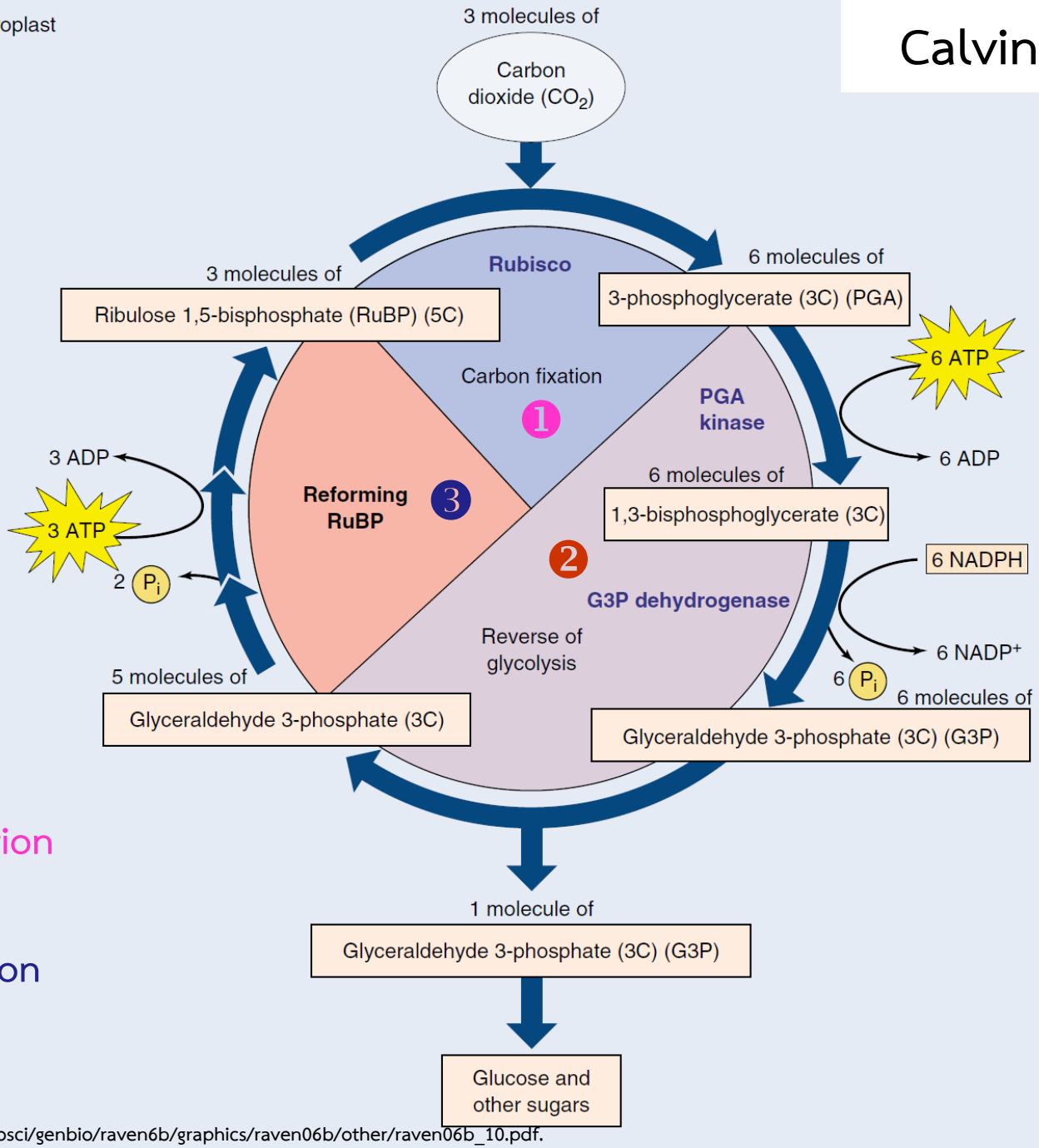
- (ค.ศ. 1950) M. Calvin -- ศึกษาการตรึง $CO_2$ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* หรือ *Scenedesmus*

"สารตัวแรกที่เกิดขึ้นจากการตรึง $CO_2$ ในกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ Phosphoglyceric acid (PGA)"

- สารตัวแรกที่เข้าทำปฏิกิริยา -- Ribulose bis phosphate (RuBP)
- เรียกวัฏจักรกระบวนการสังเคราะห์แสงนี้ว่า วัฏจักรคัลวิน

$$6CO_2 + 18\ ATP + 12\ NADPH_2 \longrightarrow 6(CH_2O) + 18\ (ADP+Pi) + 12\ NADP + 6H_2O$$

# Calvin cycle




1 = Carboxylation

2 = Reduction

3 = Regeneration

ที่มา: http://www.mhhe.com/biosci/genbio/raven6b/graphics/raven06b/other/raven06b_10.pdf.

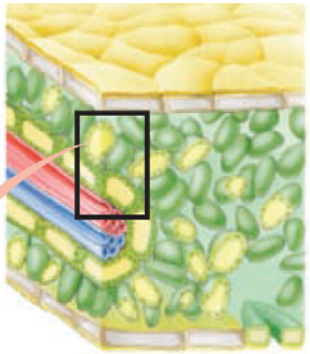
# กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืชซีสี่ ($C_4$-Carbon fixation pathway)

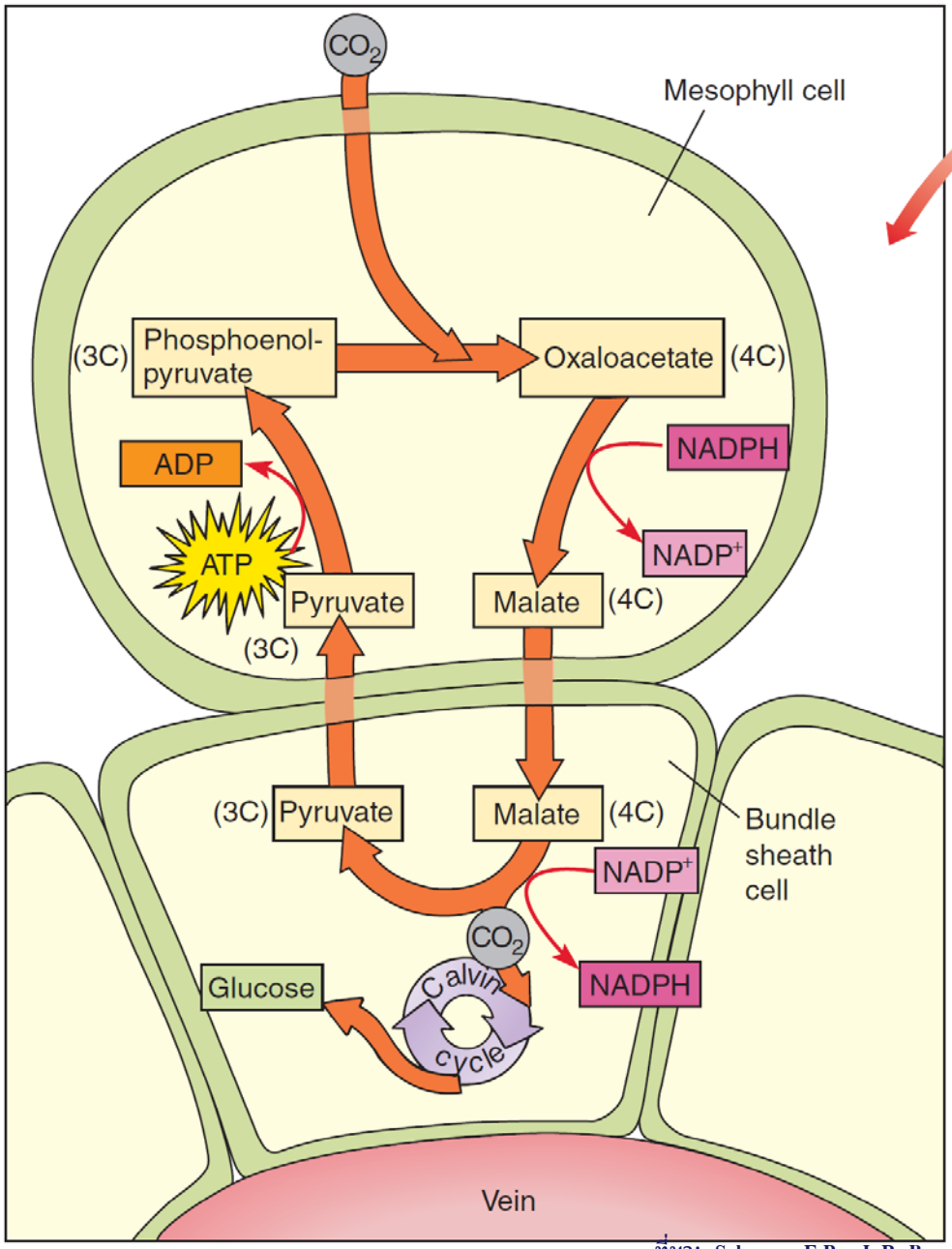
- เกิดขึ้นในพืชในเขตร้อน ที่มีความเข้มของแสงสูงและมีอุณหภูมิสูง เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และพืชตระกูลหญ้าเขตร้อน

- M.D. Hatch & C.R. Slack พบว่า การตรึง $CO_2$ ในใบอ้อย เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Phosphoenol pyruvate (PEP) กับ $CO_2$ โดยกิจกรรมเอนไซม์ Phosphoenol pyruvate carboxylase

  - สารตัวแรกที่เกิดขึ้น -- Oxaloacetate (OAA)
  - เรียกการตรึง $CO_2$ แบบนี้ว่า วิถีซีสี่ ($C_4$-pathway)

# $C_4$-pathway






พืช C4 เป็นพืชที่มีการตรึง $CO_2$ 2 ครั้ง

- ครั้งที่ 1 .....
- ครั้งที่ 2 .....

จากกลไกการตรึง $CO_2$ ดังกล่าวจึงทำให้ความเข้มข้นของ $CO_2$ บริเวณ bundle sheath cell ของพืช $C_4$ จึงสูงกว่าบริเวณ mesophyll cell ของพืช $C_3$

**FIGURE 9-16** ***Animated*** **Summary of the $C_4$ pathway**

$CO_2$ combines with phosphoenolpyruvate (PEP) in the chloroplasts of mesophyll cells, forming a four-carbon compound that is converted to malate. Malate goes to the chloroplasts of bundle sheath cells, where it is decarboxylated. The $CO_2$ released in the bundle sheath cell is used to make carbohydrate by way of the Calvin cycle.

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืช CAM (CAM cycle)

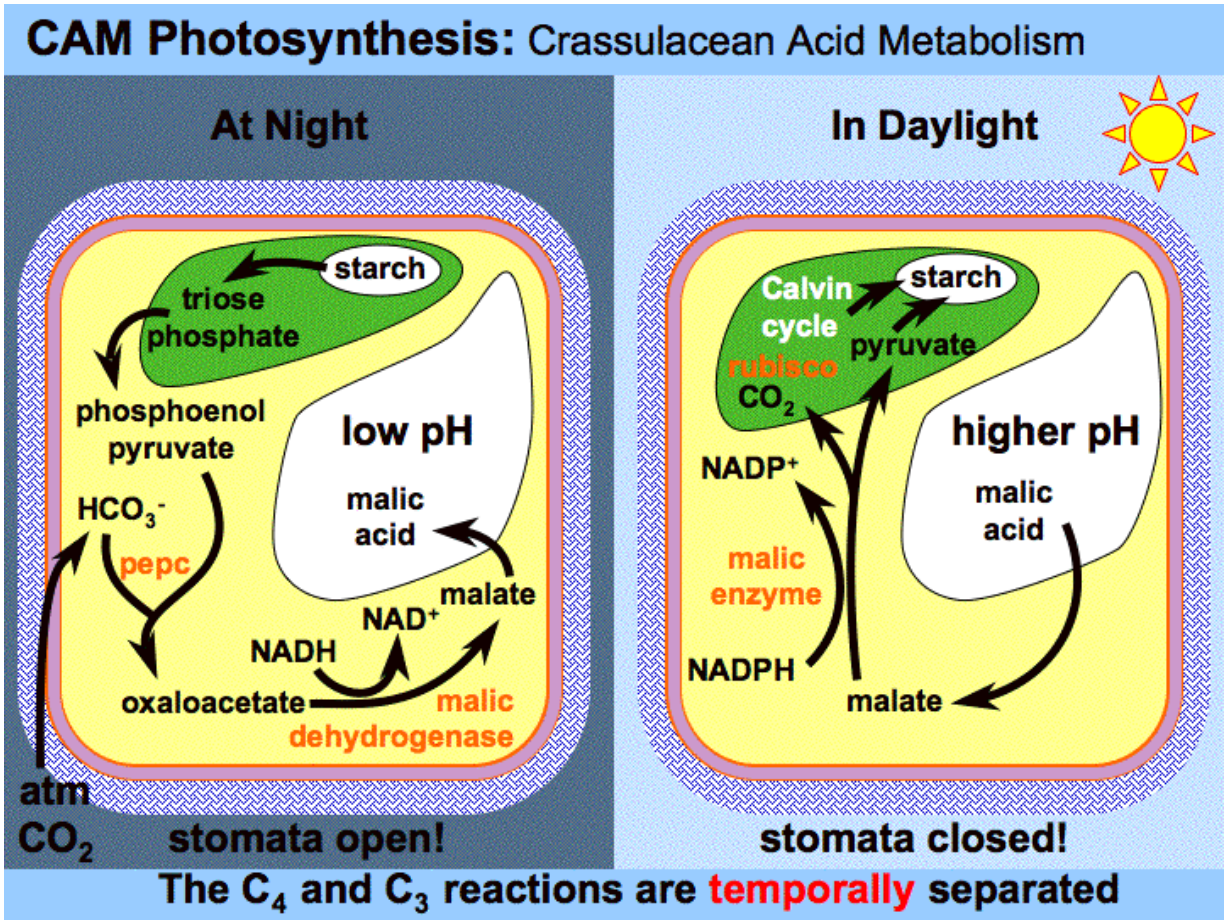
- พบในพืชที่ขึ้นในที่แห้งแล้ง -- พืชอวบน้ำ กระบองเพชร กล้วยไม้ สับปะรด
- ปากใบเปิดเวลากลางคืน -- พืชดูด $CO_2$ เข้าไปมาก
  --> เกิดการสร้างกรดอินทรีย์มาก
- กลางวันพืชปิดปากใบ
  --> ปริมาณกรดลดลง ถูกดึงไปใช้ใน metabolism
  --> น้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตเพิ่มสูงขึ้น

Robert W. Domm/Visuals Unlimited

**FIGURE 9-17** A typical CAM plant
Prickly pear cactus (*Opuntia*) is a CAM plant. The more than 200 species of *Opuntia* living today originated in various xeric habitats in North and South America.

ที่มา: Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

# กระบวนการตรึง $CO_2$ โดยพืช CAM (CAM cycle)




- พืชเปิดปากใบในเวลากลางคืน $CO_2$ จะเข้าสู่ใบทางปากใบไปที่เซลล์มีโซฟิล มีการตรึง $CO_2$ ด้วย phosphoenolpyruvate (PEP) ได้ oxaloacetate และเปลี่ยนไปเป็น malate ไปเก็บสะสมไว้ในแวคิวโอล
- ในเวลากลางวันปากใบปิด มีการเคลื่อนย้าย malate ออกจากแวคิวโอล เพื่อทำปฏิกิริยาปล่อย $CO_2$ ออกจาก malate (Decarboxylation) แล้วเข้าสู่กระบวนการตรึง $CO_2$ ในวัฏจักรคัลวินตามปกติ

ที่มา: http://image.dek-d.com/26/2404248/112744002

# เอกสารอ้างอิง

Solomon, E.P., L.R. Berg and D.W. Martin. 2011. Biology, Ninth Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning, USA.

Purves, W.K., G.H. Orians, and H.C. Heller. 1995. Life: The Science of Biology, 4th Edition. Sinauer Associates, Sunderland.

http:// highered.mheducation.com/sites/dl/free/.../mad25502_ch08.pdf

http:// www.mhhe.com/biosci/genbio/raven 6b/graphics/raven06b/other/reven06b.09.pdf