

บทที่ 13 กระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสง

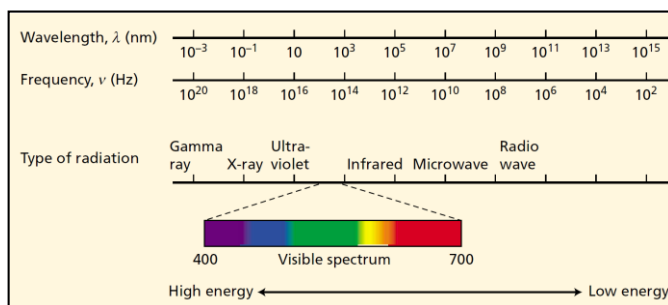
โยธิน จูประสงค์

ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

13.1 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

กระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก เพราะเป็นกระบวนการทางชีววิทยาที่สามารถนำพลังงานจากดวงอาทิตย์มาทำให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้ใช้ประโยชน์ องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วย

- 1) แสง คือ สิ่งที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค แสงที่พืชนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 nm ถึง 700 nm ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มนุษย์มองเห็น



ภาพที่ 13.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่น (λ) แปรผกผันกับความถี่ (ν)

- 2) สารสี (pigment) คือ สารที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง สีที่ไม่ถูกดูดกลืนจะสะท้อนออกมา เราจะเห็นเป็นสีนั้นๆ

สิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองได้ (Photoautotroph)	Chlorophyll				Carotenoid	Phycobillin	Bacteriophyll
	A	b	c	d			
1. ยูคาริโอต (Eukaryote)							
1.1 พืช	✓	✓			✓		
1.2 สาหร่ายสีเขียว	✓	✓			✓		
1.3 สาหร่ายสีน้ำตาล	✓		✓		✓		
1.4 สาหร่ายสีแดง	✓			✓	✓	✓ (phycoerythin)	
2. โพรคาริโอต (Prokaryote)							
2.1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน	✓				✓	✓ (phycocyanin)	
2.2 แบคทีเรียบางชนิด					✓		✓

ตาราง แสดงรงควัตถุของสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างอาหารเองได้ในพวกยูคาริโอต และโพรคาริโอต

2.1 Chlorophyll (บรรจุในคลอโรพลาสต์) เป็นสารสีที่สะท้อนแสงสีเขียว ดูดกลืนสีน้ำเงิน-แดง ประกอบด้วย Mg และ N เป็นองค์ประกอบสำคัญ มีหลายชนิด คือ chlorophyll a b c และ d

2.2 Carotenoid (บรรจุในคลอโรพลาสต์)

2.2.1 Carotene สารสีที่สะท้อนสีส้มแดง

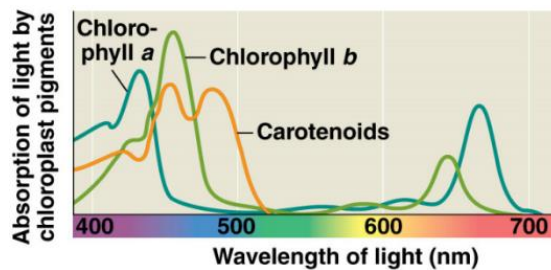
2.2.2 Xanthophyll สารสีที่สะท้อนสีส้มเหลือง

2.3 Phycobillin (บรรจุในคลอโรพลาสต์)

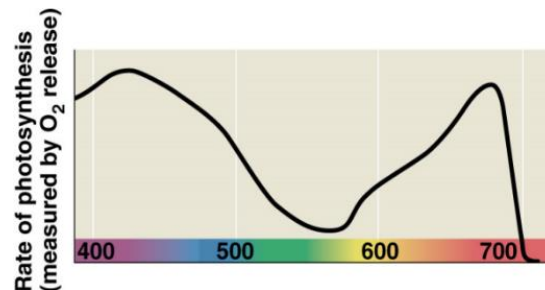
2.3.1 Phycocyanin สารสีที่สะท้อนสีน้ำเงิน

2.3.2 Phycoerythrin สารสีที่สะท้อนสีแดง

2.4 Bacteriochlorophyll เป็นสารสีที่พบในแบคทีเรียที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้



ภาพที่ 13.2 กราฟแสดงการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 13.3 กราฟแสดงสเปกตรัมการทำงานของพืช (action spectrum) เมื่อรงควัตถุหลายชนิดทำงานร่วมกันใน chloroplast จะทำให้สิ่งมีชีวิตสังเคราะห์ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ได้ดีต่างกัน

3) ออร์แกเนลล์ (organelles) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

- **สิ่งมีชีวิตพวักยูคาริโอต** : จะมีรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงบรรจุอยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast)

- คลอโรพลาสต์เป็นออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น

- ภายในคลอโรพลาสต์มีของเหลว ที่เรียกว่า stroma ซึ่งบรรจุเอนไซม์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง, 70s ribosome, RNA, DNA (ทั้งหมดเป็นสารตัวเดียวกับที่พบใน cytoplasm (ที่ lamella) ของ prokaryotes และใน mitochondria และเกิด ETC เหมือนกันด้วย)

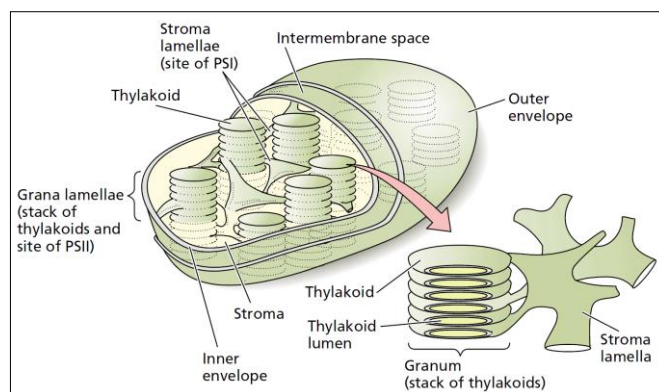
- เยื่อภายในคลอโรพลาสต์ที่พับซ้อนไปมา เรียกว่า Thylakoid membrane หรือ Lamella หรือเรียกว่า Thylakoid เฉยๆก็ได้ มีความสำคัญคือ เป็นที่อยู่ของรงควัตถุต่างๆ

- บางส่วนของ thylakoid membrane จะพับและวางซ้อนกันเป็นตั่งของเหรียญ เรียกเหรียญแต่ละอันว่า Grana thylakoid เรียกตั่งของเหรียญว่า Grana หรือ Granum แต่ละตั่งเชื่อมด้วย Stroma lamella (เรียก granum และ stroma lamella รวมกันว่า thylakoid membrane (เยื่อหุ้มไทลาคอยด์))

- ใน thylakoid membrane จะมีช่อง เรียกช่องนี้ว่า lumen

- สิ่งมีชีวิตพวกโพรคาริโอต : จะสังเคราะห์ด้วยแสงที่เยื่อ photosynthetic lamella ใน

cytoplasm



ภาพที่ 13.4 แสดงโครงสร้างชั้นต่างๆของคลอโรพลาสต์

13.2 การสร้างสารพลังงานสูง

กระบวนการสร้างสารพลังงานสูง เช่น Adenosine triphosphate (ATP) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Phosphorylation แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) Substrate level phosphorylation

- เป็นกระบวนการสร้าง ATP โดยถ่ายหมู่ฟอสเฟต (ต้องเป็นฟอสเฟตที่มีพันธะพลังงานสูง) จากโมเลกุลสารอื่น
- ตำแหน่งที่เกิด : (1) Cytosol ในกระบวนการ Glycolysis
(2) Matrix ของ mitochondria ใน Krebs' cycle

2) Oxidative phosphorylation และ Photophosphorylation

- สร้าง ATP โดยนำโปรตอน (H^+) จากบริเวณหนึ่งไปอีกบริเวณหนึ่ง โดยผ่าน ATP synthase เป็นการเคลื่อนที่ของสารแบบ simple diffusion
- เรียกการเคลื่อนที่ผ่าน ATP synthase ที่ทำให้เกิดการสร้าง ATP นี้ว่า Chemiosmosis

2.1 Oxidative phosphorylation

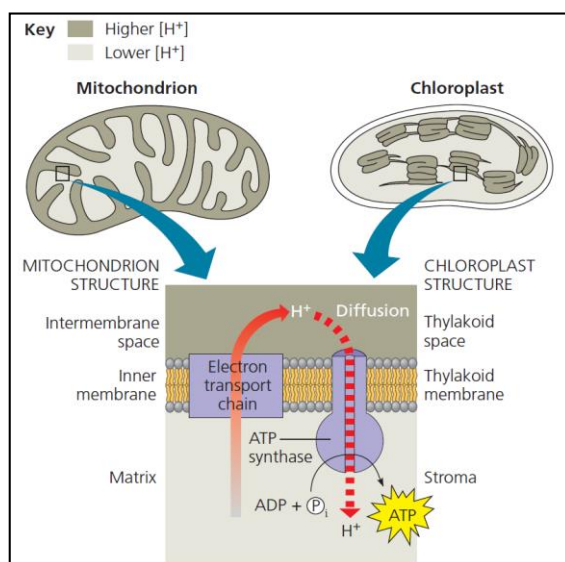
- เกิดที่ inner membrane of mitochondria ใน กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transport chain : ETC)

- ต่างจาก 2.2 คือ จะสร้าง ATP โดยนำโปรตอน (H^+) จากบริเวณ matrix ของ mitochondria ผ่าน protein complex ที่วางตัวอยู่บน membrane ไปยัง intermembrane space และย้อนกลับจาก intermembrane space ผ่าน ATP synthase ไปยัง matrix เกิด Chemiosmosis

2.2 Photophosphorylation

- เกิดที่ thylakoid space (lumen of thylakoid) ของ chloroplast

- ต่างจาก 2.1 คือ จะเกิดที่บริเวณ thylakoid lumen และ stroma (โดยการเกิดคล้ายกับข้อ 2.1)



ภาพที่ 13.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยา oxidative กับ Photophosphorylation

13.3 ขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

การสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) เป็นกระบวนการที่สิ่งมีชีวิตเปลี่ยนพลังงานแสงที่ได้รับจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี เราจึงเรียกกระบวนการนี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า photochemical reaction ที่สำคัญกระบวนการนี้ยังถือได้ว่าเป็นกระบวนการเดียวที่สามารถนำพลังงานแสงเข้ามาสู่ระบบนิเวศ โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 กระบวนการ และแต่ละกระบวนการจำเป็นต้องใช้แสง ได้แก่

- 1) ปฏิกิริยาแสง (light reaction)
- 2) ปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation reaction)

1 Light reaction

1.1 สถานที่เกิดปฏิกิริยา : Thylakoid membrane

1.2 องค์ประกอบที่สำคัญ :

(1) ระบบแสง (photosystem : PS) คือ หน่วยสังเคราะห์ด้วยแสงที่อยู่บน thylakoid membrane แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามความยาวคลื่นของพลังงานที่ใช้กระตุ้น

(1.1) Photosystem I : รับพลังงานแสงได้ดีที่มีความยาวคลื่น 700 nm = P700 = PSI

(1.2) Photosystem II : รับพลังงานแสงได้ดีที่มีความยาวคลื่น 680 nm = P680 = PSII

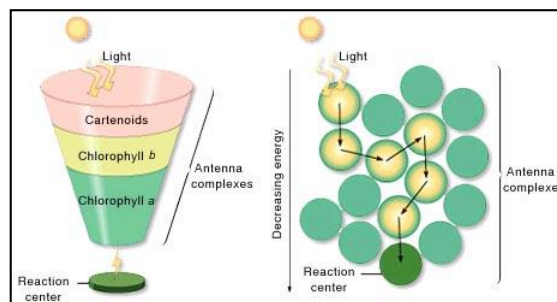
(2) Antenna คือ กลุ่มของรงควัตถุต่างๆที่ฝังตัวอยู่บนโปรตีน และเป็นส่วนหนึ่งของระบบแสง (PS)

(3) ศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสง (reaction center) คือ chlorophyll a ชนิดพิเศษ ที่จะขึ้นมารับพลังงานแสงที่ถูกถ่ายทอดมาจากความร่วมมือของระบบแสงและ antenna การที่ขึ้นมารับนี้พลังงานดังกล่าวจะต้องถ่ายทอดมาจนถึงค่าพลังงานกระตุ้นนั้นๆ



สามารถเรียงลำดับจากหน่วยใหญ่ไปหน่วยเล็กได้ดังนี้

Thylakoid > PS > Antenna > Reaction center > Chlorophyll a



ภาพที่ 13.6 แสดงการส่งพลังงานแสงมายัง antenna และ reaction center

1.3 วิธีของการถ่ายทอดอิเล็กตรอน มี 2 แบบ คือ

(1) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non-cyclic electron transfer)

(1.1) ❶ แสง → ส่งผ่านไปยังกลุ่มรงควัตถุดูดซับ (antenna) → ❷ ส่งต่อไปยัง chlorophyll a ซึ่งเป็นศูนย์กลางของปฏิกิริยา (reaction center) คือ PSI (P700) และ PSII (P680)

(1.2) เมื่อ chlorophyll a ที่ PSI และ PSII ถูกกระตุ้นจะปล่อย e^- ให้กับตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก (primary acceptor)

(1.3) ที่ PSI เมื่อส่ง e^- ให้กับ 1° acceptor → จะส่งไปยัง Ferredoxin (Fd) ที่ละลายอยู่ใน stroma → จากนั้น $NADP^+$ จะมารับ e^- → เกิดเป็น NADPH

**** จะเห็นว่า e^- ของ chlorophyll a ที่ PSI (P700) จะไม่ย้อนกลับสู่ PSI อีก จึงทำให้ PSI ต้องการ e^- และจะถูกทดแทนโดย PSII ในภายหลัง**

(1.4) **③** ที่ PSII เมื่อส่ง e^- ให้กับ 1° acceptor เรียกการจ่าย e^- นี้ว่า Photo oxidation (ดังนั้น PSII จะต้องการ e^- มาก จึงไปแย่ง e^- จากน้ำใน lumen ทำให้น้ำแตกตัว โดยมีธาตุ Mn และ Cl เข้าช่วย เรียกการแตกตัวของน้ำประเภทนี้ว่า Photolysis หรือ Hill's reaction) **→ ④** e^- จาก 1° acceptor จะส่งต่อไปยังตัวรับ e^- ต่างๆ เรียงตามลำดับดังนี้

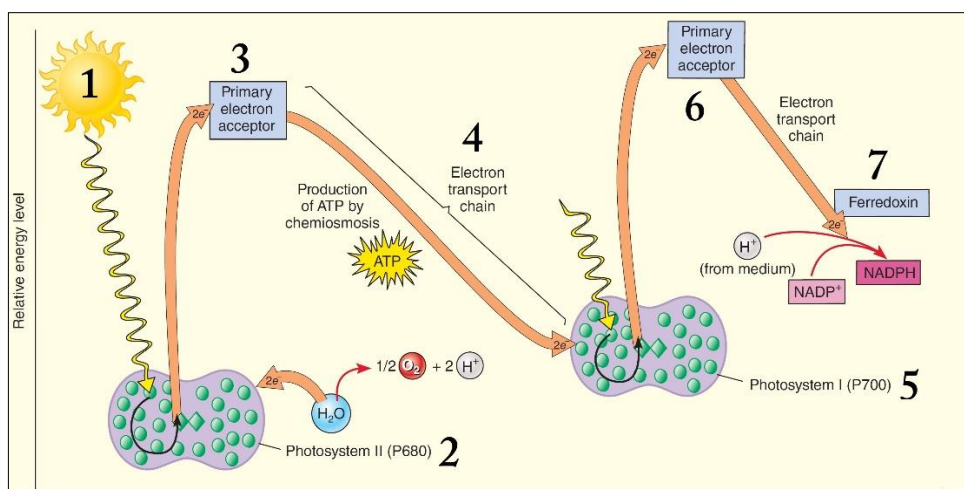
Plastoquinone (Pq) $\rightarrow$ Cytochrome complex (Cyt) $\rightarrow$ Plastocyanin (Pc)
 $\rightarrow$ และ e^- ถูกส่งไปทดแทนให้กับ PSI ต่อไป

(1.5) **⑤** e^- จะถูกส่งมายัง PSI **$\rightarrow$ ⑥** แล้ว e^- จะส่งไปยัง 1° acceptor **$\rightarrow$ ⑦** และส่งไปที่ Ferredoxin (Fd) ที่ละลายอยู่ใน stroma **$\rightarrow$ ⑧** จากนั้น NADP^+ จะมารับ e^- **$\rightarrow$** เกิดเป็น NADPH

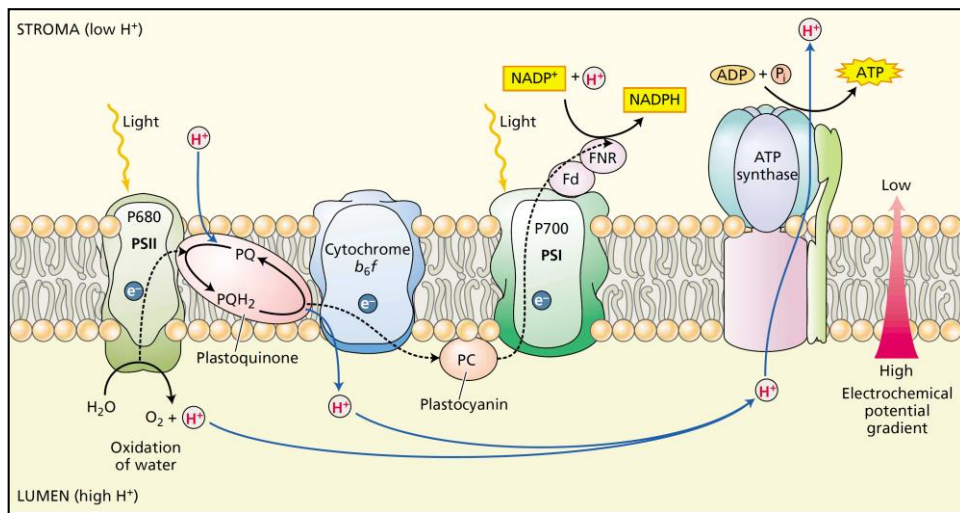


**** ในขณะที่ถ่ายทอด e^- พลังงานแสงที่สะสมใน e^- ของ PSII จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมา นำมาปั๊มโปรตอน (H^+) จาก stroma เข้าไปใน thylakoid lumen (ในนี้จึงมี pH ต่ำ เพราะ H^+ เป็นกรด กรดมาก pH จึงต่ำมาก) เมื่อใน lumen มี H^+ มาก มันจึงแพร่กลับเข้ามายัง stroma โดยผ่านเอนไซม์ ATP synthase **$\rightarrow$** H^+ จึงไปกระตุ้นให้ ATP synthase สร้าง ATP จาก ADP และ หมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ใน stroma**

**** การสร้าง ATP โดยการนำพลังงานแสงมาเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในรูปพันธะพลังงานสูงของ ATP เรียกการสร้าง ATP แบบนี้ว่า Photophosphorylation**



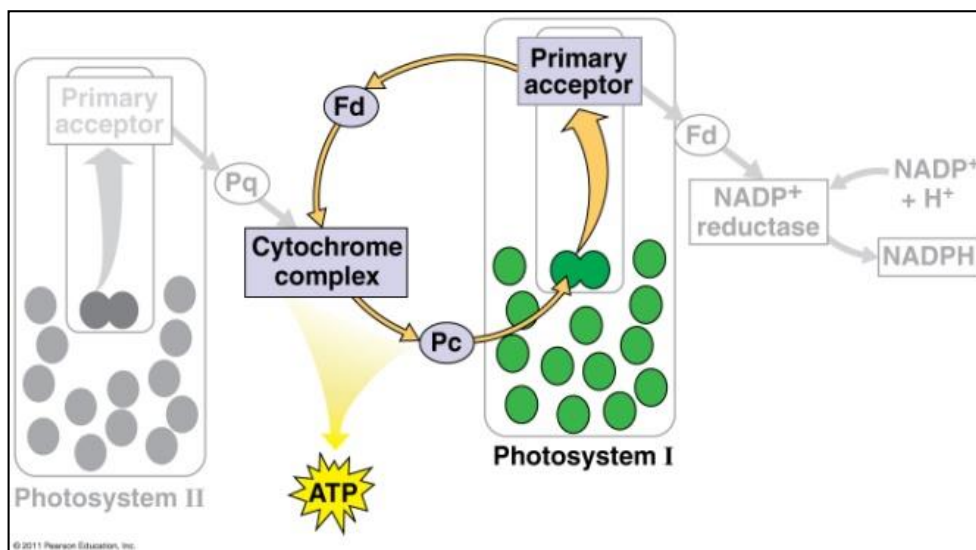
ภาพที่ 13.7 แสดงกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร เรียงตามลำดับจาก **① $\rightarrow$ ⑧**



ภาพที่ 13.8 แสดงกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร และการเกิด Chemiosmosis

(2) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic electron transfer)

- (2.1) ❶ แสง → ส่งผ่านไปยังกลุ่มรงควัตถุดูดซับ (antenna) → ❷ ส่งต่อไปยัง chlorophyll a ซึ่งเป็นศูนย์กลางของปฏิกิริยา (reaction center) คือ PSI (P700)
- (2.2) เมื่อ chlorophyll a ที่ PSI ถูกกระตุ้นจะปล่อย e^- ให้กับตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก (primary acceptor)
- (2.3) เมื่อส่ง e^- ให้กับ 1° acceptor → ❸ จะส่งไปยัง Ferredoxin ที่ละลายอยู่ใน stroma → ❹ จากนั้นจะส่งต่อไปยัง Cytochrome complex → ❺ และ Plastocyanin
- (2.4) หลังจากนั้นจะกลับไปยัง PSI ในหมายเลข ❷ วนเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



ภาพที่ 13.9 แสดงกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร

② การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ fixation) ด้วย Calvin cycle

2.1 สถานที่เกิด : stroma ของ chloroplast (รงควัตถุสีเขียวที่อยู่ในเซลล์)

2.2 CO₂ fixation ด้วย Calvin cycle (หรือ Calvin-Benson cycle) ในพืชประเภทต่างๆ

- (1) พืช C₃ หรือพืชทั่วไป จะเกิดกระบวนการนี้ใน stroma ของ chloroplast ที่ mesophyll cell
- (2) พืช C₄ หรือพืชในเขตร้อน จะเกิดกระบวนการนี้ใน stroma ของ chloroplast ที่ bundle sheath cell
- (3) พืช CAM (Crassulacean acid metabolism) หรือพืชแห้งแล้ง จะเกิดกระบวนการนี้ใน stroma ของ chloroplast ที่ mesophyll cell

2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

ปฏิกิริยาขั้นที่ 1 Carboxylation หรือ Carbondioxide fixation

- (1) เริ่มต้นจากสารตั้งต้นคือ RuBP (Ribulose-1,5-bisphosphate) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอมและหมู่ฟอสเฟต 2 หมู่ โดย RuBP
- (2) RuBP จะทำปฏิกิริยารวมตัวกับ CO₂ มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เอนไซม์ Rubisco (ribulose bisphosphate carboxylase oxygenase)
- (3) ได้เป็นสารประกอบใหม่ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม สารที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นสารไม่เสถียร จะสลายไปเป็นกรดที่มีคาร์บอน 3 อะตอม และหมู่ฟอสเฟต 1 หมู่ คือ PGA (phosphoglycerate) จำนวน 2 โมเลกุล ** ซึ่ง PGA จัดเป็นสารเสถียรตัวแรกของวัฏจักร

★ ดังนั้น ถ้าเริ่มต้นจาก RuBP 3 โมเลกุล รวมตัวกับ CO₂ 3 โมเลกุล จะได้ PGA 6 โมเลกุล
ดังสมการ $3\text{CO}_2 + 3\text{RuBP} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{PGA}$

ปฏิกิริยาขั้นที่ 2 Reduction

- (1) PGA ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 จะรับ e⁻ จาก NADPH (นั่นคือเป็นการนำ PGA มารีดิวซ์ด้วย NADPH) และทำปฏิกิริยาพลังงานจากการสลายตัวของ ATP ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง (light reaction)
- (2) จนได้ PGAL (phosphoglyceraldehyde ; glyceraldehydes-3-phosphate : G3P) เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอมและฟอสเฟต 1 หมู่

★ ดังนั้นจาก PGA 6 โมเลกุลจะเปลี่ยนเป็น PGAL 6 โมเลกุล ดังสมการ
 $6\text{PGA} + 6\text{NADPH} + 6\text{ATP} \rightarrow 6\text{PGAL} + 6\text{NADP}^+ + 6\text{Pi} + 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{ADP}$

โครงการกฎแฉวิทยาศาสตร์ครั้งที่ 15 : สโมสรนักศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

** น้ำตาล PGAL ที่ได้บางตัวจะออกจาก Calvin cycle ไปรวมกับ PGAL ตัวอื่น กลายเป็นคาร์โบไฮเดรตขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะ sucrose ซึ่งเป็นอาหารที่ลำเลียงใน phloem หรือ แป้งซึ่งเป็นอาหารสะสมใน vacuole ของพืช

ปฏิกิริยาขั้นที่ 3 Regeneration

เป็นขั้นตอนที่จะสร้าง RuBP ขึ้นมา ใหม่เพื่อกลับไปรับคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง

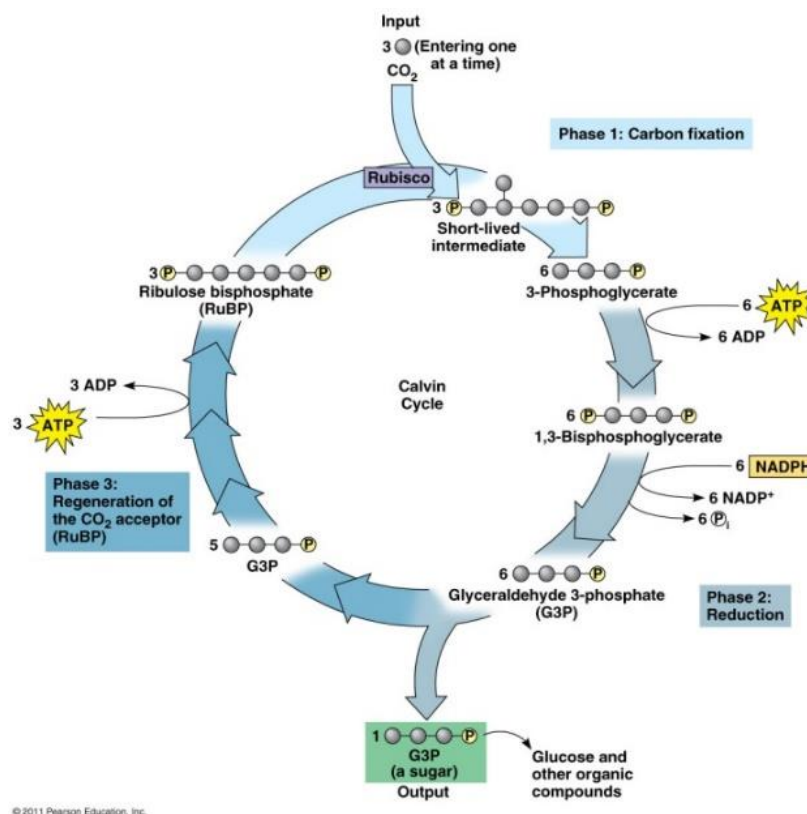
(1) น้ำตาล PGAL ที่เกิดขึ้น 6 โมเลกุลนั้น จะเปลี่ยนแปลงต่อไป โดย 5 โมเลกุลของ PGAL ทำปฏิกิริยากับพลังงานจากการสลายตัวของ ATP ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง จำนวน 3 โมเลกุล

(2) หลังจากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็น RuBP 3 โมเลกุล

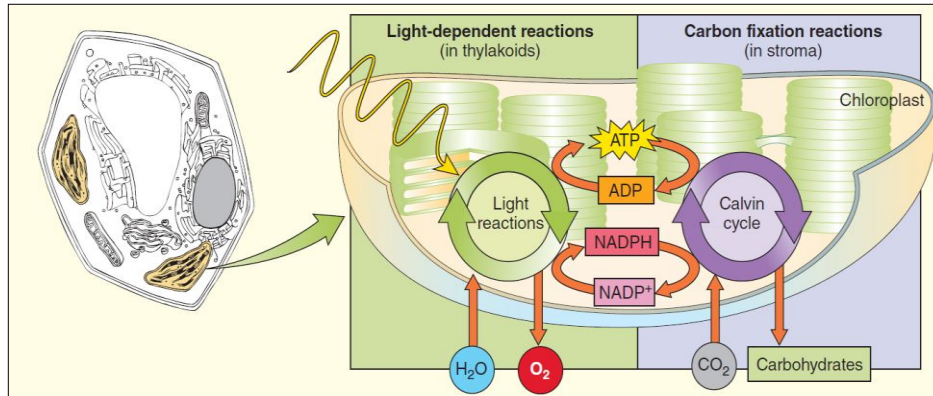
★ ดังนั้นจาก PGAL 6 โมเลกุล ออกไปรวมตัวกับ PGAL ตัวอื่น 1 โมเลกุล เหลือให้วนต่อไป ในวัฏจักร 5 โมเลกุล และทำปฏิกิริยากับ ATP 3 โมเลกุล ได้ 3RuBP เตรียมรวมกับ CO₂ ต่อไป เขียนสมการได้ดังนี้ $5\text{PGAL} + 3\text{ATP} \rightarrow 3\text{RuBP} + 3\text{ADP} + 2\text{P}_i$

2.4 Calvin cycle ที่สมบูรณ์ 1 รอบ จะได้ PGAL (น้ำตาลที่มี C 3 อะตอม) 1 โมเลกุล ออกมา โดยต้องใช้ 9 ATP และ 6 NADPH

2.5 ถ้าหากต้องการกลูโคส (น้ำตาลที่มี C 6 อะตอม) 1 โมเลกุล ต้องเกิด Calvin cycle 2 รอบ สารต่างๆที่ใช้ก็จะต้องเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า



ภาพที่ 13.10 แสดง Calvin-Benson cycle



ภาพที่ 13.11 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์บริเวณต่างๆ

13.4 พืช C_3 , C_4 , CAM และการปรับตัว

การแบ่งพืชออกเป็นประเภทต่างๆ ตามลักษณะการตรึง CO_2 แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) พืช C_3 หรือพืชทั่วไป

- ตัวอย่าง ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว ข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี ผักโขม หนุ่ยปากควาย
- เกิดปฏิกิริยาการตรึง CO_2 เพียงครั้งเดียว คือ Calvin-Benson cycle
- Enzyme ที่ใช้ตรึง : Rubisco (5C)
- First product : PGA (3C)
- ปฏิกิริยาการตรึง CO_2 นี้สามารถเกิดได้ในทุกๆ เซลล์ที่มีคลอโรพลาสต์ โดยพืช C_3 นี้เกิดที่ mesophyll cell
- ถ้าหากอากาศร้อน พืชพวกนี้จะประสบปัญหา คือ แก๊สจะละลายได้น้อยลง ต้องปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ และเกิดกระบวนการหายใจแสง (Photorespiration)
- Photorespiration เกิดจากความพิเศษของเอนไซม์ Rubisco (RuBP carboxylase oxygenase) ที่นอกจากจะจับ RuBP มาทำปฏิกิริยากับ CO_2 (carboxylation) ได้แล้ว มาทำปฏิกิริยากับ O_2 (oxygenation) ได้ด้วย

2) พืช C_4 หรือพืชเขตร้อน

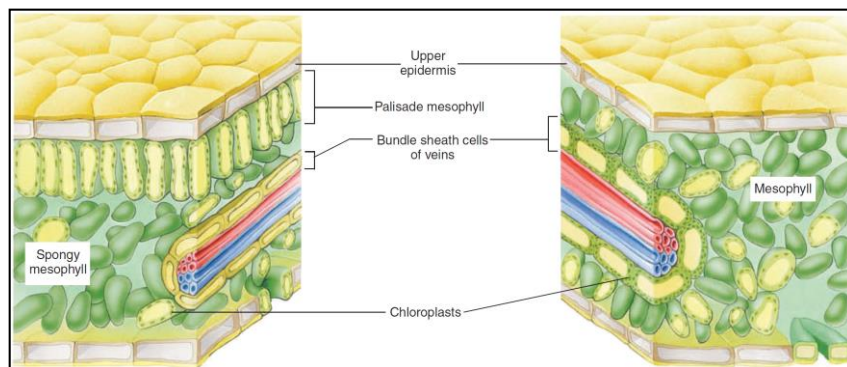
- ตัวอย่าง อ้อย ข้าวฟ่าง ข้าวโพด หนุ่ยขุ่น หนุ่ยคา หนุ่ยแห้วหมู หนุ่ยขจรจบ หนุ่ยแพรง ลูกเดือย ผักโขมจีน บานไม่รู้โรย
- เกิดปฏิกิริยาการตรึง CO_2 2 ครั้ง (ต่างสถานที่ : spatial separation of step) โดยแบ่งเป็น
 - (1) ครั้งที่ 1 ตรึง CO_2 จากอากาศ โดยเอนไซม์ PEP carboxylase (3C) ที่ mesophyll cell เรียกกระบวนการตรึง CO_2 จากอากาศนี้ว่า Hatch-Slack pathway

(2) ครั้งที่ 2 ตรึง CO_2 ไม่ใช่จากอากาศ โดย Calvin-Benson cycle (เอนไซม์ Rubisco (5C)) ที่ bundle sheath cell

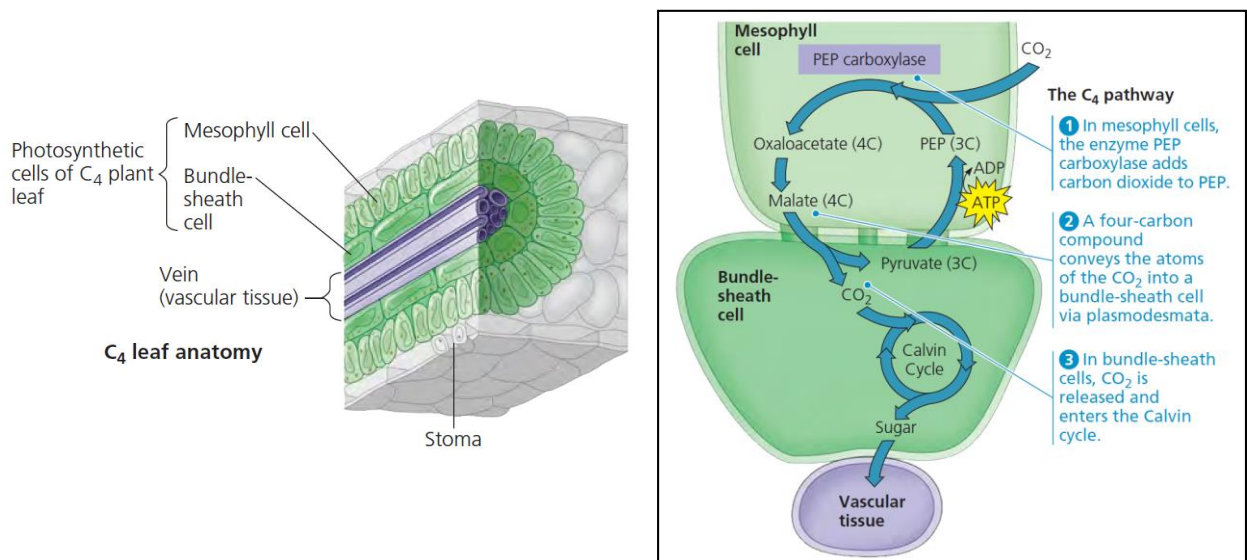
■ First product : OAA (4C)

■ ปฏิกริยาการตรึง CO_2 เกิดขึ้นที่ mesophyll และ bundle sheath cell เพราะพืช C_4 มีคลอโรพลาสต์ทั้งสองตำแหน่ง และเชื่อมต่อกับ mesophyll (ซึ่งแยกไม่ออกว่าเป็น spongy หรือ palisade mesophyll) ทาง plasmodesmata ซึ่งต่างจากพืช C_3 ที่ไม่มีคลอโรพลาสต์ที่ bundle sheath cell

■ เมื่ออากาศร้อน พืชพวกนี้จะไม่เกิดการหายใจแสง (Photorespiration)



ภาพที่ 13.12 แสดงโครงสร้างของ bundle sheath cell เปรียบเทียบระหว่างพืช C_3 (ซ้าย) และพืช C_4 (ขวา)



ภาพที่ 13.13 แสดงโครงสร้างของใบพืช C_4 (ซ้าย) และการตรึง CO_2 ของพืช C_4 (ขวา)

3) พืช CAM (Crassulacean acid metabolism) หรือพืชแห่งแล้ง

■ ตัวอย่าง สับปะรด วานหางจรเข้ กุหลาบหิน กล้วยไม้อิงอาศัย (ที่เกาะตามต้นไม้อื่น) พืชทะเลทราย พืชป่าชายเลน

■ เกิดปฏิกริยาการตรึง CO_2 2 ครั้ง (ต่างเวลา : temporal separation of step) โดยแบ่งเป็น

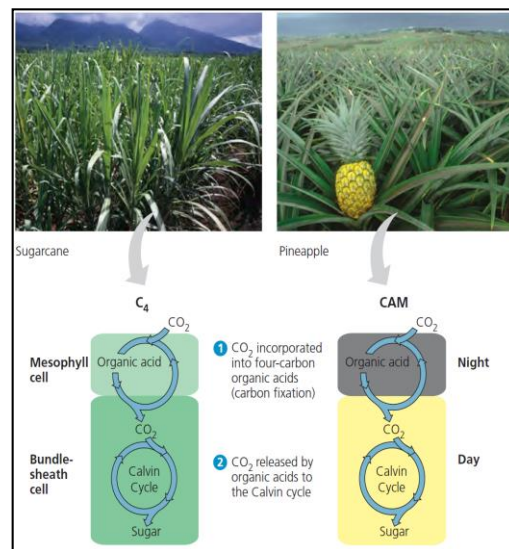
(1) ครั้งที่ 1 ตรึง CO_2 จากอากาศ โดยเอนไซม์ PEP carboxylase (3C) ที่ mesophyll cell เรียกกระบวนการตรึง CO_2 จากอากาศนี้ว่า Hatch-Slack pathway โดยเกิดในเวลา กลางคืน

(2) ครั้งที่ 2 ตรึง CO_2 ไม่ใช่จากอากาศ โดย Calvin-Benson cycle (เอนไซม์ Rubisco (5C)) ที่ mesophyll cell โดยเกิดในเวลากลางวัน

■ First product : OAA (4C)

■ ปฏิกริยาการตรึง CO_2 ของพืช CAM เมื่อเกิดการตรึง CO_2 จากอากาศ → ทำปฏิกิริยาได้ OAA → OAA เปลี่ยนเป็น malate (4C) จะถูกส่งไปเก็บไว้ใน vacuole เพื่อนำมาใช้ใน Calvin cycle โดยจะส่งกลับมาที่ mesophyll cell ในเวลากลางวัน (ซึ่งปากใบปิดในเวลากลางวัน)

■ เมื่ออากาศร้อน พืชพวกนี้จะไม่เกิดการหายใจแสง (Photorespiration)



ภาพที่ 13.14 แสดงการเปรียบเทียบการตรึง CO_2 ของพืช C_4 และ CAM

13.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

ในการทดลองวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช มักจะวัดจากอัตราการตรึง CO_2 หากมีอัตราการตรึง CO_2 มากก็สังเคราะห์ด้วยแสงมาก ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง มีดังนี้

1) ความยาวคลื่นแสง : พืชมีการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ดีที่สุดในช่วงแสงสีน้ำเงินและสีแดง และได้ต่ำที่สุดในช่วงแสงสีเขียว (ตามเส้นกราฟ action spectrum)

2) ความเข้มแสง : พิจารณา 2 ประเด็น คือ

2.1 Light compensation point คือ ความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับ อัตราการหายใจ (ใช้ = ปลอย) ดังนั้นอัตราการตรึง CO_2 สุทธิจึง = 0

2.2 Light saturation point คือ จุดที่เมื่อเพิ่มความเข้มแสงแล้วอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่เพิ่มขึ้น (คือจุดอิ่มตัวของแสงนั่นเอง อิ่มแล้วรับไม่ได้อีกแล้ว)

**** พืช C_3 จะมีจุดทั้ง 2 ต่ำกว่า พืช C_4 แต่ถ้าความเข้มแสงสูงมากๆ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชทั้งสองจะลดลง และทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ใบจะไหม้**

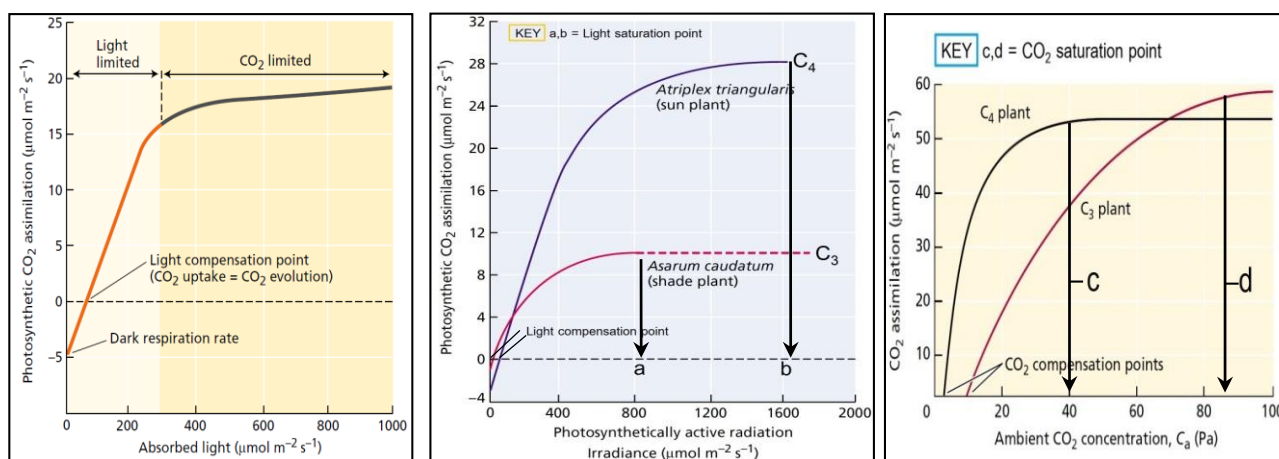
**** พืชในที่ร่มใช้แสงปริมาณน้อยก็สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้เต็มที่ จึงมีค่าในข้อ 2.2 ต่ำกว่าพืชกลางแจ้ง**

3) ปริมาณ CO_2 : พิจารณา 2 ประเด็น โดยคล้ายกับความเข้มแสง คือ

3.1 CO_2 compensation point คือ ปริมาณ CO_2 ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง = อัตราการหายใจ

3.2 CO_2 saturation point คือ จุดอิ่มตัวของ CO_2

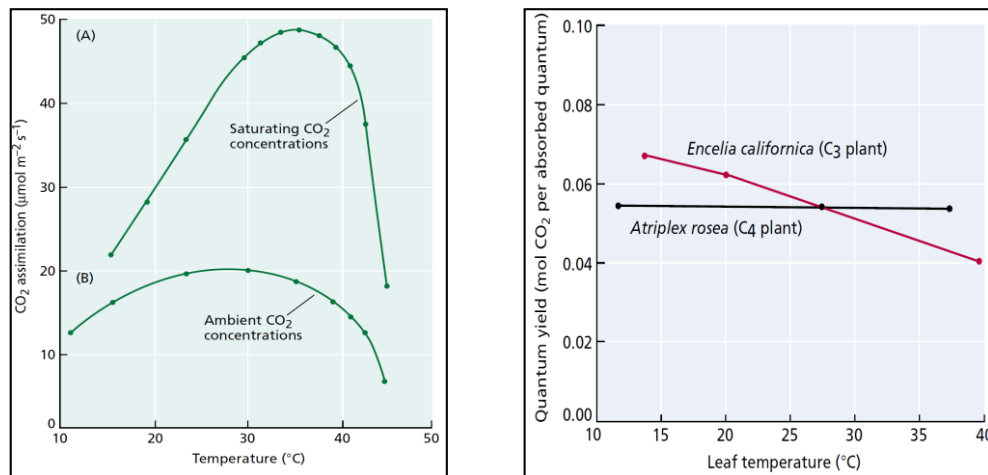
**** พืช C_4 มีจุดทั้งสองต่ำกว่าพืช C_3**



ภาพที่ 13.15 กราฟแสดง light compensation point ของพืช C_3 (ซ้าย), แสดง light compensation point และ light saturation point (a,b) ของพืช C_3 และ C_4 (กลาง), และแสดง CO_2 compensation point และ CO_2 saturation point ของพืช C_4 และ C_3 (ขวา)

- 4) ปริมาณ O_2 : มีผลเฉพาะพืช C_3 เพราะเกิด photorespiration ยิ่ง O_2 มาก อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงยิ่งลดลง
- 5) อุณหภูมิ : มีผลต่อการทำงานของ enz. ถ้าอุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไปเอนไซม์จะทำงานได้ไม่ดี และถ้าอุณหภูมิสูง (อากาศร้อน) จะมีผลต่อปริมาณ CO_2 และการเกิด photorespiration ในพืช C_3 แต่ไม่ค่อยมีผลในพืช C_4

บทที่ 13 กระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสง



ภาพที่ 13.16 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณ CO₂ โดยเปรียบเทียบการที่มีปริมาณ CO₂ ในสิ่งแวดล้อมมาก (A) และน้อย (B) (ซ้าย) และแสดงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงที่อุณหภูมิต่างๆของพืช C₃ และ C₄ (ขวา)

- 6) อายุของใบ : ใบที่อ่อนหรือแก่จนเกินไปจะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่ดีเท่ากับใบที่เจริญพอดีๆ
- 7) ธาตุอาหาร : ถ้าหากขาดธาตุ N และ Mg พืชจะขาดคลอโรฟิลล์ ใบจะเหลืองซีด เรียกว่า Chlorosis ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง
- 8) ปริมาณน้ำในดิน : ถ้าในดินมีน้ำน้อยปากใบจะปิด (เพื่อรักษาสมดุล) ส่งผลให้ปริมาณ CO₂ ลดลง

เอกสารอ้างอิง

แหล่งอ้างอิงรูปภาพ

- รูปภาพที่ 13.1 Plant Physiology 3rd edition, p.112, Taiz and Zeiger
- รูปภาพที่ 13.2 Campbell Biology 9th edition, p.191, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.3 Campbell Biology 9th edition, p.191, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.4 Plant Physiology 3rd edition, p.121, Taiz and Zeiger
- รูปภาพที่ 13.5 Campbell Biology 9th edition, p.196, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.6 http://www.mhhe.com/biosci/esp/2001_gbio/
- รูปภาพที่ 13.7 ดัดแปลงจาก Biology 9rd edition, p.201, Solomon et. al
- รูปภาพที่ 13.8 Plant Physiology 3rd edition, p.126, Taiz and Zeiger
- รูปภาพที่ 13.9 Campbell Biology 9th edition, p.195, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.10 Campbell Biology 9th edition, p.198, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.11 Biology 9rd edition, p.199, Solomon et. al
- รูปภาพที่ 13.12 Biology 9rd edition, p.207, Solomon et. al
- รูปภาพที่ 13.13 Campbell Biology 9th edition, p.201, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.14 Campbell Biology 9th edition, p.202, Reece et. al
- รูปภาพที่ 13.15 ดัดแปลงจาก Plant Physiology 3rd edition, p.178 และ 186, Taiz and Zeiger
- รูปภาพที่ 13.16 Plant Physiology 3rd edition, p.178 และ 189, Taiz and Zeiger

แหล่งอ้างอิงตาราง

ตาราง ดัดแปลงจาก BIOLOGY for high school students, หน้า 67, จีรัสย เจนพานิชย์

เอกสารอ้างอิง

1.แหล่งอ้างอิงจากเว็บไซต์

Photosynthesis. www.masteringbiology.com. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2556.

Reaction center. www.mhhe.com. สืบค้นเมื่อ 23 สิงหาคม 2556.

2.แหล่งอ้างอิงจากหนังสือ

ภาษาไทย

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. ชีววิทยา 1 (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร : ด้านสุทธาการพิมพ์, 2548.

จีรัสย เจนพานิชย์. BIOLOGY for high school students (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพมหานคร : สามลดา, 2553.

ภาษาอังกฤษ

Reece et. al. CAMPBELL BIOLOGY (9th edition). San Francisco (USA) : Pearson Benjamin Cummings, 2011.

Solomon, Berge and Martin. BIOLOGY (9th edition). Stamford (USA) : Cengage Learning, 2011.

Sylvia S. Mader. BIOLOGY (9th edition). USA : McGraw-Hill.

Taiz, L. and Zeiger. Plant Physiology (3rd edition). Sunderland (USA) : Sinauer Associates, 2003.