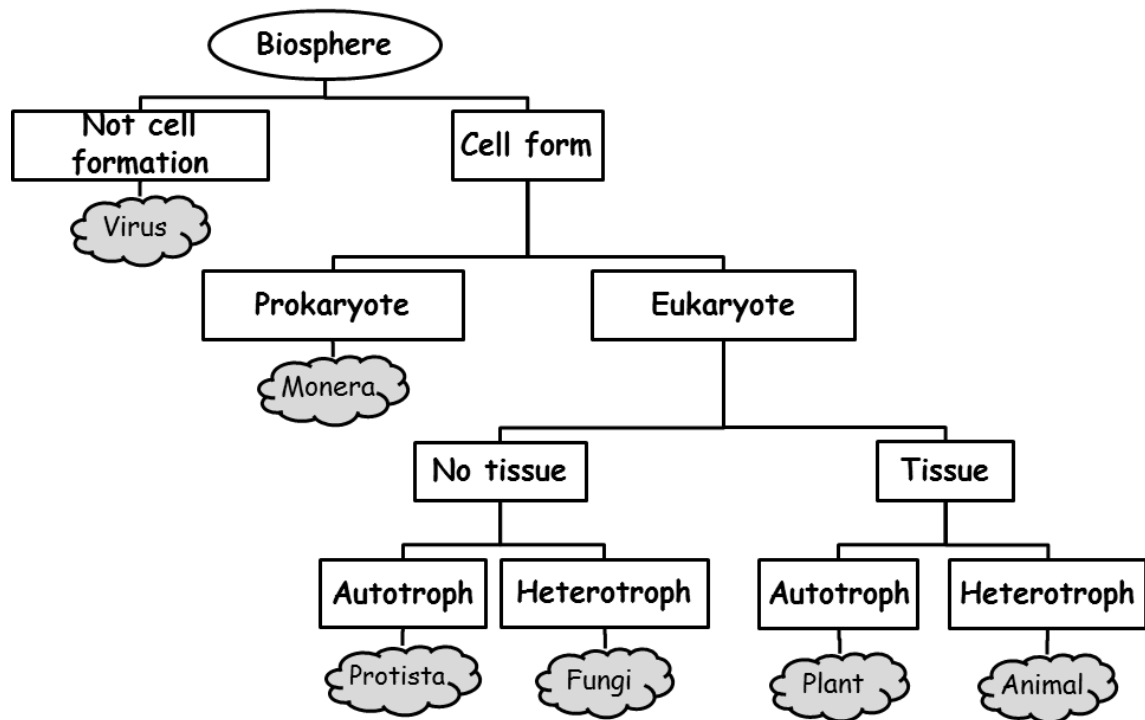


การสังเคราะห์ด้วยแสง

1. บทนำ
2. โครงสร้างภายในของใบ และ chloroplast
3. รังควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
4. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
5. การตรึง CO₂ ของพืช
6. ปัจจัยบางประการที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง

1. บทนำ

การจัดกลุ่มของสิ่งมีชีวิต



Kingdom

- | | |
|------------|---|
| — Virus | ไวรัสและไวรอยด์ |
| — Monera | Bacteria และ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) |
| — Protista | Protozoa, สาหร่ายต่าง ๆ และราเมือก |
| — Fungi | เห็ด, รา, yeast |
| — Plant | พืชชนิดต่าง ๆ |
| — Animal | สัตว์ชนิดต่าง ๆ |

การจัดจำแนกหมวดหมู่ของ Kingdom plant

1. พืชไม่มีท่อลำเลียง (Non-vascular plants) : Gametophyte เด่น

- Phylum Hepatophyta ลิเวอร์เวิร์ด (liverwort)
- Phylum Anthocerophyta ฮอร์นเวิร์ด (hornwort)
- Phylum Bryophyta Moss, Sphagnum moss (ข้าวตอกหญ้า)

2. พืชที่มีท่อลำเลียง (Vascular plant) : Sporophyte เด่น

2.1 พืชไม่มีเมล็ด (Seedless vascular plants)

- Phylum Lycophyta ดินสั๊กแก, สร้อยสุกรม, หางสิงห์
- Phylum Pterophyta หวายตะนอย, หญ้าถอดปล้อง, เฟิร์นต่างๆ

2.2 พืชมีเมล็ด (Seed vascular plants)

➤ **พืชเมล็ดเปลือย (Gymnosperm)** = ไม่มีผนังรังไข่ (ovary wall) หุ้มเมล็ด

- Phylum Coniferophyta สน 2 ใบ, สน 3 ใบ, สนฉัตร, สนหางสิงห์
- Phylum Cycadophyta ปรัง, ปรังป่า, มะพร้าวเต่า, ปรังญี่ปุ่น
- Phylum Ginkophyta แปะก๊วย (Ginkgo biloba)
- Phylum Gnetophyta มะเ็ญย

➤ **พืชเมล็ดไม่เปลือย (Angiosperms)** = มีผนังรังไข่ (ovary wall) หุ้มเมล็ด

- Phylum Anthophyta (พืชดอก) = จอก, แหน, แหนเป็ด, ไข่น้ำ (ผำ), สนทะเล, สนปักษีพิทักษ์, สาหร่ายข้าวเหนียว, สาหร่ายหางกระรอก
 - Class Dicotyledonae พืชใบเลี้ยงคู่
 - Class Monocotyledonae พืชใบเลี้ยงเดี่ยว

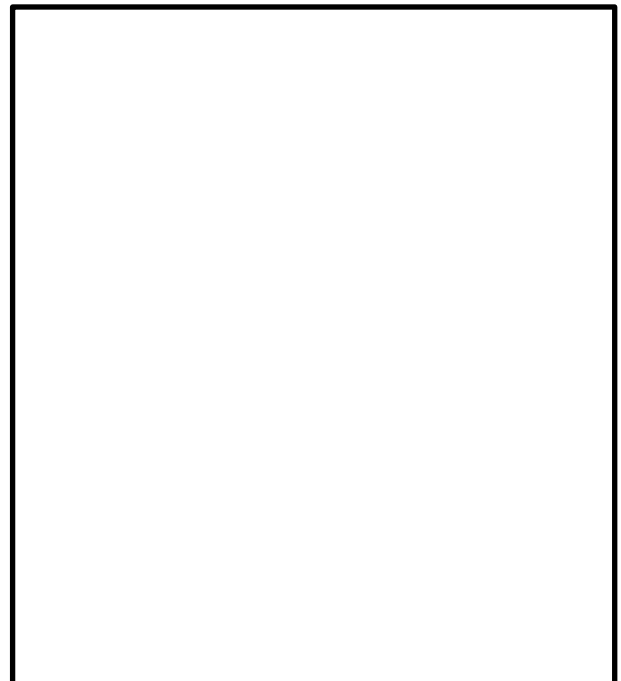
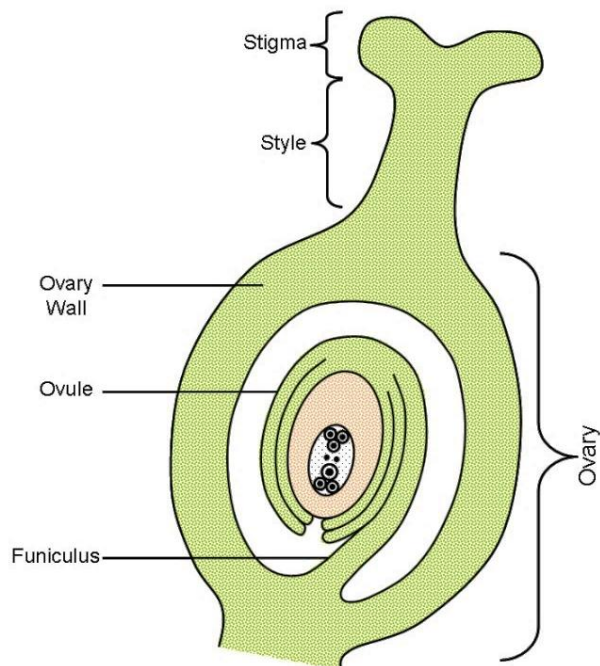
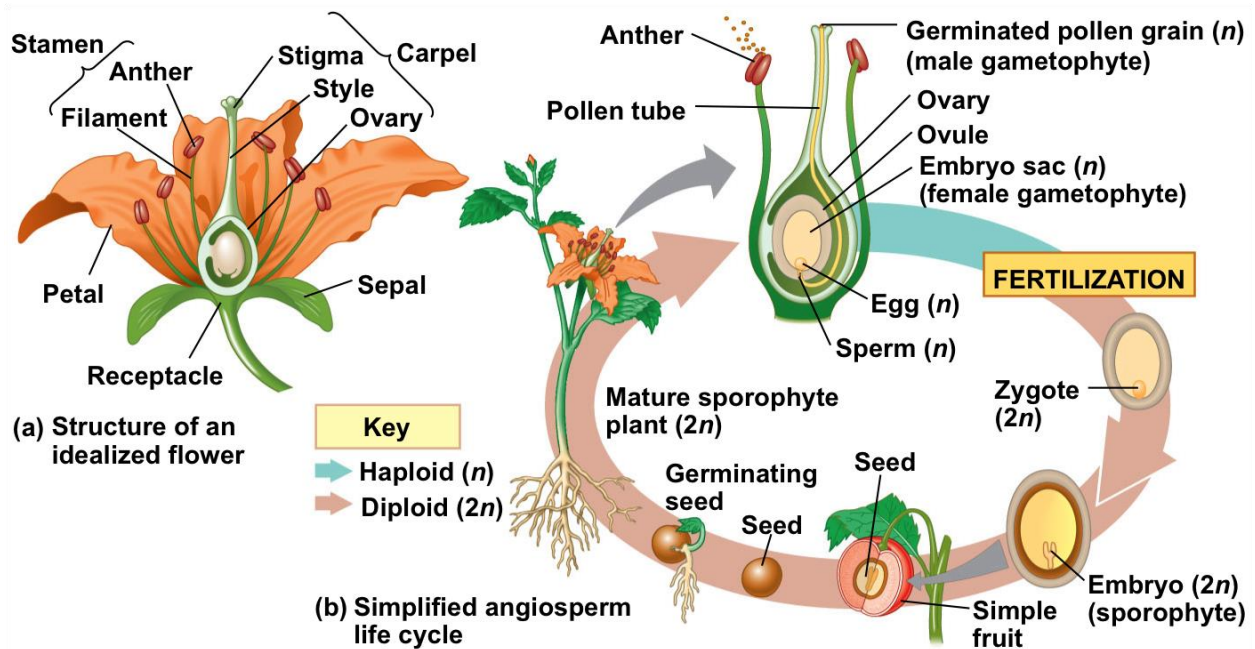
เพิ่มเติม...ท่อลำเลียง (Vascular bundle) ประกอบด้วย

- ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem)
- ท่อลำเลียงอาหาร (Phloem)

Kingdom plant

- เป็น Eukaryotic cell
- เป็น Multicellular organism, มีเนื้อเยื่อ และมีระยะ Embryo
- มีวงชีวิตแบบสลับ (Alternative of generation/Metagenesis) แบ่งเป็น 2 ระยะ
 - Sporophyte ระยะที่ดำรงชีวิต จำนวนชุดโครโมโซม diploid ($2n$)
 - Gametophyte ระยะที่ดำรงชีวิต จำนวนชุดโครโมโซม haploid (n)

วงจรชีวิตแบบสลับของพืชดอก



กระบวนการสร้างอาหารของสิ่งมีชีวิต แบ่งได้เป็น

➤ **Autotroph** คือ สิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างอาหาร (สารอินทรีย์) เองได้

— การสังเคราะห์ด้วยแสง (Photoautotroph).....

— การสังเคราะห์เคมี (Chemoautotroph).....

➤ **Heterotroph/Consumer** คือ สิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองไม่ได้ ต้องได้รับสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตอื่น

— Photoheterotroph.....

— Chemoheterotroph.....

****แหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต คือ.....****

Mode of Nutrition	Energy Source	Carbon Source	Types of Organisms
Autotroph			
Photoautotroph	Light	CO ₂	Photosynthetic prokaryotes (for example, cyanobacteria); plants; certain protists (for example, algae)
Chemoautotroph	Inorganic chemicals	CO ₂	Certain prokaryotes (for example, <i>Sulfolobus</i>)
Heterotroph			
Photoheterotroph	Light	Organic compounds	Certain prokaryotes (for example, <i>Rhodobacter</i> , <i>Chloroflexus</i>)
Chemoheterotroph	Organic compounds	Organic compounds	Many prokaryotes (for example, <i>Clostridium</i>) and protists; fungi; animals; some plants

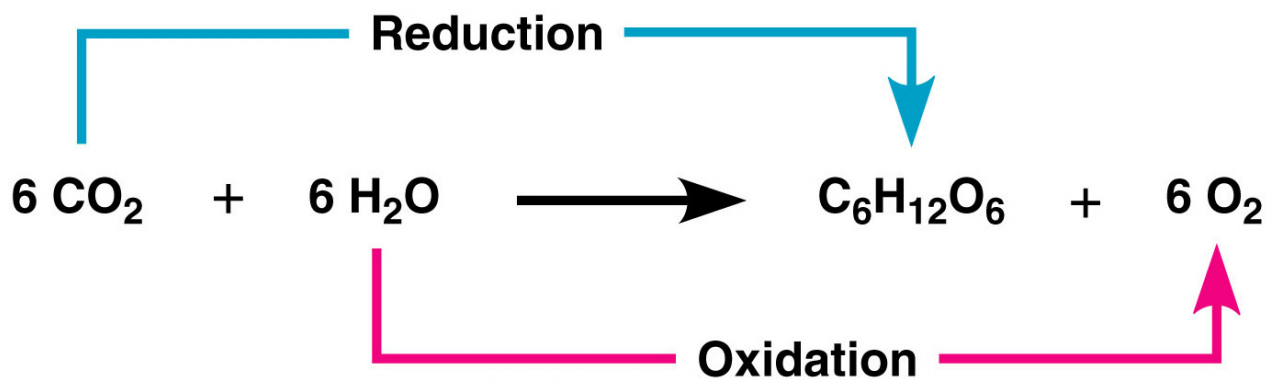
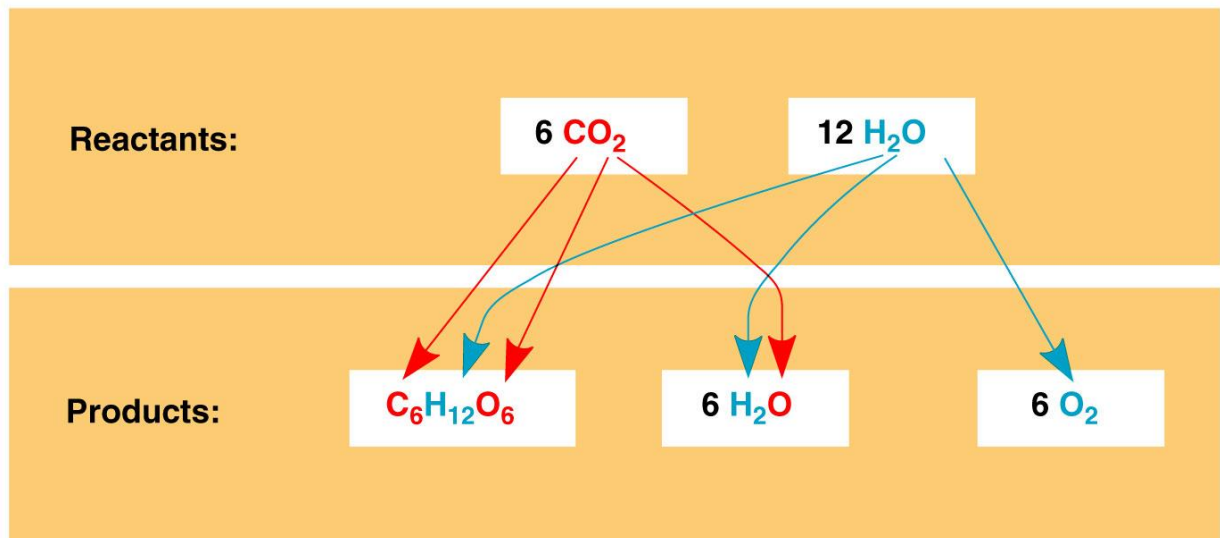
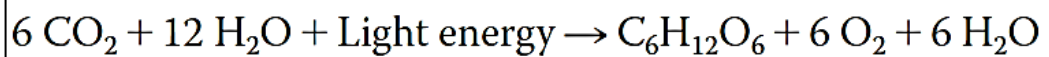
การค้นคว้าเกี่ยวกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

พื้นฐาน

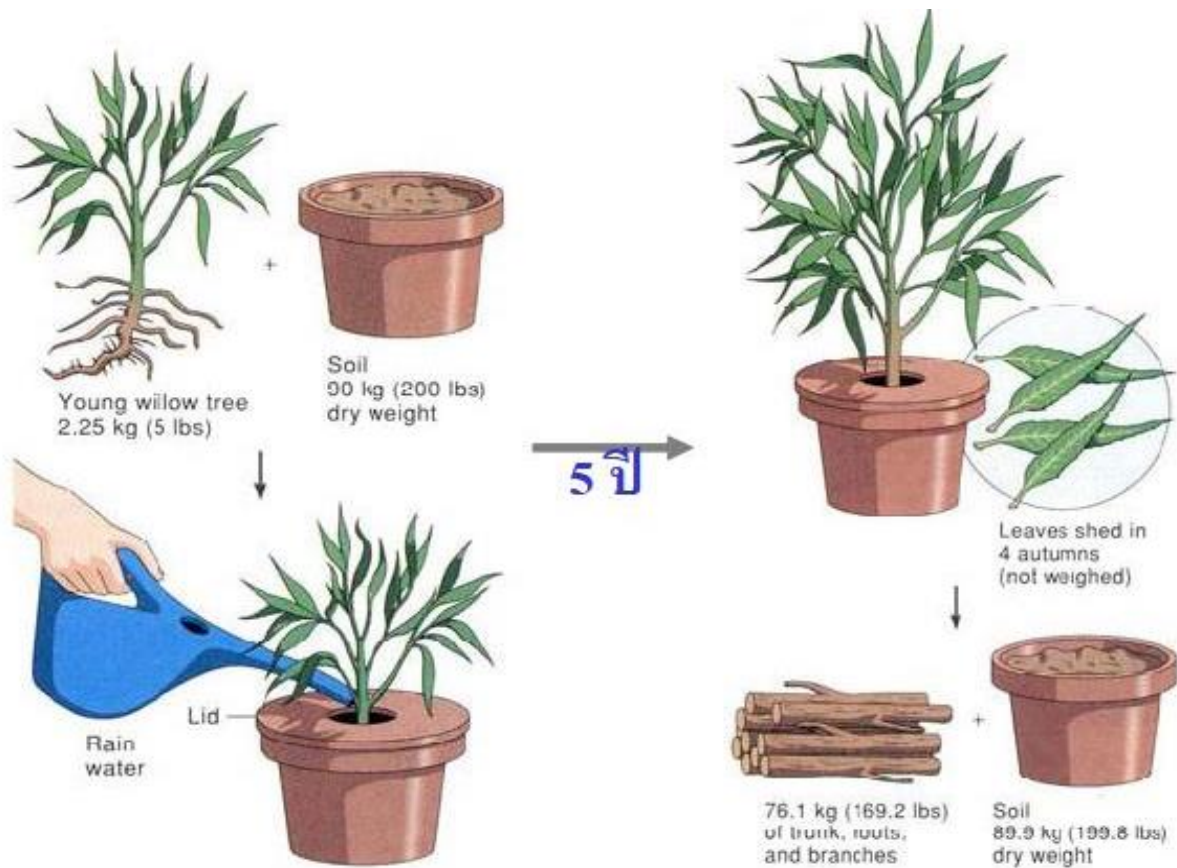
การสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) เป็นปฏิกิริยา ดูดพลังงาน (Endergonic reaction)

- สารตั้งต้น (Substrate/Reactant) คือ.....
- สารผลิตภัณฑ์ (Product) คือ.....
- เป็นการเปลี่ยน.....เป็น.....

สมการ



❖ Jean Baptiste Van Helmont นักวิทยาศาสตร์ชาวเบลเยียม

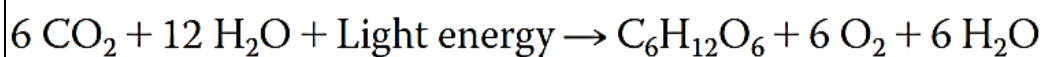


การทดลอง

- ปลุกต้นหลิวหนัก 5 ปอนด์ในถังใบใหญ่ที่บรรจุดินซึ่งทำให้แห้งสนิทหนัก 200 ปอนด์
- ปิดฝาถังระหว่างทำการทดลองได้รดน้ำต้นหลิวที่ปลูกไว้ทุกๆ วันด้วยน้ำฝนเป็นระยะเวลา 5 ปี
- ต้นหลิวเจริญเติบโตขึ้นมาก เมื่อนำต้นหลิวที่ไม่มีดินติดอยู่ที่รากไปชั่งน้ำหนัก ปรากฏว่าต้นหลิวหนัก 169 ปอนด์ 3 ออนซ์ (ตัวเลขนี้ไม่ได้รวมน้ำหนักใบซึ่งร่วงไปแต่ละปี) และเมื่อนำดินในถังไปทำให้แห้งแล้วนำไปชั่งปรากฏว่ามีน้ำหนักน้อยกว่าดินที่ใช้ก่อนทำการทดลองเพียง 2 ออนซ์เท่านั้น

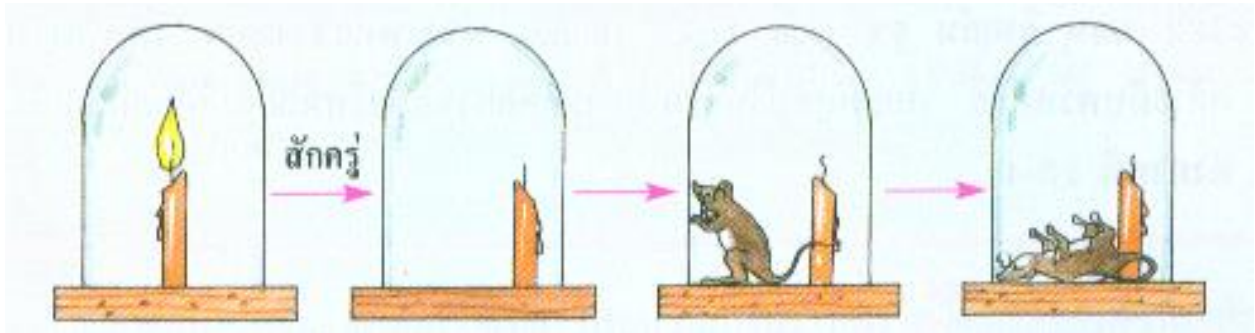
สรุปผลการทดลอง

- น้ำหนักของต้นหลิวที่เพิ่มขึ้น มาจาก **น้ำ** รวมทั้ง แร่ธาตุต่างๆ ในดิน (โดยที่ยังไม่ทราบว่ามีพืชต้องใช้ CO_2 ในการสังเคราะห์ด้วยแสง)
- ดังนั้น **น้ำ** เป็นสารตั้งต้นพืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

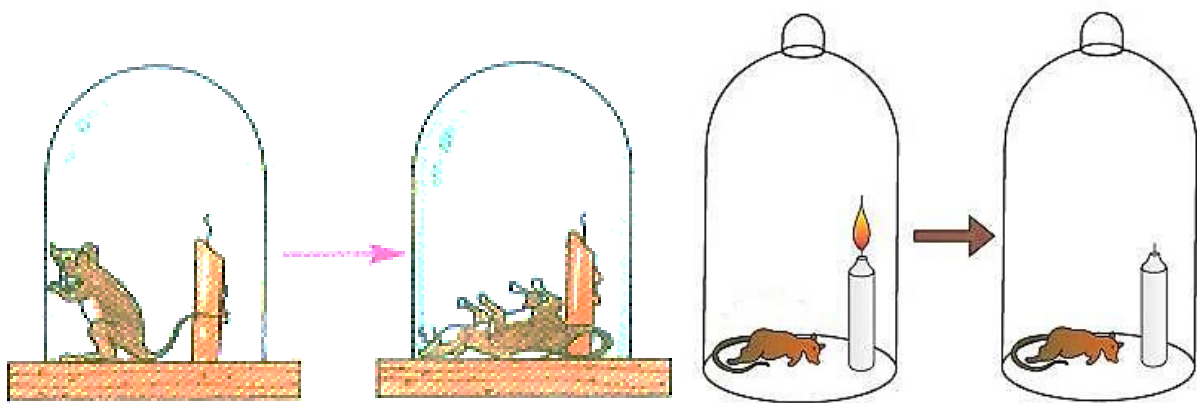


❖ โจเซฟ พริสต์ลีย์ (Joseph Priestley) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ

การทดลองที่ 1



a.



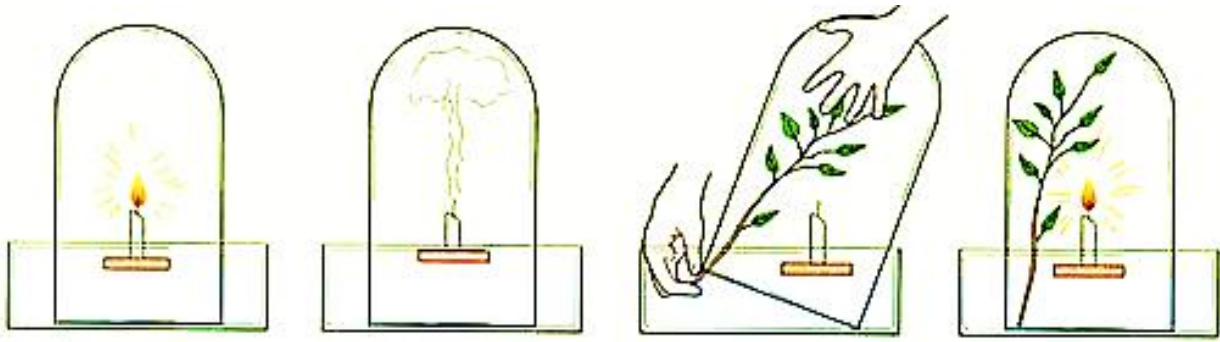
b.

a) จุดเทียนไขไว้ในครอบแก้ว สักรุ่นเทียนไขดับ และเมื่อนำหนูที่มีชีวิตไปไว้ในครอบแก้วเดิมที่เทียนไขดับปรากฏว่าหนูตายเกือบทันที

b) ใส่หนูเข้าไปในครอบแก้ว ต่อมาหนูตาย และเมื่อจุดเทียนไขในครอบแก้วเดิมที่หนูตายอยู่แล้วปรากฏว่าเทียนไขดับเกือบทันที

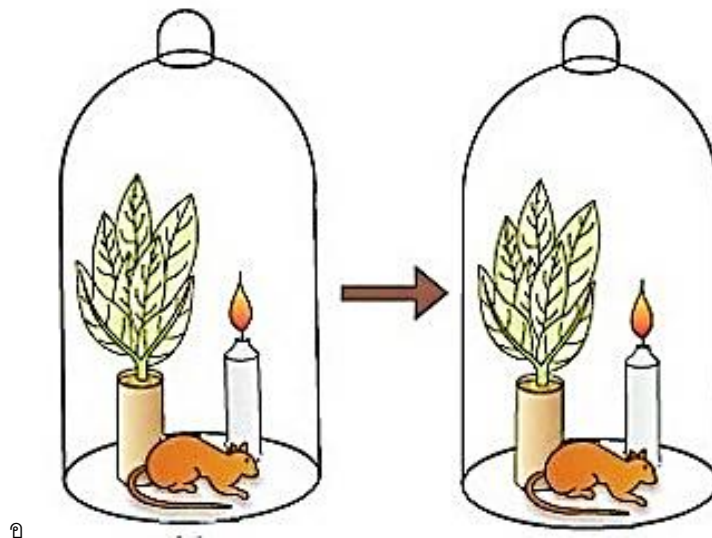
สรุป อากาศที่หนูหายใจออกมาและที่ทำให้เทียนไขดับ เรียกว่า "อากาศเสีย" (ภายหลังทราบ คือ CO_2)

การทดลองที่ 2



c.

- c) นำพืชสีเขียวใส่ในครอบแก้วที่เคยจุดเทียนไขทิ้งไว้ 10 วัน พบว่า จุดเทียนไขขึ้นมาใหม่ได้ระยะหนึ่ง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ต้นไม้ก็ตาย



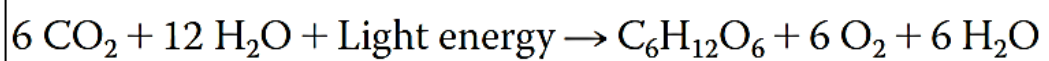
ด

d.

- d) นำหนูใส่ไว้ในครอบแก้วเดียวกันกับพืชสีเขียว ปรากฏว่า พืชและหนูสามารถมีชีวิตอยู่ได้

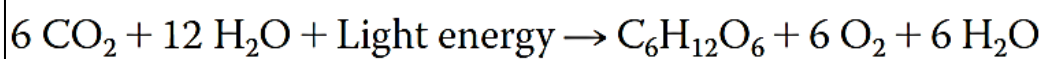
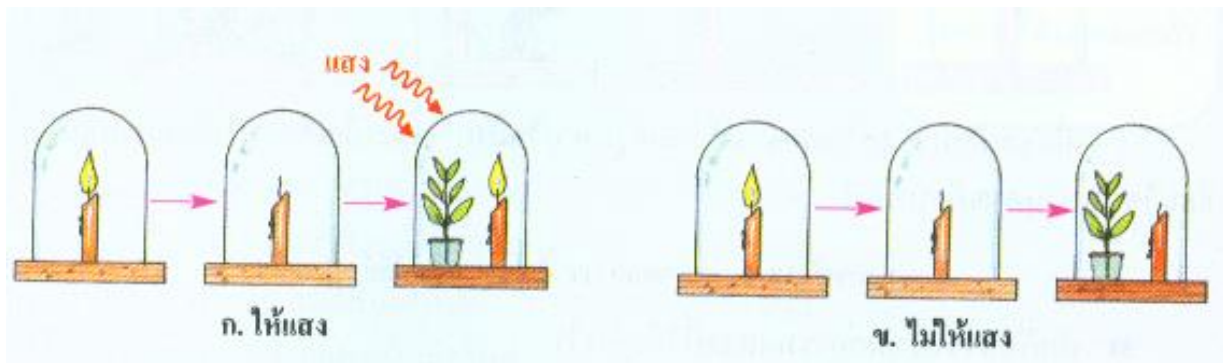
สรุป

- พืชสามารถเปลี่ยน “อากาศเสีย” ให้เป็น “อากาศดี” ได้ (เปลี่ยน CO_2 เป็น O_2)
- พืชใช้ CO_2 เป็นสารตั้งต้น (Substrate) และได้ O_2 เป็นผลิตภัณฑ์ (Product)



❖ **แจน อินเกิน ฮูซ (Jan Ingen Housz)** นายแพทย์ชาวดัตช์ (ฮอลันดา)

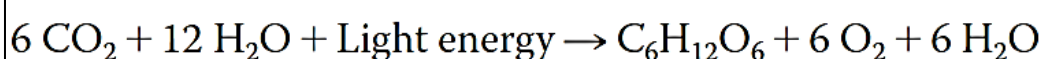
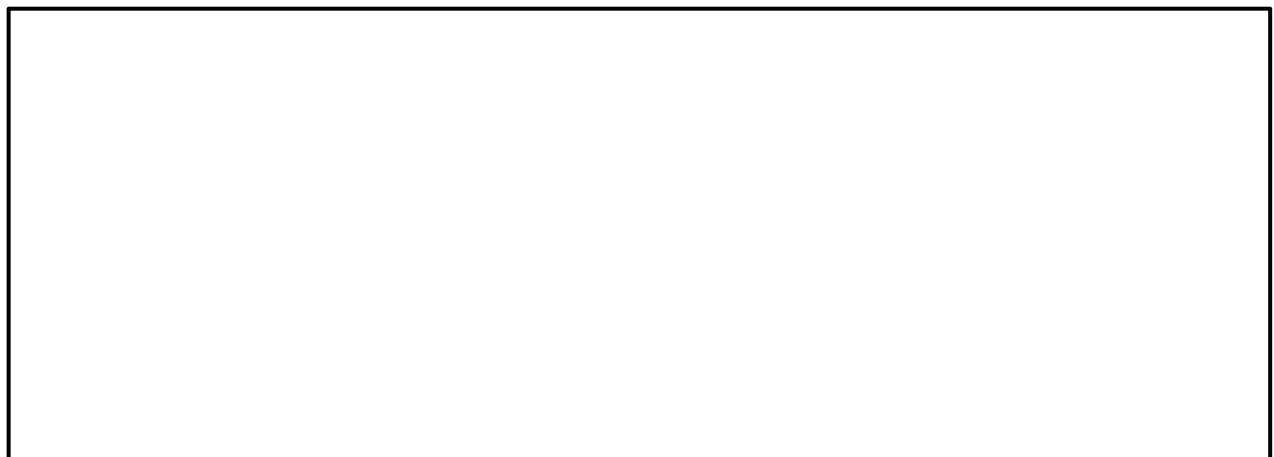
- สนับสนุนการทดลองของ Joseph Priestley
- พืชจะเปลี่ยน "อากาศเสีย : CO_2 " เป็น "อากาศดี : O_2 " ได้เมื่อพืชได้รับ แสง
- นอกจากนั้นยังพบว่า พืชจะเก็บสะสม CO_2 ไว้ในรูปของสารอินทรีย์ ได้ด้วย



❖ **นิโกลาส ธีโอดอร์ เดอ ซาซัวร์ (Nicolas Theodore de Saussure)**

- ศึกษาเช่นเดียวกับ Jan Ingen Housz
- อธิบายเพิ่มเติม คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาจาก CO_2 และ H_2O

แผนภาพการศึกษาของ Nicolas Theodore de Saussure

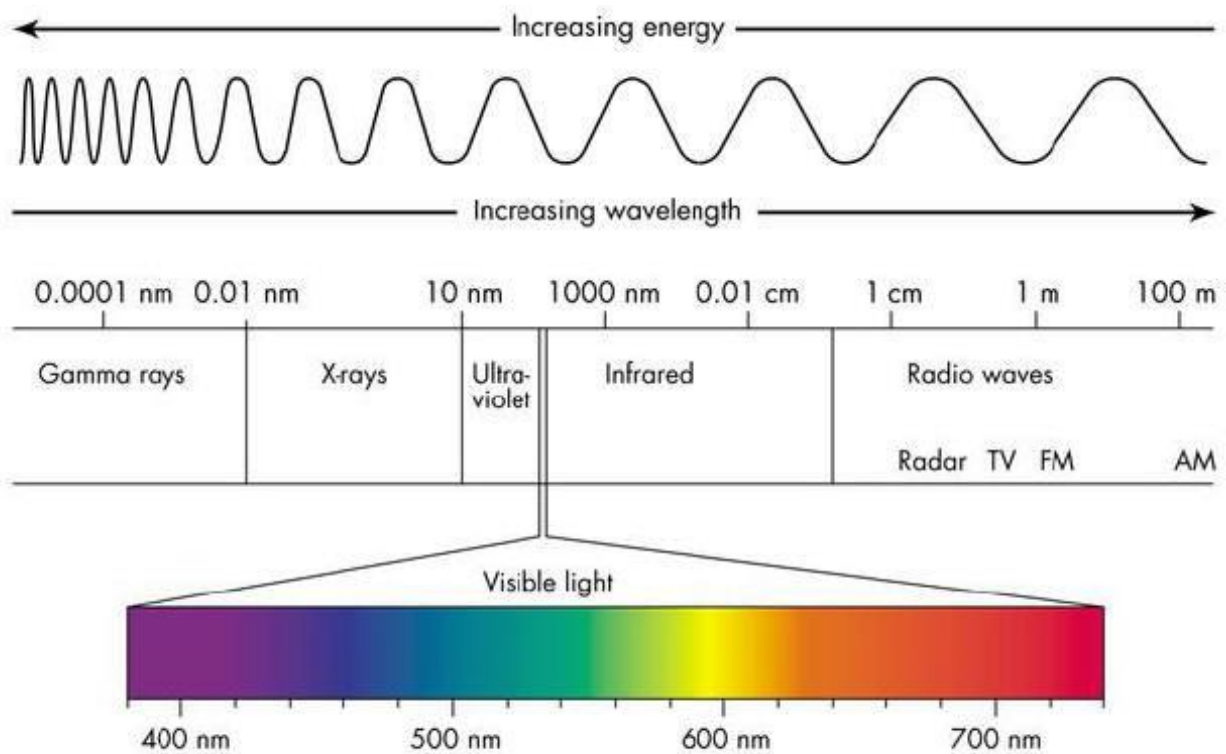


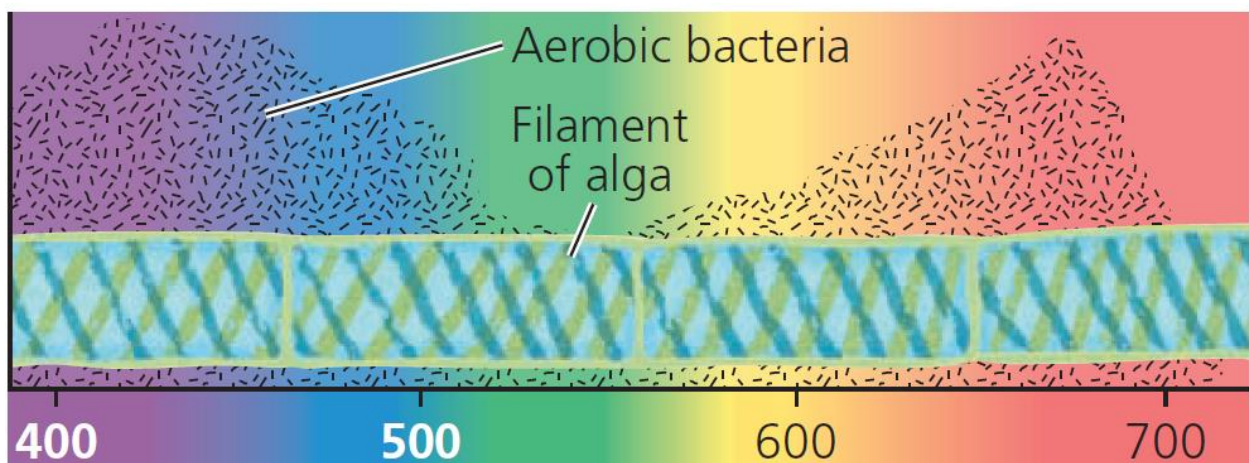
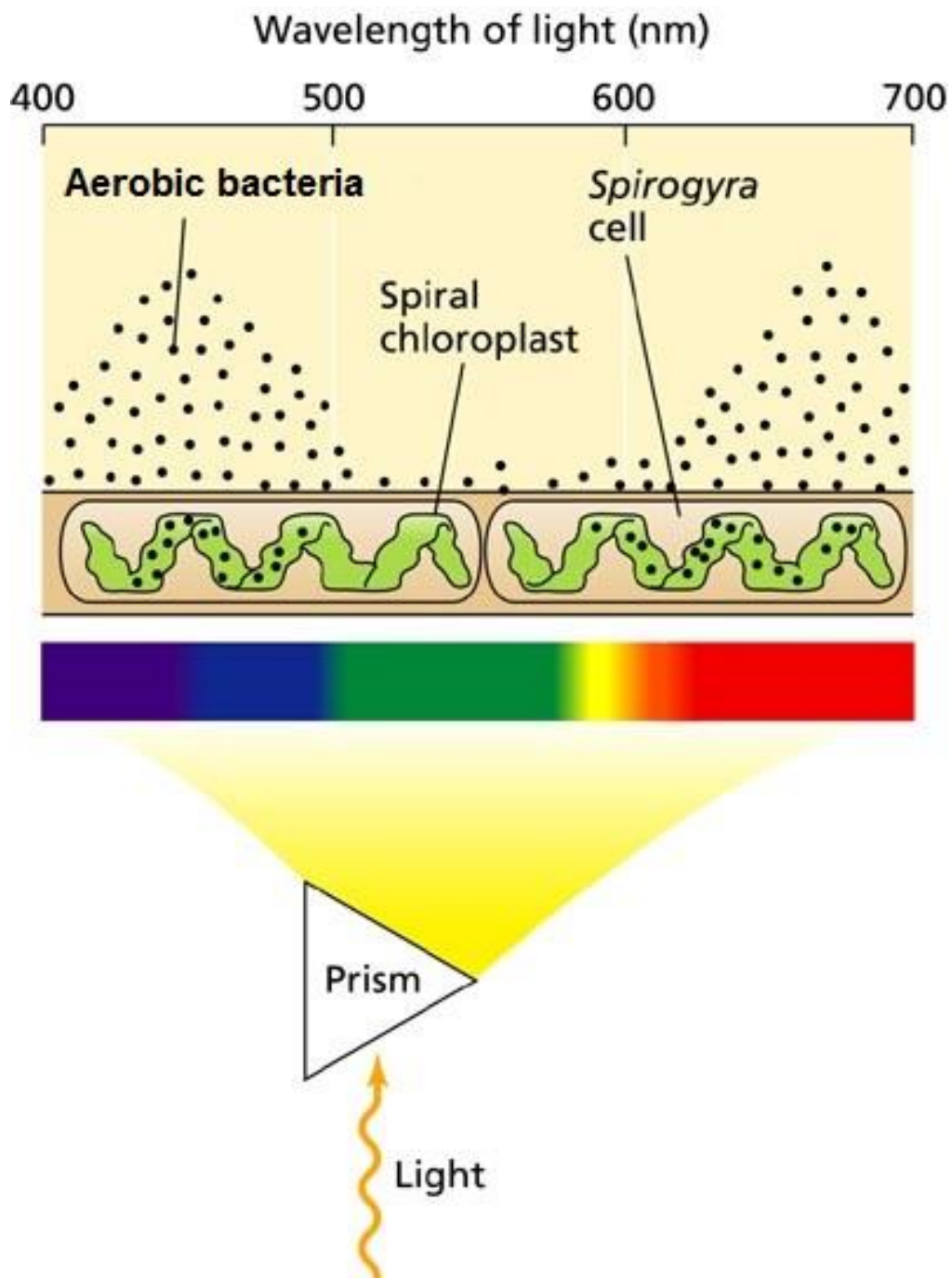
❖ เองเกลมันน์ (Wilhelm Engelmann)

- การสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นที่โครงสร้างภายในเซลล์พืช ที่เรียกว่า *Chloroplast*
- การทดลองใช้แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) ในการเจริญเติบโตเป็นตัวทดสอบ
- เลี้ยง Aerobic bacteria ร่วมกับสาหร่ายสไปโรไจรา (Spirogyra) ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้
- วัดปริมาณออกซิเจนที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายโดยใช้แสงสีต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแสงขาว (Visible light) : สีรุ้ง

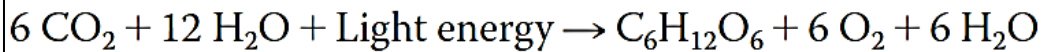
สรุป

แสงที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และปล่อยออกซิเจนออกมาน้อย คือ **แสงสีเขียว**

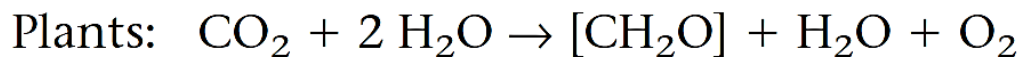
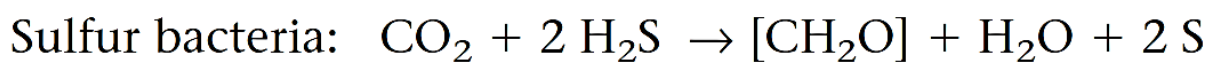




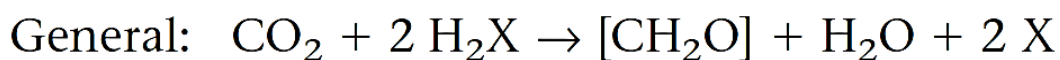
❖ แวน นีล (Van Niel)



- เสนอสมการเคมีของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยทดลองกับ Sulfur bacteria
- พบว่าแบคทีเรียบางชนิด (Green sulfur bacteria/Purple sulfur bacteria) สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้โดย ไม่ใช้น้ำ (H_2O) แต่ใช้ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แทนได้
- ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ซัลเฟอร์ (S) ออกมาแทน O_2 แสดงว่าซัลเฟอร์ที่ได้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์

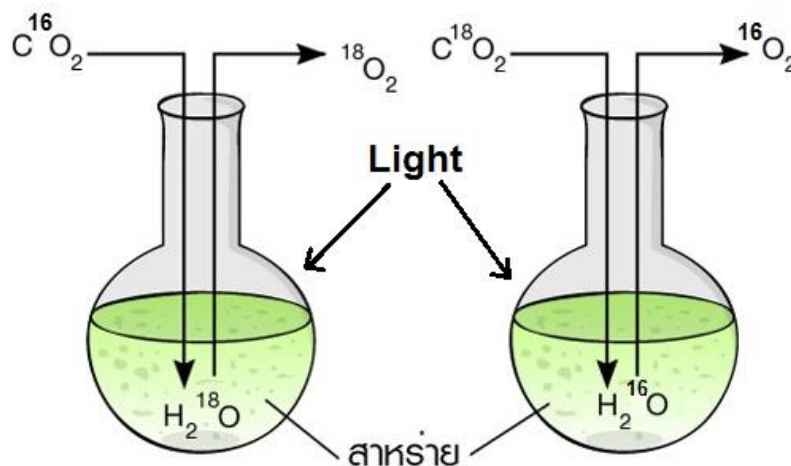


- ดังนั้นการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) จึงไม่จำเป็นต้องเกิด O_2 เสมอไป
- สมการ

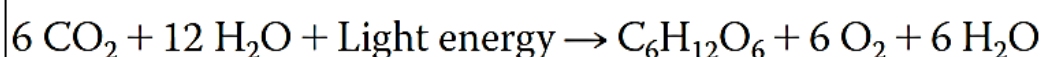


❖ แซม รูเบน (Sam Ruben) และมาร์ติน คาเมน (Martin Kamen)

- เป็นการทดลองต่อจาก Van Niel เพื่อพิสูจน์ว่า O_2 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ มาจาก H_2O
- ทดลองโดยติดฉลากออกซิเจนที่เป็นกัมมันตรังสีไอโซโทป-18 (^{18}O)
- ^{18}O ไม่พบ เป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์

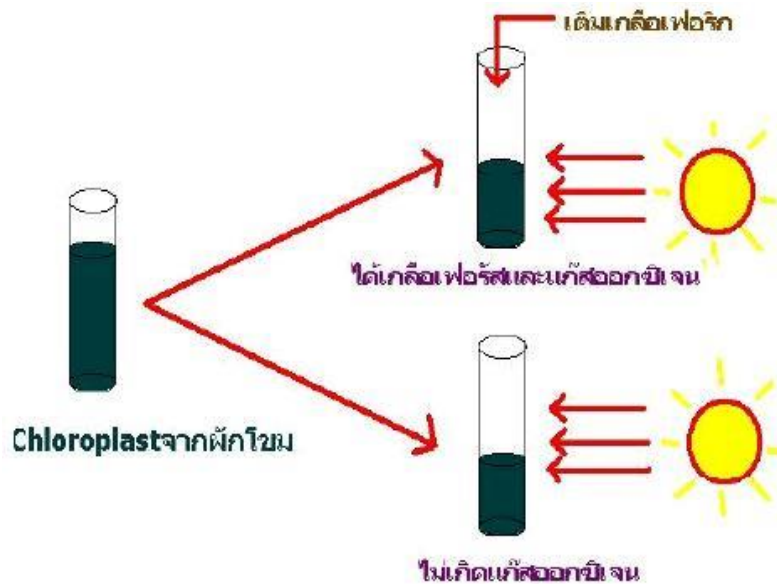


สมการการแตกตัวของน้ำ (H_2O)



❖ **โรบิน ฮิลล์ (Robin Hill) :** ค้นพบการแตกตัวของน้ำ (H_2O) แล้วเกิด O_2

- เพื่อพิสูจน์ว่า น้ำจะแตกตัวแล้วเกิด O_2 ได้นั้น จะต้องมิตัวรับอิเล็กตรอน
- ทดลองโดยการ สกัด chloroplast จากผักโขมและผสมกับน้ำ แล้วแบ่งใส่หลอดทดลอง 2 หลอด
 - หลอดที่ 1 เติมเกลือ Ferric (Fe^{3+}) เกิดเกลือ Ferrus (Fe^{2+}) และ O_2
 - หลอดที่ 2 ไม่เติมเกลือ Ferric (Fe^{3+}) ไม่เกิด O_2



สมการ

- เกลือ Ferric (Fe^{3+}) เปลี่ยนเป็น เกลือ Ferrus (Fe^{2+}) เพราะรับอิเล็กตรอนจากน้ำซึ่งแตกตัวได้ ซึ่งเกิดเมื่อมีคลอโรพลาสต์กับแสง
- เกลือ Ferric (Fe^{3+}) ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (สารที่รับอิเล็กตรอน)
- ในพืชจะใช้ Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate : $NADP^+$

สมการ

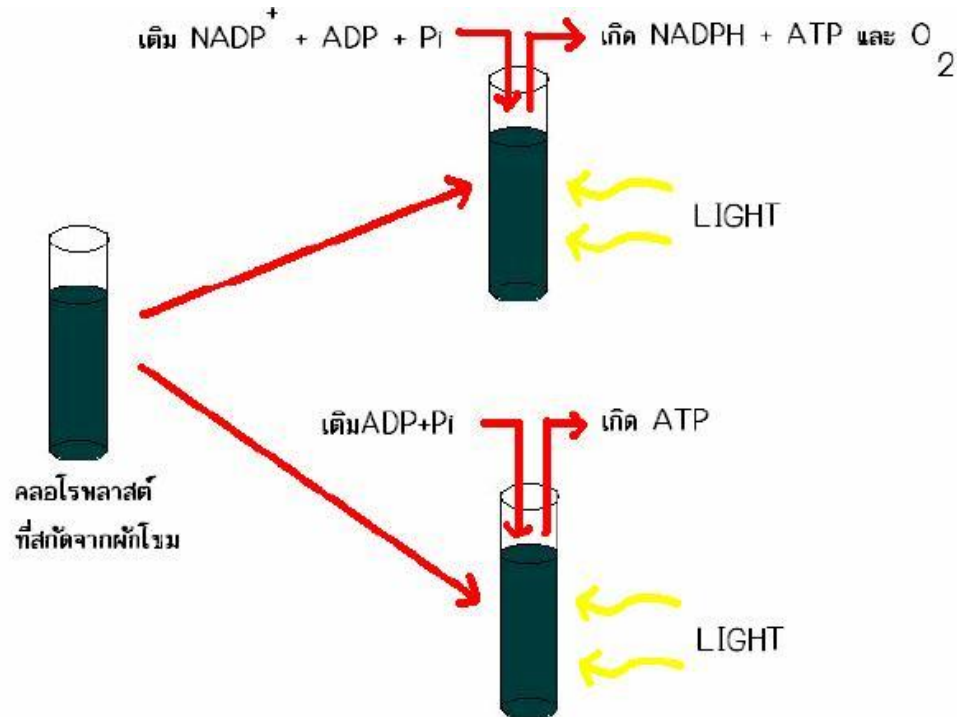
- จากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อ Chloroplast ได้รับพลังงานแสง และมีสารรับอิเล็กตรอนอยู่ด้วย น้ำจะแตกตัวให้ O_2 ได้ (ไม่จำเป็นต้องมี CO_2)

*******ถ้าไม่มีตัวรับ e^- น้ำจะไม่สามารถแตกตัวได้*******

❖ แดเนียล อาร์นอน (Daniel Arnon)

- ทำการทดลองเพื่อติดตามขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง
- ใช้ Chloroplast ที่สกัดจากผักโขม ผสมกับน้ำ (H_2O)

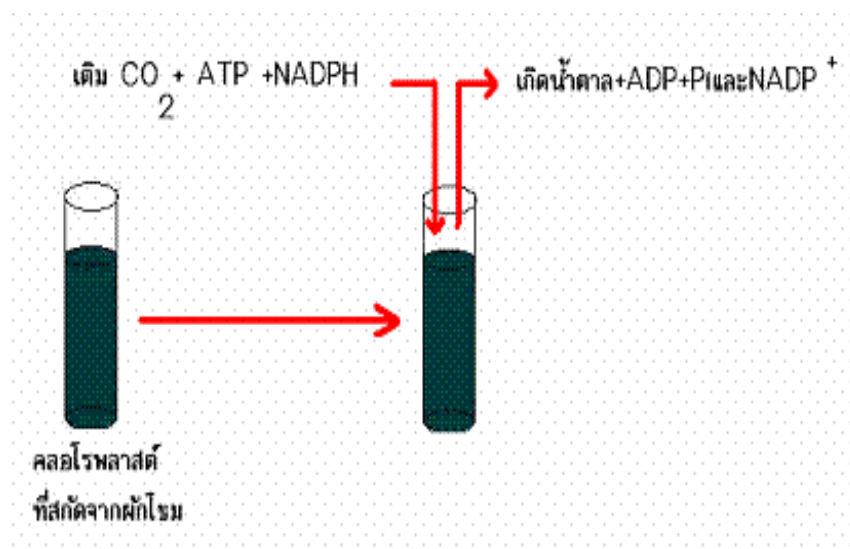
การทดลองที่ 1



สรุป

- การสังเคราะห์แสงของพืชจะให้ O_2 และ $NADPH+H^+$ ต้องมีสารตั้งต้นเป็น.....
- การเกิด ATP ต้องมีสารตั้งต้นเป็น.....

การทดลองที่ 2



- การสังเคราะห์น้ำตาล ต้องอาศัย.....

ตารางการทดลอง

การทดลอง สารที่ใช้	1	2	3	4	5	6
ADP	+	+	+	+	+	ATP
Pi	+	+	+	+	+	+
NADP ⁺	-	-	+	+	+	NADPH
Chloroplast	+	+	+	+	+	+
CO ₂	-	-	-	-	+	+
H ₂ O	+	+	+	+	+	+
แสง	-	+	-	+	+	-
ผลลัพธ์						

สรุป กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis)

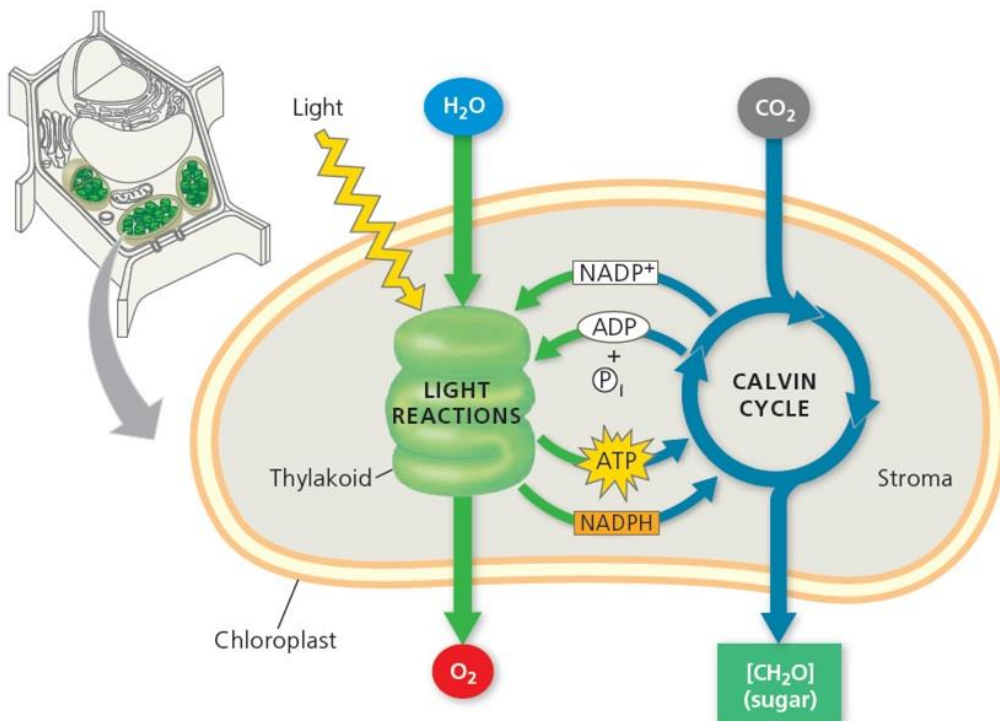
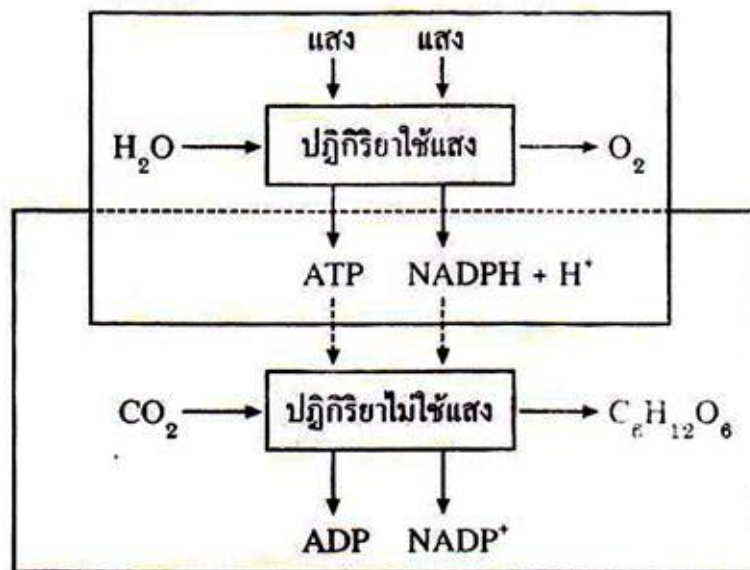
- เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นใน Organelle คือ.....
- แบ่งเป็น 2 ปฏิกิริยา

○ ปฏิกิริยาแสง/ใช้แสง (Light reaction)

- สารตั้งต้น.....
- สารผลิตภัณฑ์.....

○ ปฏิกิริยาตรึง CO_2 (CO_2 fixation) / ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอน (C fixation) / Dark reaction

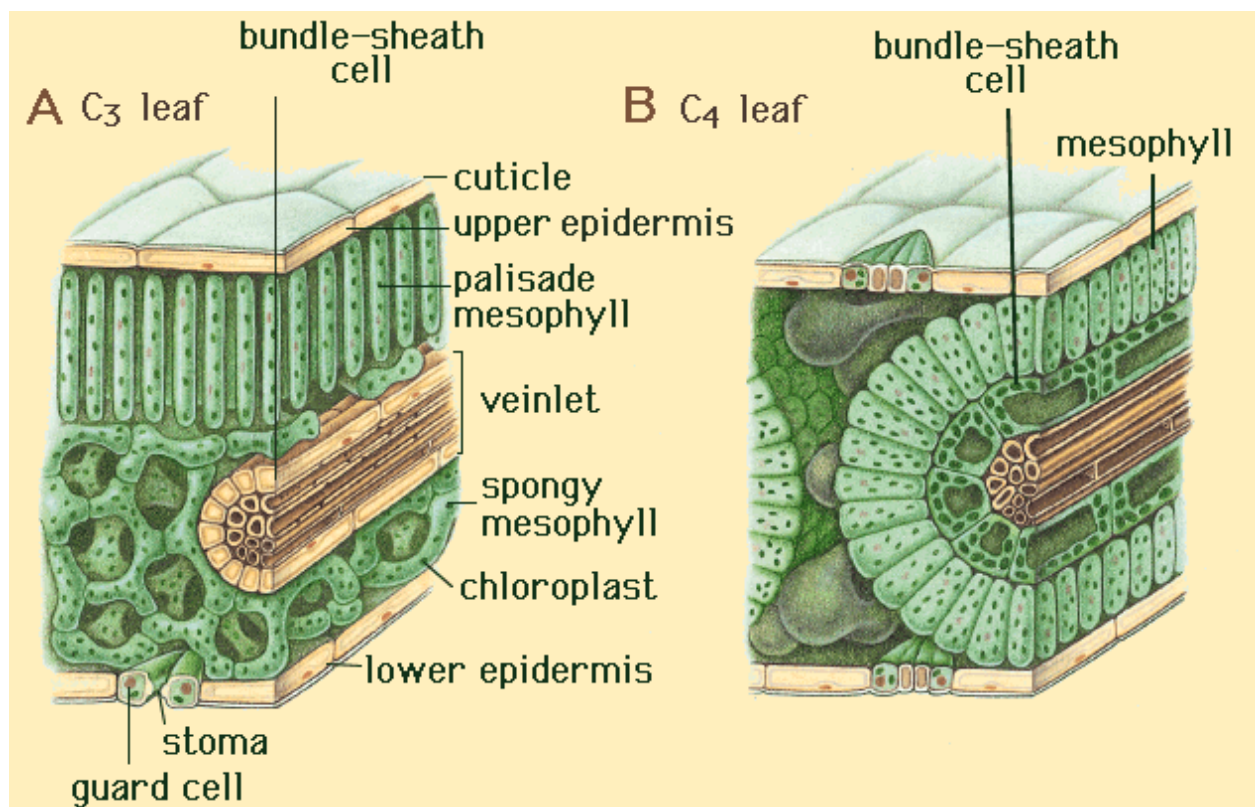
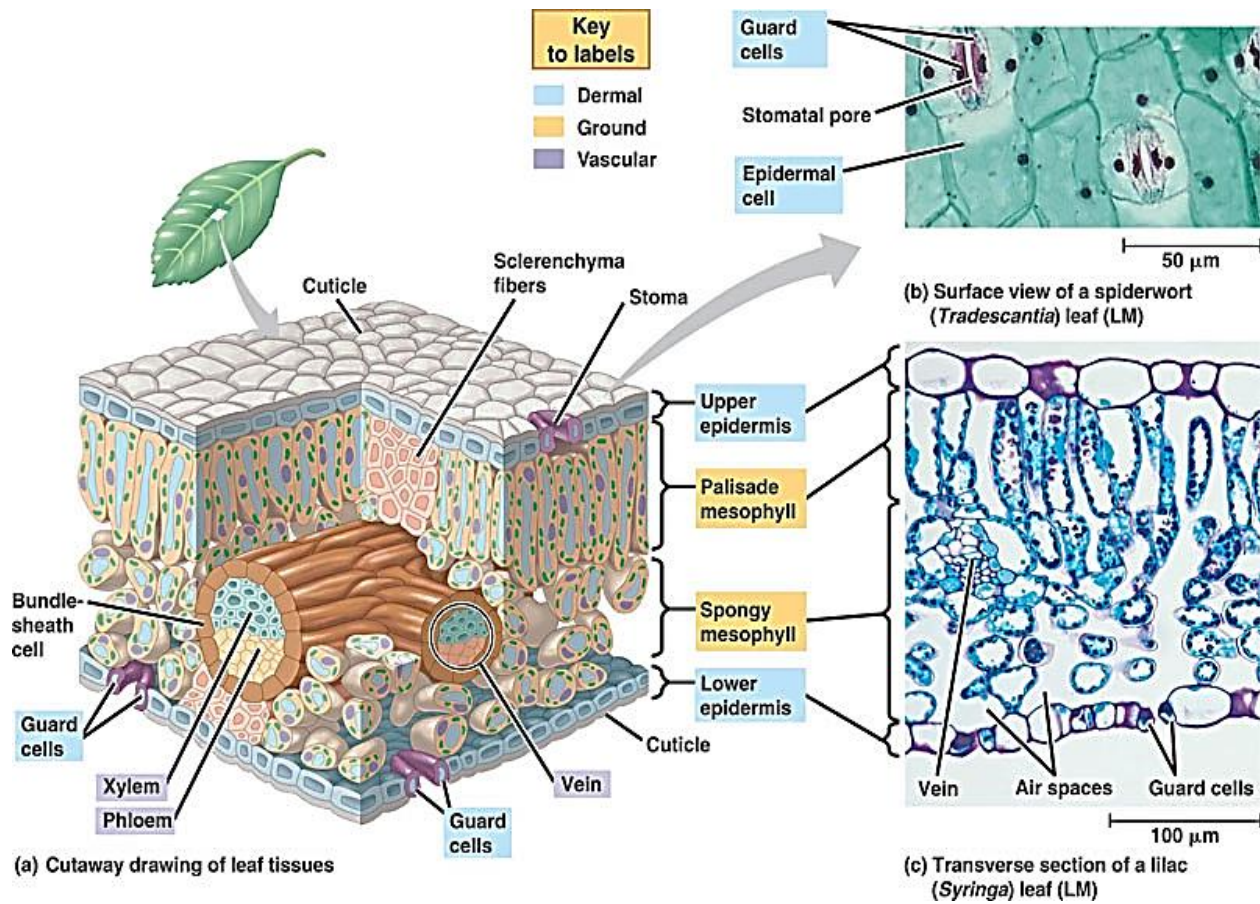
- สารตั้งต้น.....
- สารผลิตภัณฑ์.....



2. โครงสร้างภายในของใบ และ Chloroplast

โครงสร้างภายในของใบ

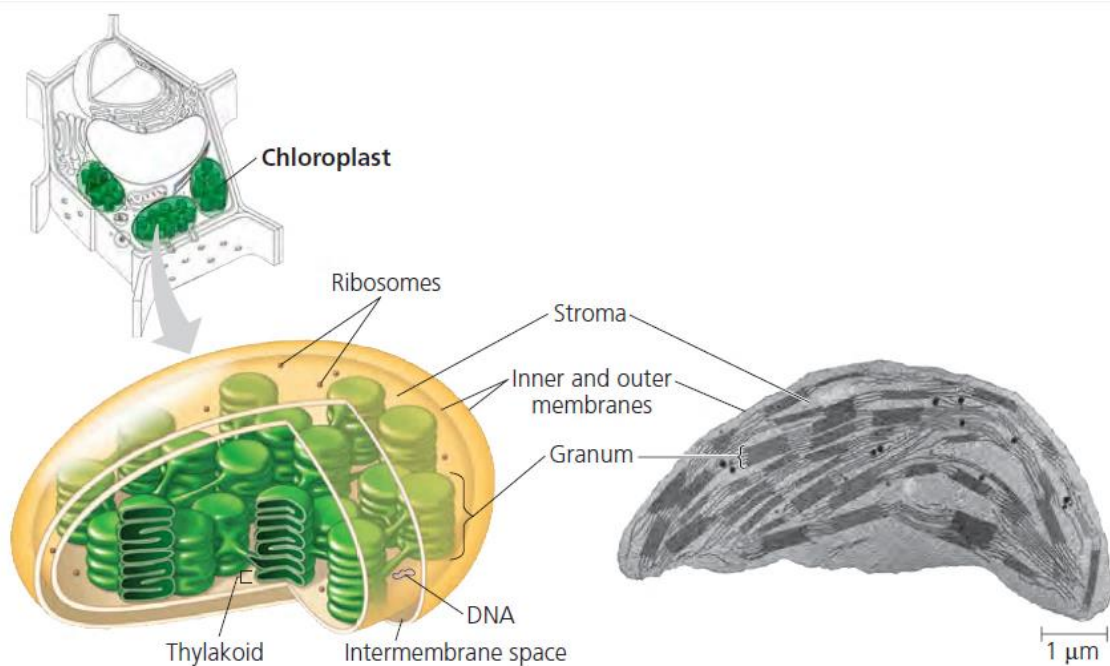
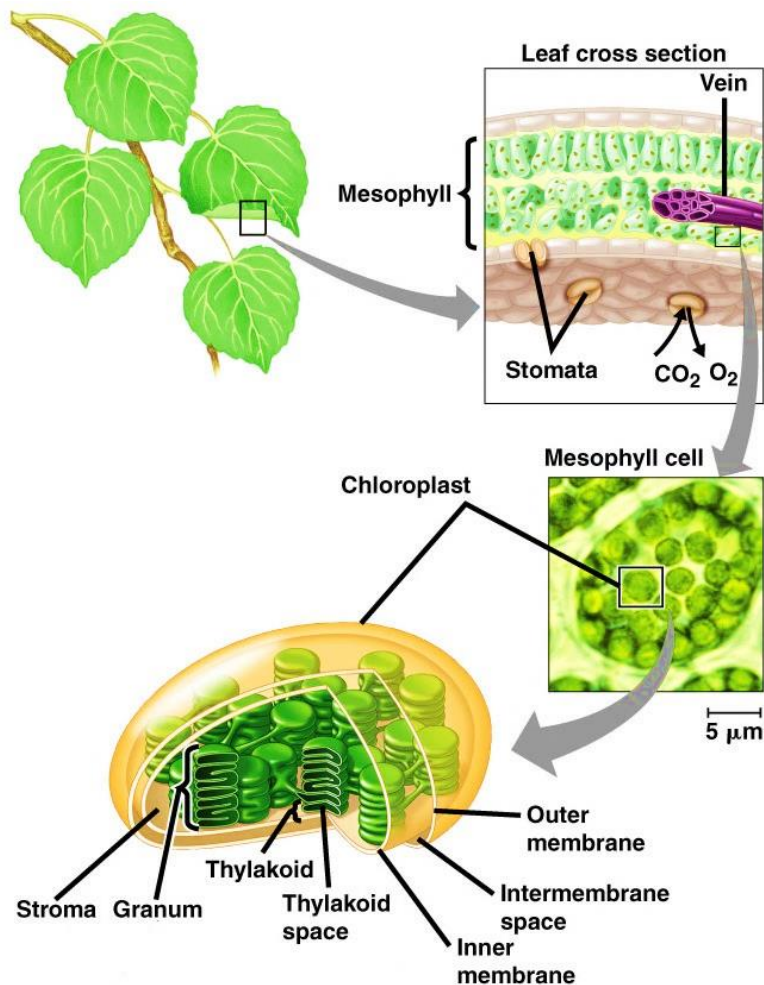
- 1) **Epidermis** = Upper epidermis + Lower epidermis
 - อยู่ชั้นนอกสุด ซึ่งเรียงตัวเป็นชั้นเดียว ไม่มี chloroplast ยกเว้น **เซลล์คุม (guard cell)**
 - มี cuticle มาเคลือบเพื่อป้องกันการคายน้ำ โดยเฉพาะด้านหลังใบ (Upper epidermis)
- 2) **Mesophyll (เนื้อใบ)** เป็นเนื้อเยื่อประเภท.....เรียกว่า.....
 - Palisade mesophyll (palisade = รั้วบ้าน) เป็นที่**เกิดการสังเคราะห์ด้วยแสงมากและดี**
 - Spongy mesophyll (spongy = ฟองน้ำ) เป็นที่อยู่กันอย่างหลวมๆ เหมาะแก่การแลกเปลี่ยนก๊าซ
 - การเรียงตัวของ mesophyll ในพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน
 - พืช C_3 จะมีการเรียงตัวของ palisade อยู่ด้านหลังใบ และ spongy อยู่ด้านท้องใบ
 - พืช C_4 จะเรียงตัวกันแน่น ไม่สามารถแยกได้ว่าส่วนใดเป็น palisade หรือ spongy
- 3) **Bundle sheath cell** (เป็นกลุ่มเซลล์ที่อยู่รอบท่อลำเลียง)
 - พืช C_3 **พบหรือไม่พบก็ได้** แต่ถ้าพบจะ **ไม่มีการสะสม Chloroplast**
 - พืช C_4 **พบ** และมีการ**สะสม Chloroplast (Kranz type)**
- 4) **ตัวอย่างพืช**
 - พืช C_3 พืชทั่วไป เช่น ข้าว, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวสาลี, ข้าวโอ๊ต
 - พืช C_4 อ้อย, ข้าวฟ่าง, ข้าวโพด, หญ้าคา, หญ้าขน, หญ้าแห้วหมู, หญ้าแพรง, หญ้าจรรยา, ลูกเดือย, ผักโขมจีน, บานไม่รู้โรย
- 5) **Vascular bundle (ท่อลำเลียง)** จะอยู่บริเวณเส้นใบ (vein)
 - จะมี phloem ใช้ในการลำเลียงอาหาร และ xylem ใช้ในการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ
 - Xylem อยู่ด้านหลังใบ และ Phloem อยู่ด้านท้องใบ
 - พืชใบเลี้ยงเดี่ยว จะขนานกันทั้งหมด
 - พืชใบเลี้ยงคู่ จะมีการกระจายตัวไม่ขนานกัน

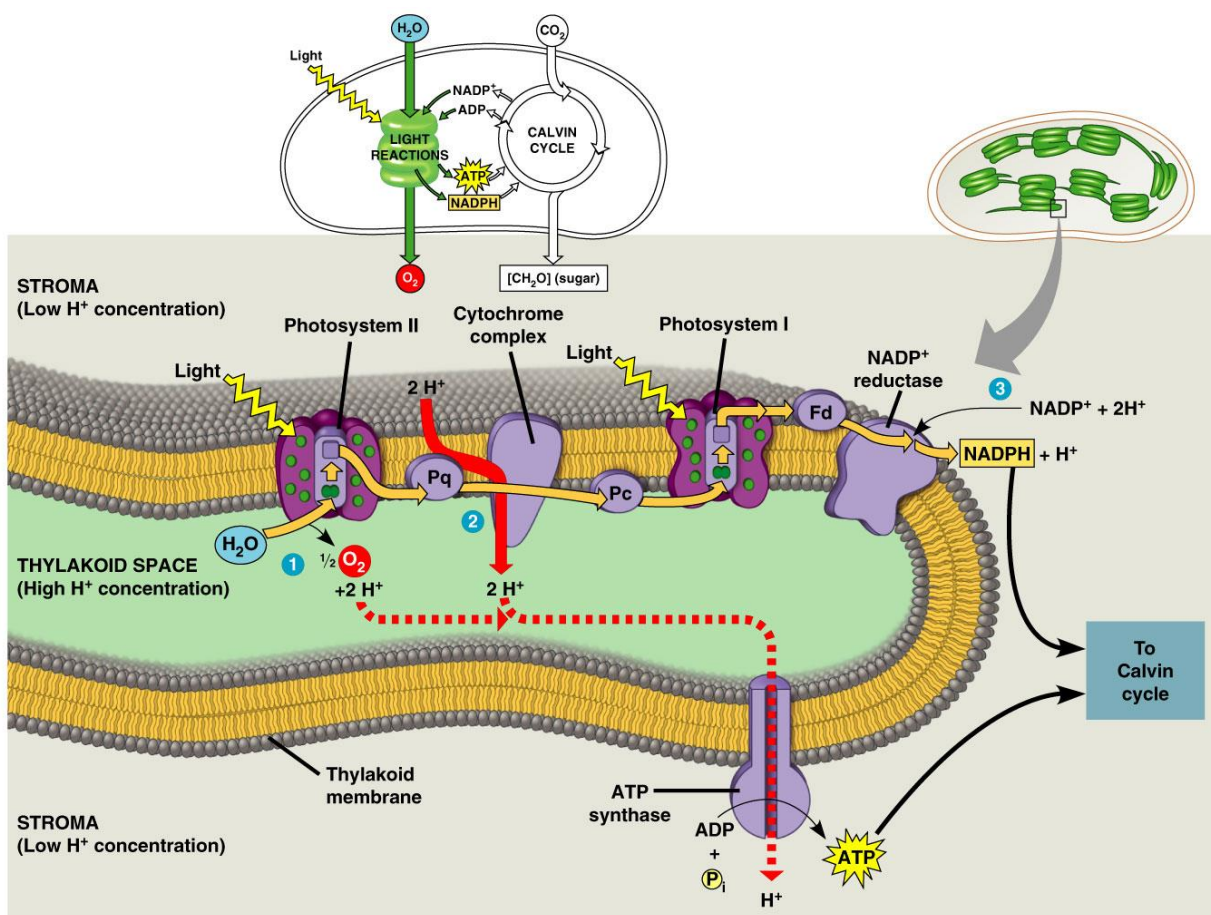
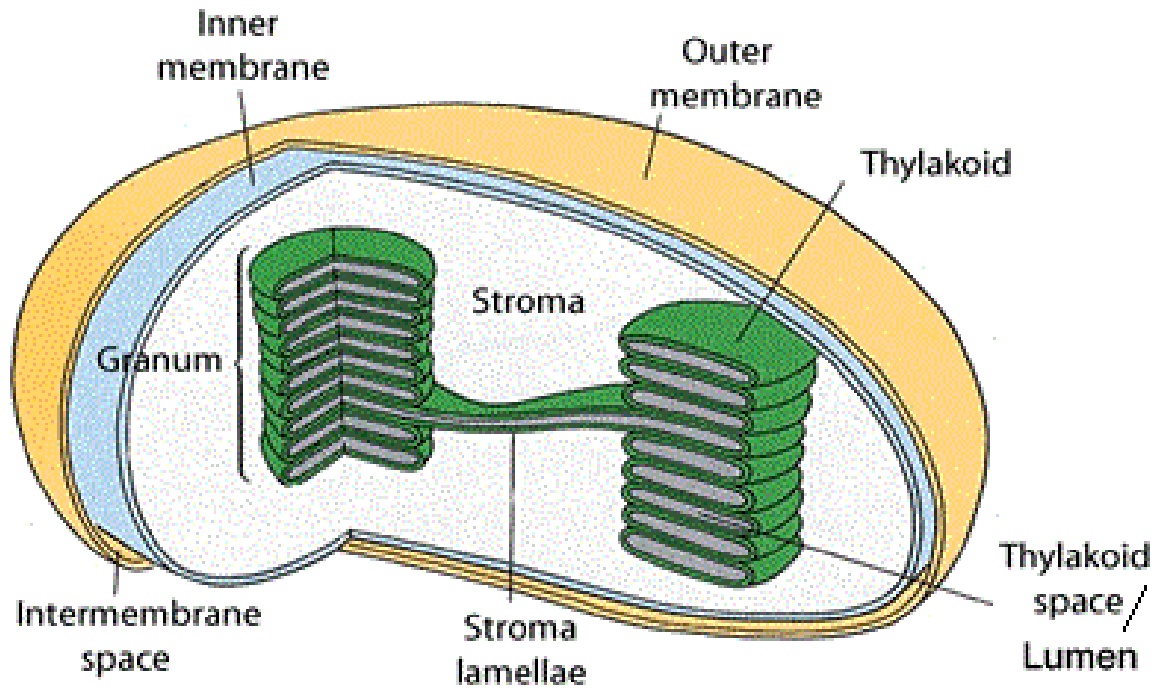


Kranz anatomy

โครงสร้าง Chloroplast

- เป็นออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น
- พบในเซลล์พืชและสาหร่ายทั่วไป ยกเว้น พวก Monera และสัตว์
- มี DNA และ RNA เป็นของตัวเอง ทำให้เพิ่มจำนวน และมี Ribosome (70s) สังเคราะห์โปรตีนได้

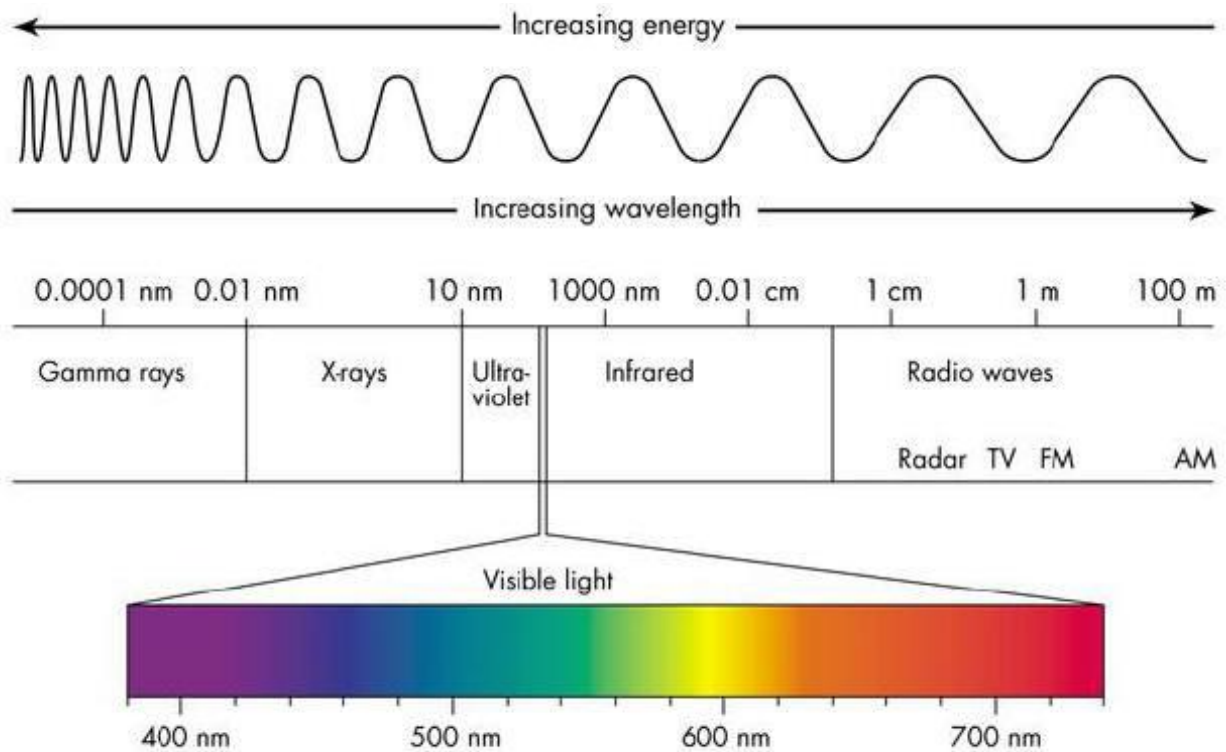




3. รงควัตถุ (Pigment) ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

- สารสี/รงควัตถุ (Pigment) เป็นตัวดูดกลืนพลังงานแสงในช่วง **แสงขาว (visible light)** เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (*ปัจจัยสำคัญที่ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง*)
- แสงขาว (visible light) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400–700 nm
- รงควัตถุพบที่
 - Eukaryote จะอยู่ใน chloroplast โดยฝังตัวอยู่ในกลุ่มโปรตีนบนเยื่อ **Thylakoid membrane**
 - Prokaryote จะอยู่บน **Mesosome/Photosynthetic lamella** ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)

Visible light



Shorter wavelength → Longer wavelength
Higher energy → Lower energy

ประเภทของรงควัตถุ (Pigment)

➤ คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)

- มีบทบาทมากที่สุดในการสังเคราะห์ด้วยแสง และดูดพลังงานแสงเขียวได้น้อย (สะท้อนแสงเขียว)
- มี 4 ชนิด คือ a, b, c, d
- มี *Mg* และ *N* เป็นองค์ประกอบสำคัญ

➤ แคโรทีนอยด์ (Carotenoid)

- เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากแสงได้
- มี 2 ชนิด
 - Carotene มีสีส้มแดง
 - Xanthophyll มีสีเหลืองน้ำตาล

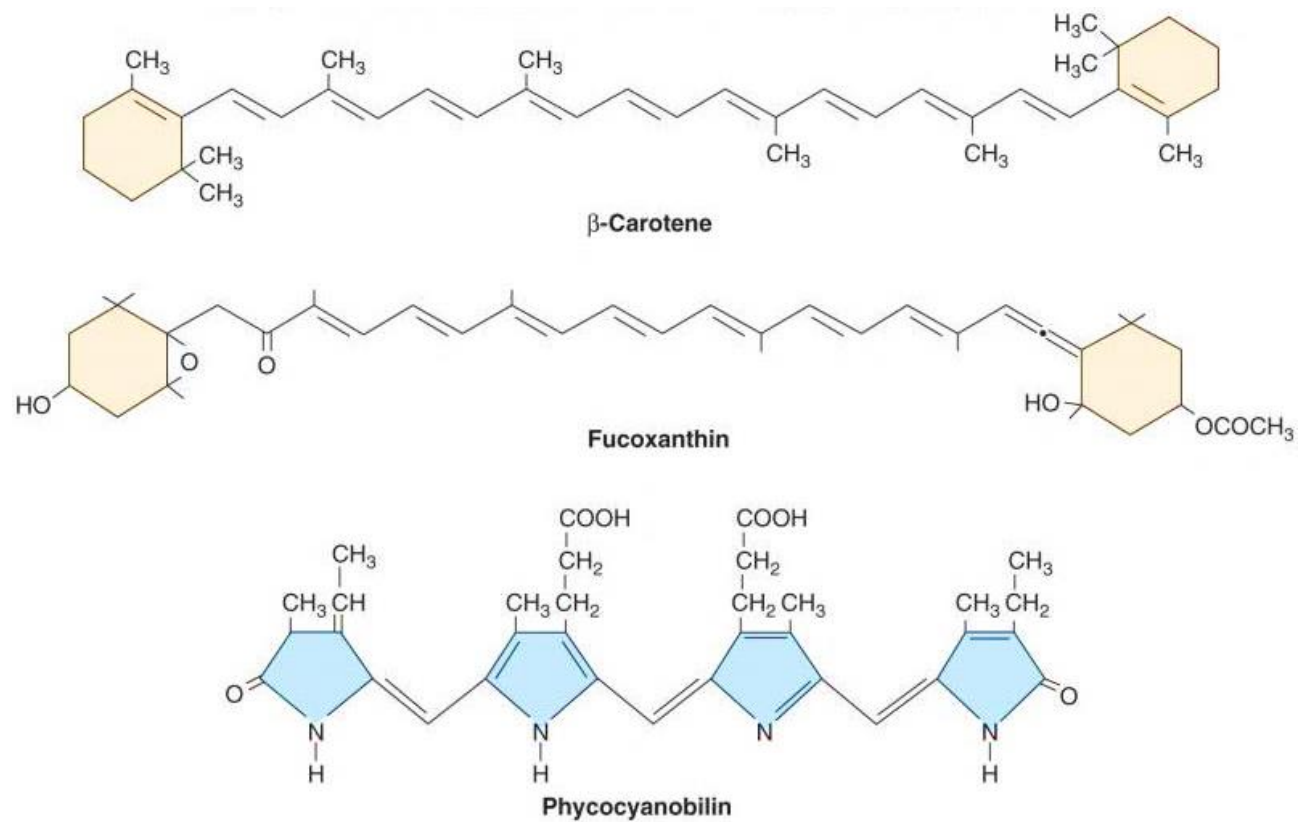
➤ ไฟโคบิลิน (Phycobilin) มี 2 ชนิด

- Phycoerythrin มีสีแดงแกมน้ำตาล
- Phycocyanin มีสีเขียวแกมน้ำเงิน

➤ แบคทีริโอคลอโรฟิลล์ (Bacteriochlorophyll)

- มี 4 ชนิด คือ a, b, c, d
- พบใน purple sulphur bacteria และ green sulphur bacteria
- ดูดพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดและอัลตราไวโอเลต

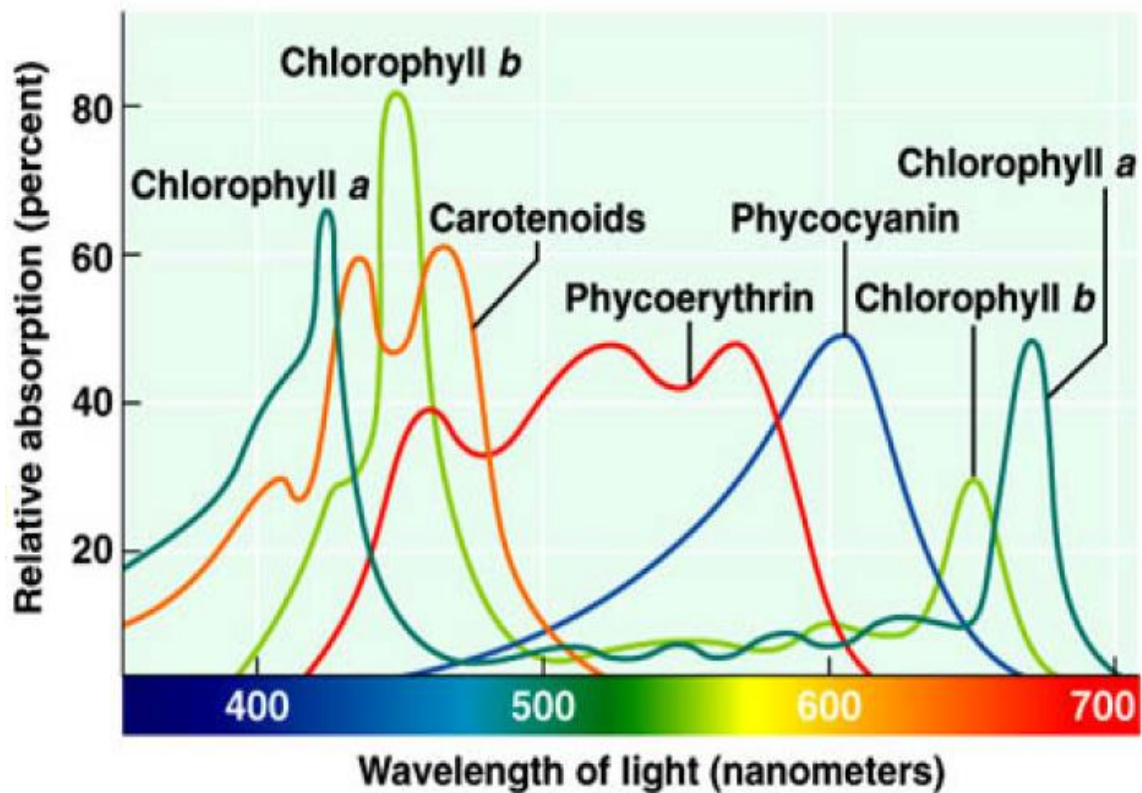
สิ่งมีชีวิต	คลอโรฟิลล์				Carotenoid	Phycobilin	แบคทีริโอคลอโรฟิลล์			
	a	b	c	d			a	b	c	d
พืชดอก และพืชต่าง ๆ	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
เฟิร์น	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
สาหร่ายสีเขียว	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
สาหร่ายสีน้ำตาล, Diatom, Dinoflagellate	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-
สาหร่ายสีแดง	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-
สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-
แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้	-	-	-	-	+	-	+	-	+/-	+/-



เพิ่มเติม...Anthocyanin เป็นรงควัตถุสีม่วง ไม่มีความสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

การดูดกลืนพลังงานแสงของรงควัตถุต่าง ๆ

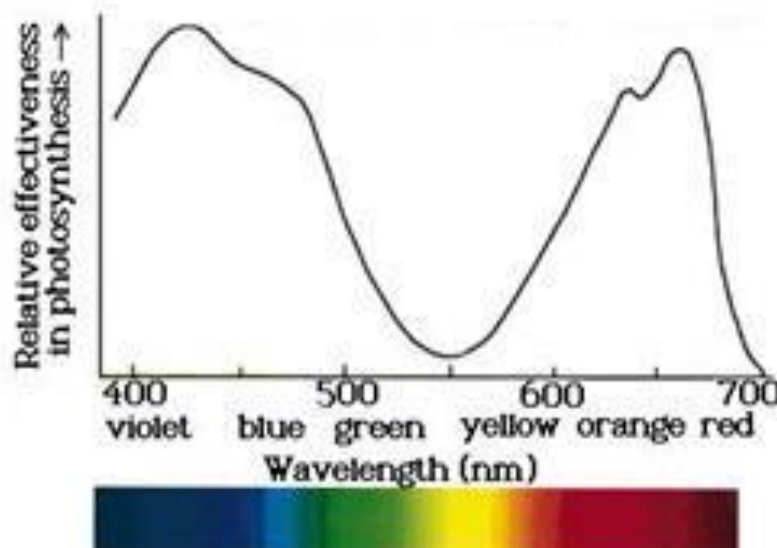
- กราฟแสดงการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันของรงควัตถุต่าง ๆ



Absorption spectrum

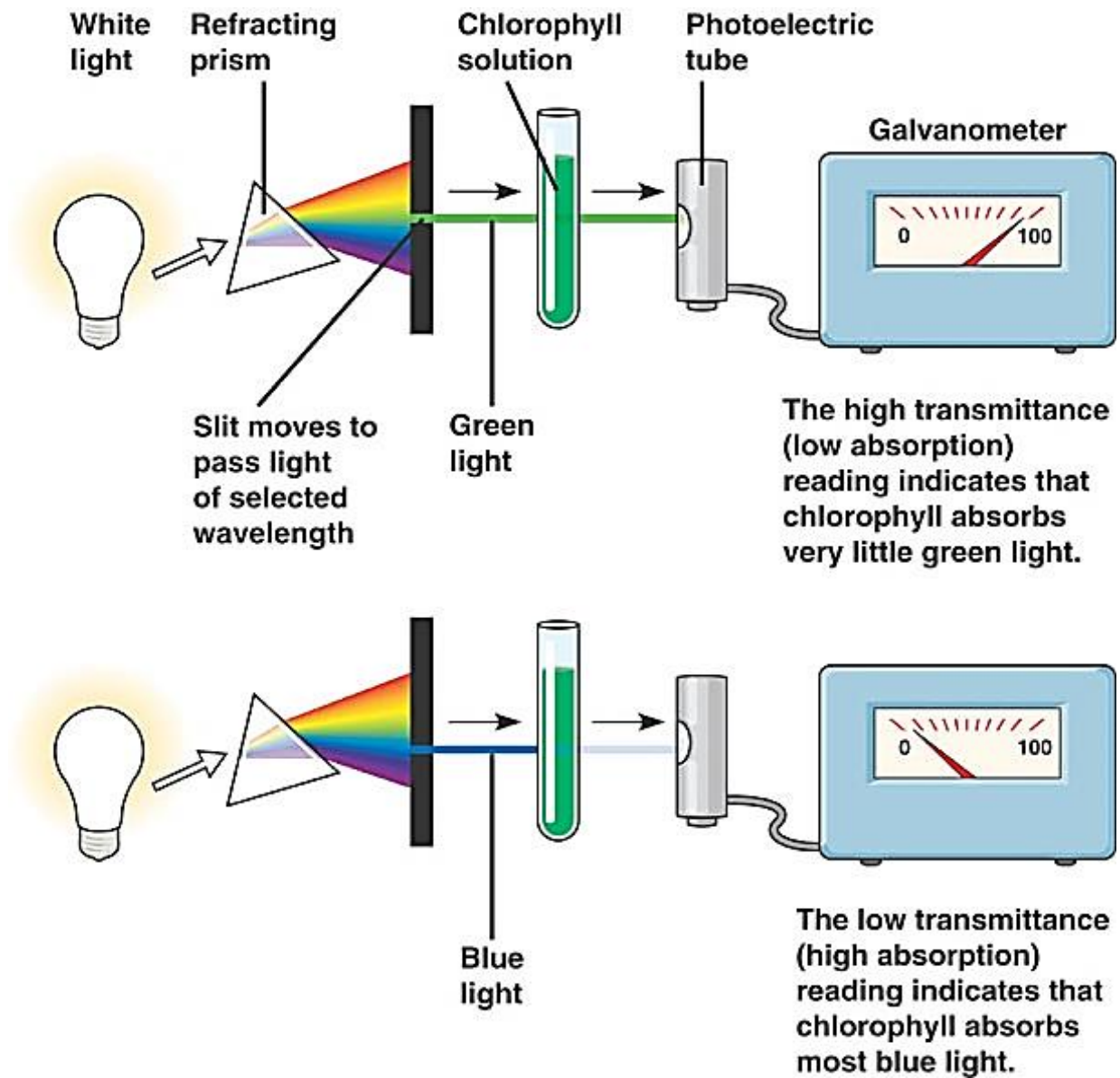
- Chlorophyll a ดูดกลืนพลังงานแสงได้ดีในช่วง.....
- Chlorophyll b ดูดกลืนพลังงานแสงได้ดีในช่วง.....
- Carotenoid ดูดกลืนพลังงานแสงได้ดีในช่วง.....

- กราฟแสดงการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงของรงควัตถุทั้งหมดที่อยู่ใน Chloroplast



Action spectrum

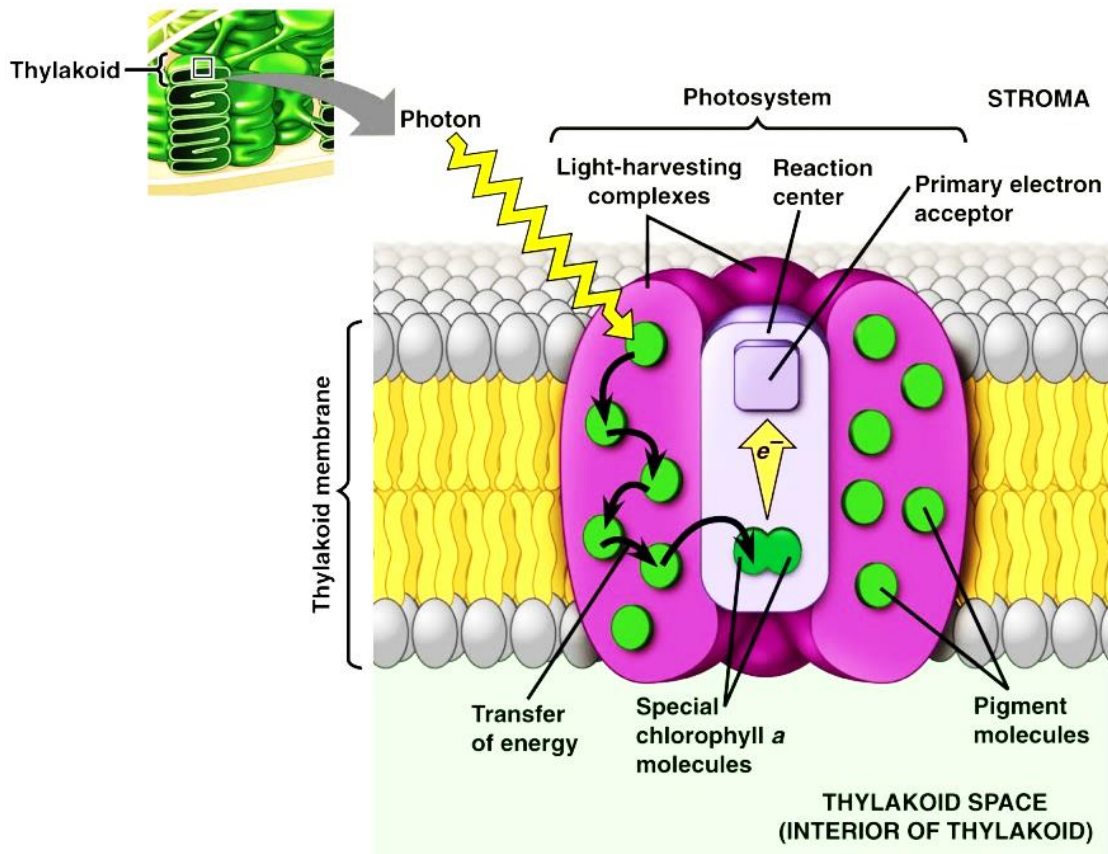
- การทดลองความสามารถในการดูดกลืนแสงของ chlorophyll



ตำแหน่งของรงควัตถุ/สารสี (Pigment)

- รงควัตถุ (pigment) ต่าง ๆ จะฝังตัวอยู่ในกลุ่มโปรตีนบนเยื่อ *Thylakoid membrane* ใน chloroplast
- โดยจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มย่อย (quantosome) ในแต่ละหน่วยจะมี pigment ประมาณ 400–600 โมเลกุล
- การอยู่รวมกลุ่มกันของรงควัตถุต่าง ๆ เรียกว่า **ระบบแสง (Photosystem : PS)**
- ระบบแสง (PS) จะมีศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) คือ **Chlorophyll a โมเลกุลคู่พิเศษ**
- ระบบแสง (photosystem : PS) แบ่งเป็น 2 ชนิด
 - PS I (P_{700}) เป็นระบบแสงที่มี chlorophyll a ที่รับพลังงานแสงขั้นต่ำสุดที่มีความยาวคลื่น 700 nm
 - PS II (P_{680}) เป็นระบบแสงที่มี chlorophyll a ที่รับพลังงานแสงขั้นต่ำสุดที่มีความยาวคลื่น 680 nm
- กลุ่มรงควัตถุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในระบบแสง (PS) มีหน้าที่ **รับและส่ง** พลังงานแสง แล้วส่งไปยัง reaction center เรียกว่า **แอนเทนนา (Antenna)**

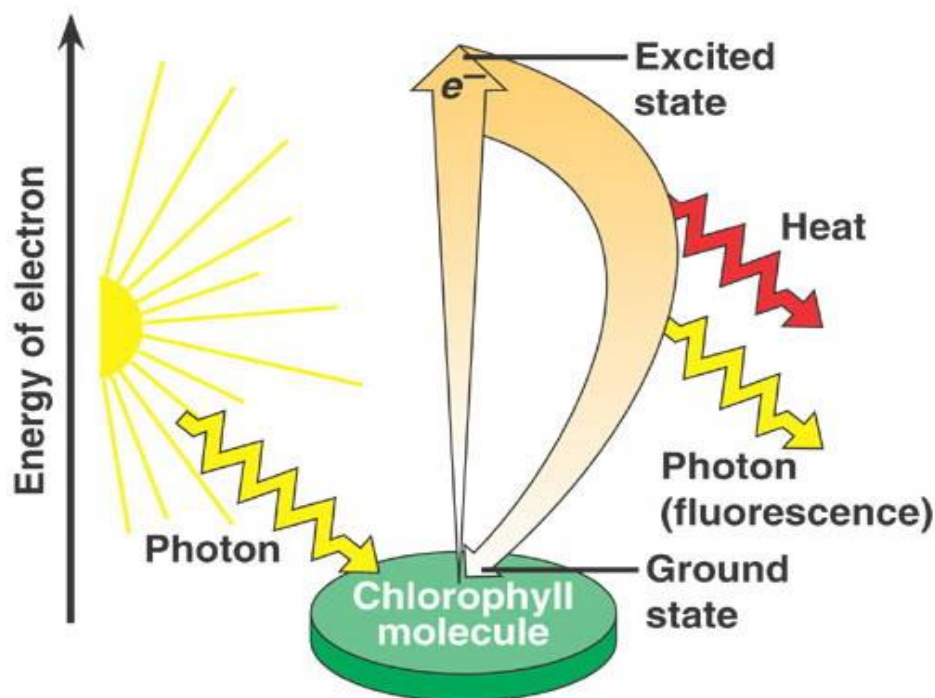
ถ้าไม่มี Chlorophyll a (Reaction center) จะส่งผลให้.....



เรียงลำดับโครงสร้าง (จากใหญ่→เล็ก)

หน้าที่ของระบบแสง (Photosystem : PS)

- รงควัตถุ (pigment) ในระบบแสง ประกอบด้วยอะตอม ซึ่งมี e^- เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส
- เมื่อ e^- ดูดพลังงานแสง จะทำให้ e^- ที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) เปลี่ยนสถานะให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งจะมีพลังงานมากขึ้น โดยการกระตุ้นนี้เรียกว่า **Photooxidation**
- e^- ที่ได้รับพลังงานอยู่ในสถานะกระตุ้น จะไม่เสถียร จึงต้องลดพลังงานกลับมายังสถานะพื้น พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมา
- พลังงานที่ปล่อยออกมา จะถูกถ่ายทอดต่อจนกระทั่งนำไปรวมที่ Chlorophyll a (reaction center)
- เมื่อ Chlorophyll a ได้รับพลังงานที่เหมาะสม จะทำให้ e^- มีพลังงานสูง และหลุดออกจากโมเลกุล
- e^- พลังงานสูง ที่หลุดออกจาก Chlorophyll a จะถูกถ่ายทอดไปยังตัวรับต่าง ๆ พร้อมปล่อยพลังงานออกมา แล้วเก็บไว้ในรูปพลังงานเคมี (สารอินทรีย์)



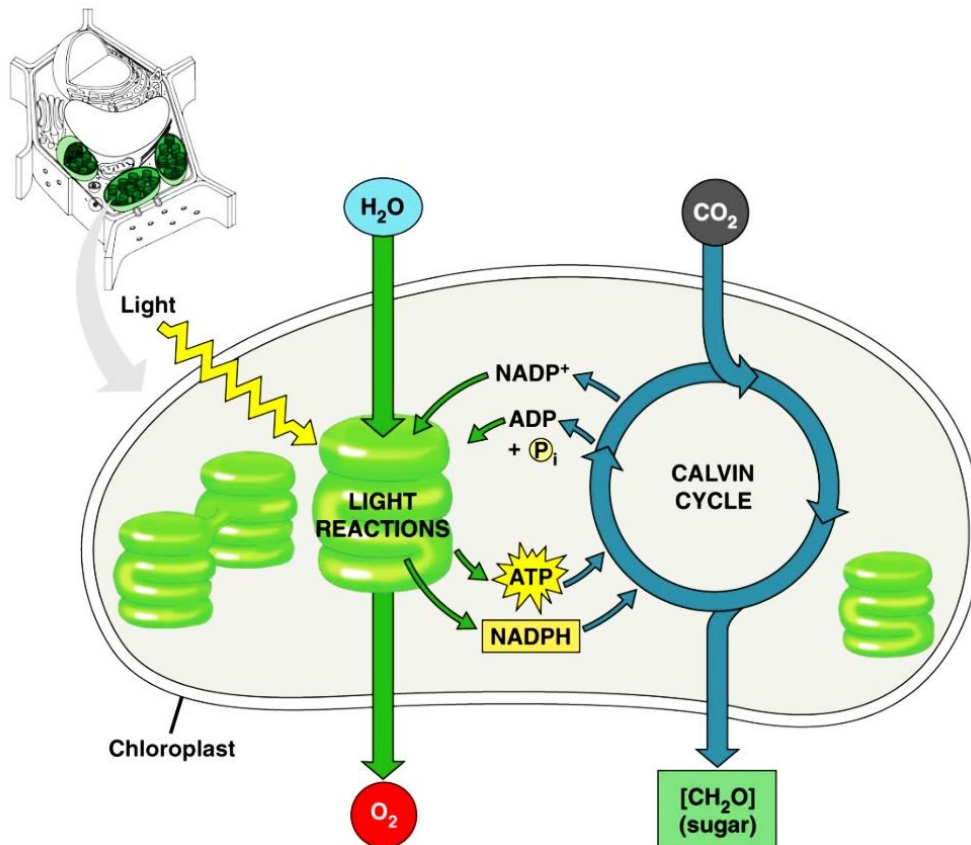
ลำดับเหตุการณ์

เพิ่มเติม...

- Antenna ทั่วไป สามารถรับและส่งพลังงานได้
- Reaction center : Chlorophyll a รับและส่งพลังงาน พร้อม e^-

4. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ



➤ ปฏิกิริยาแสง (Light reaction)

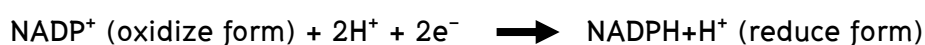
- ใช้.....
- เพื่อสร้าง.....
- เกิดที่.....

➤ ปฏิกิริยาตรึง CO₂ (CO₂ fixation/Dark reaction)

- ใช้.....
- เพื่อสร้าง.....
- เกิดที่.....

เพิ่มเติม...

- **Coenzyme** คือ กลุ่มสารอินทรีย์ที่เป็น Cofactor ของเอนไซม์ ที่มีวิตามิน B เป็นองค์ประกอบ
- หน้าที่สำคัญคือ เป็นตัวรับและถ่ายทอด H atom พร้อมกับ e⁻
- NADP⁺ (Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate) มีวิตามิน.....เป็นองค์ประกอบ



ปฏิกิริยาแสง (Light reaction)

- เกิดขึ้นที่ chloroplast บนผิว *Thylakoid membrane* และเกิดในเวลากลางวัน (ช่วงที่มีแสง)
- เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี ในรูป *ATP และ NADPH+H⁺*
- การเกิดพลังงานเคมีต้องอาศัย การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transfer) ซึ่งเกิดได้ 2 ลักษณะ
 - การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non-cyclic electron transfer)
 - การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic electron transfer)

❖ การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non-cyclic electron transfer)

- อาศัยการทำงานร่วมกันทั้ง **PS I (P700) และ PS II (P680)**
- เมื่อ PS I และ PS II ดูดพลังงานแสง แล้วส่งผ่านพลังงานไปยัง chlorophyll a จนกระทั่ง e⁻ ไม่เสถียร เปลี่ยนจาก ground state เป็น excite state ส่งผลทำให้ chlorophyll a สูญเสีย e⁻ ออกไป
- เมื่อ chlorophyll a สูญเสีย e⁻ ทำให้

ระบบแสง PS II

- **น้ำ (H₂O)** มีการแตกตัวเพื่อให้ e⁻ มาแทนที่ใน PS II โดยอาศัยพลังงานแสง
เรียกว่า.....หรือ.....
- ปฏิกิริยา Photolysis ถูกกระตุ้นโดยธาตุ Mn และ Cl เข้ามาช่วย
- โปรตอน (H⁺) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำจะ สะสมใน Thylakoid space/Lumen
- ส่วน O₂ จะปล่อยออกมาทางปากใบ เพื่อให้สิ่งมีชีวิตอื่น ใช้ในการหายใจต่อไป

สมการแตกตัวของน้ำ

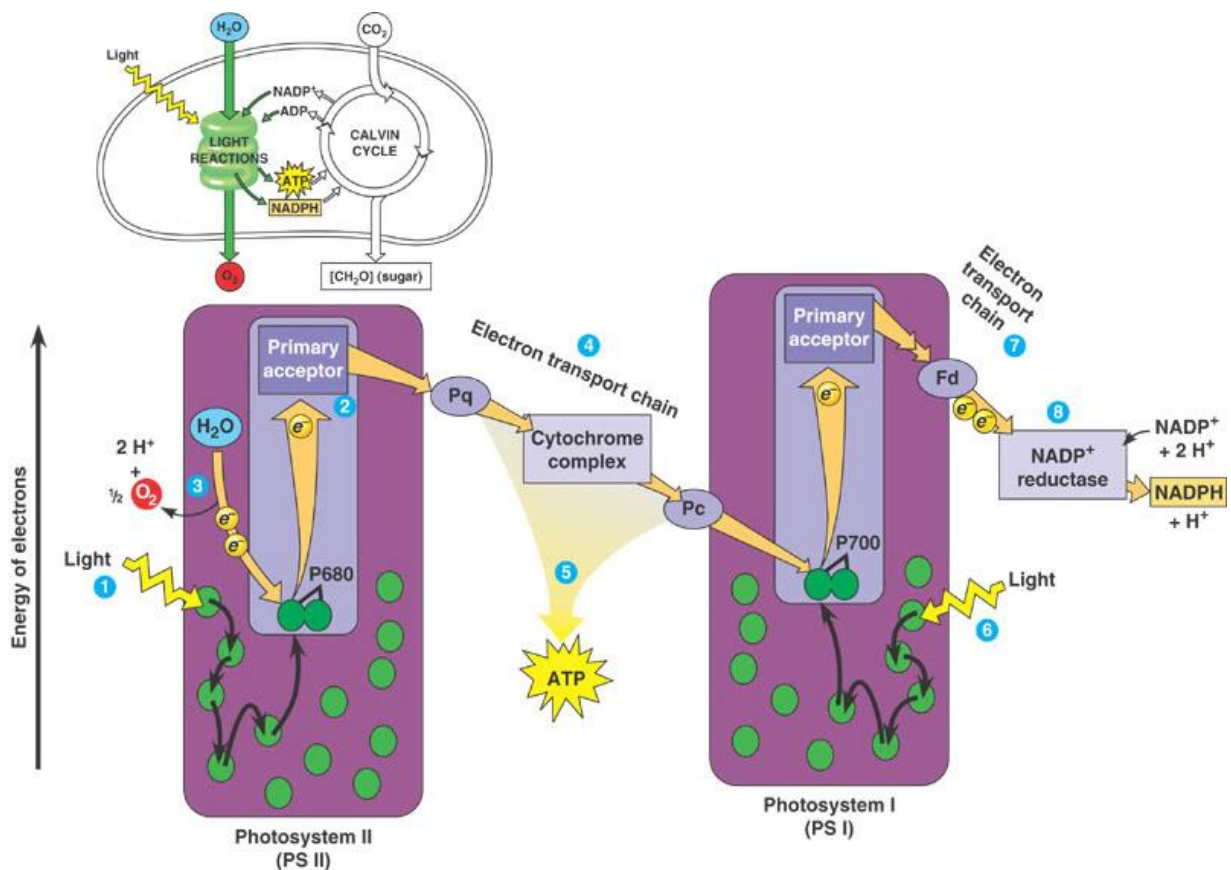
ระบบแสง PS I

- e^- ที่หลุดจาก PSI จะถูกทดแทนด้วย e^- ที่มาจาก PSII
- การถ่ายทอด e^- (Electron Transport Chain : ETC) จากแสง PSII ไป PSI จะมีการส่งต่อกันอีกหลายตัว โดยมีลำดับ

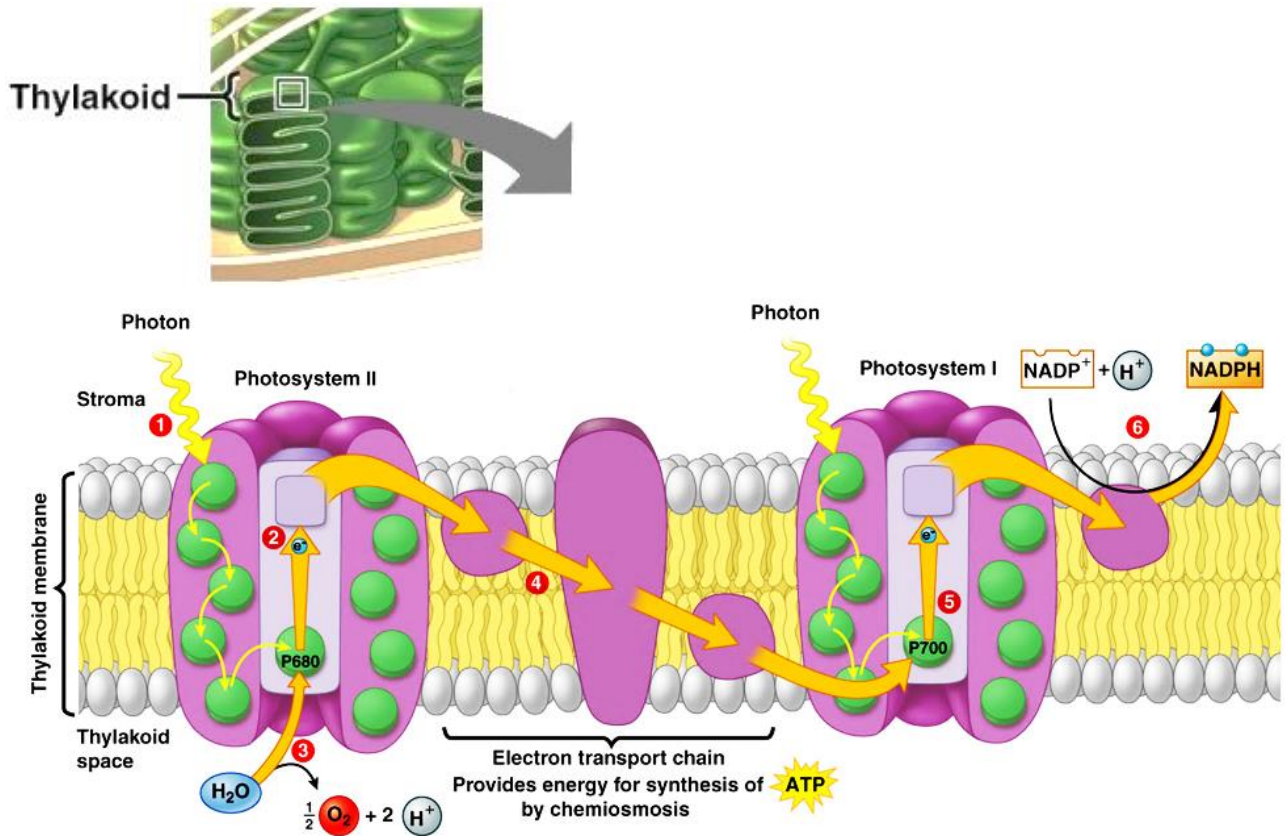


- e^- ที่หลุดจาก PSI จะถูกถ่ายทอดไปยัง **Ferredoxin : Fd** (โปรตีนที่มี Fe เป็นองค์ประกอบ)
- จากนั้นจะมี Coenzyme คือ.....มารับ e^- (พลังงานสูง) ตัวสุดท้าย

สมการการรับ e^- ของ Coenzyme



Cytochrome = โปรตีนซึ่งมีธาตุเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบ ทำหน้าที่ ตัวรับและจ่ายอิเล็กตรอนเท่านั้น



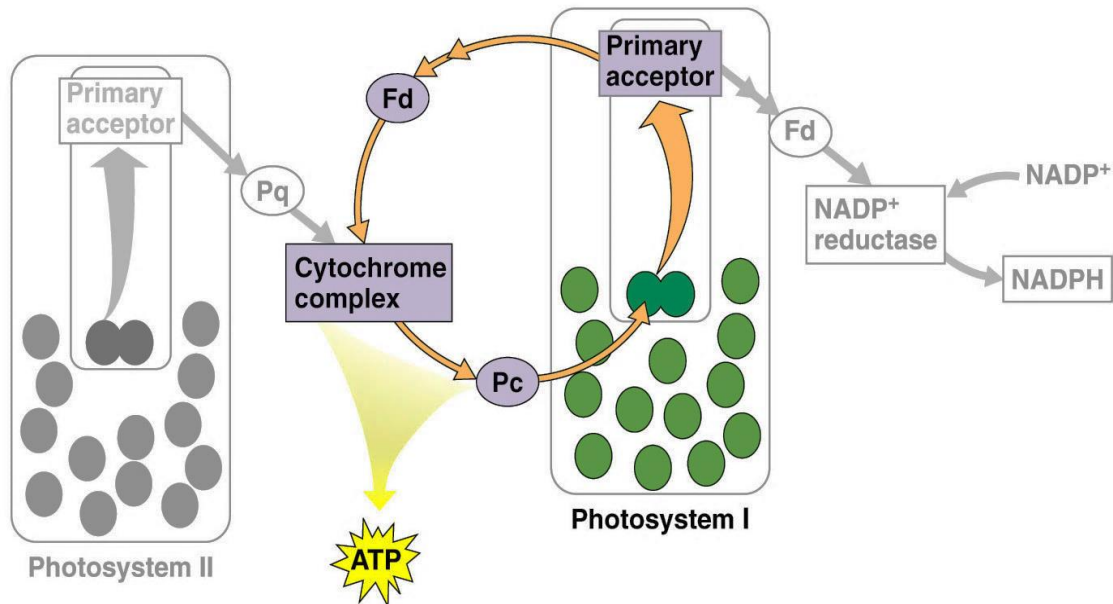
คำถามส่งท้ายนะจ๊ะ...

ถ้าพืชไม่มีการถ่ายทอด e⁻ ในระบบแสง จะมีการแตกตัวของน้ำหรือไม่ เพราะเหตุใด

.....

.....

❖ การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (cyclic electron transfer)



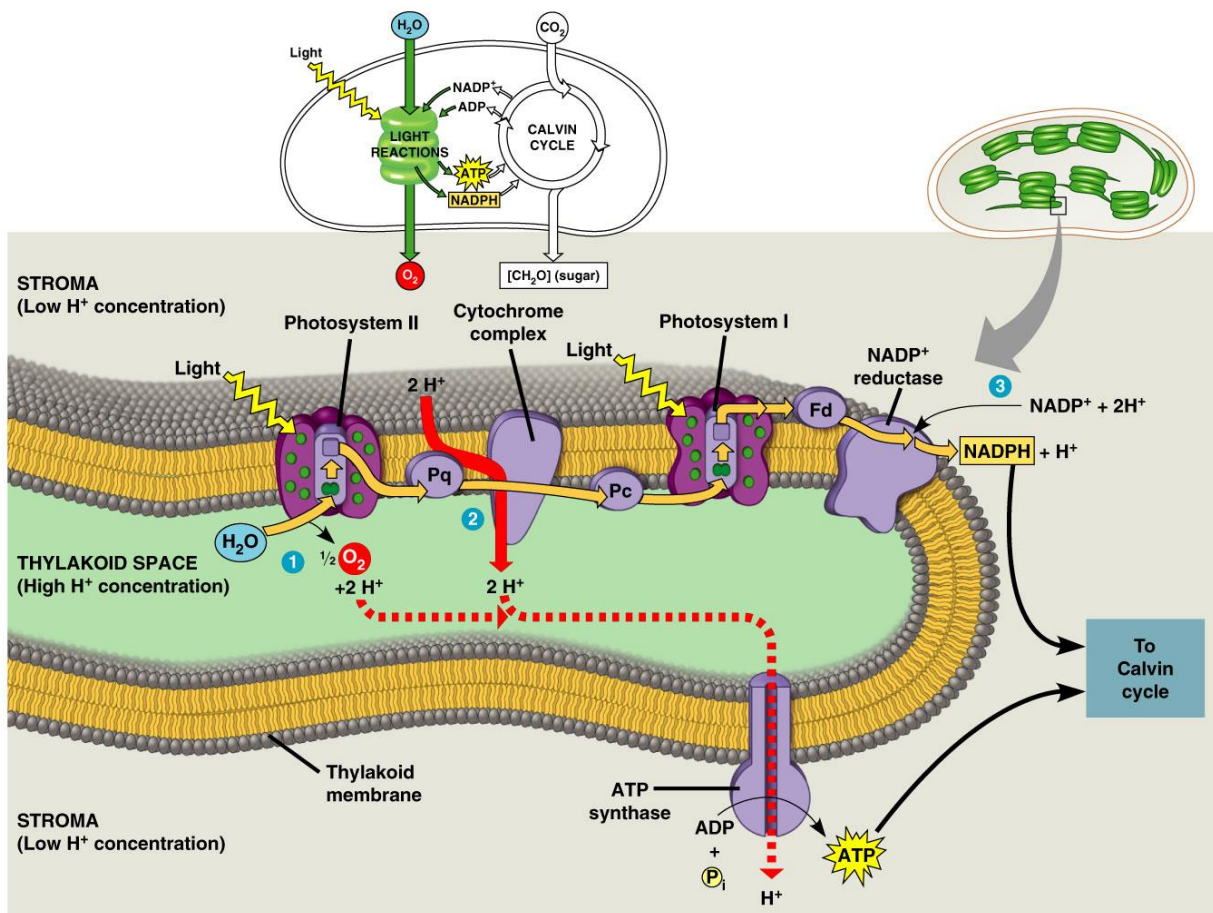
- อาศัยการทำงานเฉพาะ **PS I (P700)**
- เมื่อ PS I ดูดพลังงานแสง แล้วส่งผ่านพลังงานไปยัง chlorophyll a จนกระทั่ง e^- ไม่เสถียร เปลี่ยนจาก ground state เป็น excite state ส่งผลทำให้ chlorophyll a สูญเสีย e^- ออกไป
- e^- จึงถูกส่งไปยัง primary acceptor, Ferredoxin : Fd และย้อนกลับมายัง cytochrome complex (ไม่ถ่ายทอดให้ coenzyme)
- ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จะนำไปใช้ในการปั๊ม H^+ จาก Stroma เข้าสู่ thylakoid space/lumen และใช้หลักการสร้าง ATP เช่นเดียวกับ Non-cyclic electron transfer

***เหตุที่ต้องมี cyclic electron transfer เพราะ.....

.....***

****กระบวนการสร้าง ATP****

- ขณะที่น้ำ (H_2O) แตกตัวที่ PS II ส่งผลให้ H^+ ที่ได้ สะสมใน Thylakoid space/Lumen เพิ่มมากขึ้น
- ซึ่งในขณะเดียวกัน e^- ที่เกิดการถ่ายทอดจาก PS II และ PS I จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยพลังงานออกมา และพลังงานที่ได้ จะนำไปใช้ในการปั๊ม H^+ จาก Stroma เข้าสู่ Thylakoid space/Lumen
- เมื่อมีการสะสม H^+ ใน Thylakoid space/Lumen เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า pH เป็น กรดมากขึ้น (pH ต่ำ) ทำให้เกิดความแตกต่างของ H^+ ระหว่าง Stroma กับ Thylakoid space/Lumen
- ความแตกต่างนี้ จะส่งผลให้เกิดการแพร่ของ H^+ ผ่านเอนไซม์ ATP synthase ออกสู่ stroma ซึ่งเป็นการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ATP synthase ให้มีการสร้าง ATP ในบริเวณ Stroma
- การสร้าง ATP นี้ เรียกว่า.....
- ซึ่งอาศัยหลักการของ ความแตกต่างของ H^+ ของ 2 บริเวณ เรียกว่า.....



รู้หรือไม่ ? สารกำจัดวัชพืชมีผลต่อการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสง การยับยั้งการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยใช้สารกำจัดวัชพืชนั้น มีกลไกดังนี้

ไดยูรอน (Diuron: Dichlorophenyl dimethylurea; DCMU) เป็นสารกำจัดวัชพืชที่ยับยั้งการถ่ายทอดอิเล็กตรอนระหว่าง photosystem II ไปยัง photosystem I ดังนั้นจึงยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง

พาราควอต (Paraquat: Methyl viologen) เป็นสารกำจัดวัชพืชที่ไปแย่งรับอิเล็กตรอนที่ photosystem I ในขณะที่ส่งต่อไปยัง NADP+ แล้วรีดิวซ์ออกซิเจนให้เป็น O₂⁻ (superoxide anion radical) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารหลายชนิดในคลอโรพลาสต์ จึงมีผลยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง

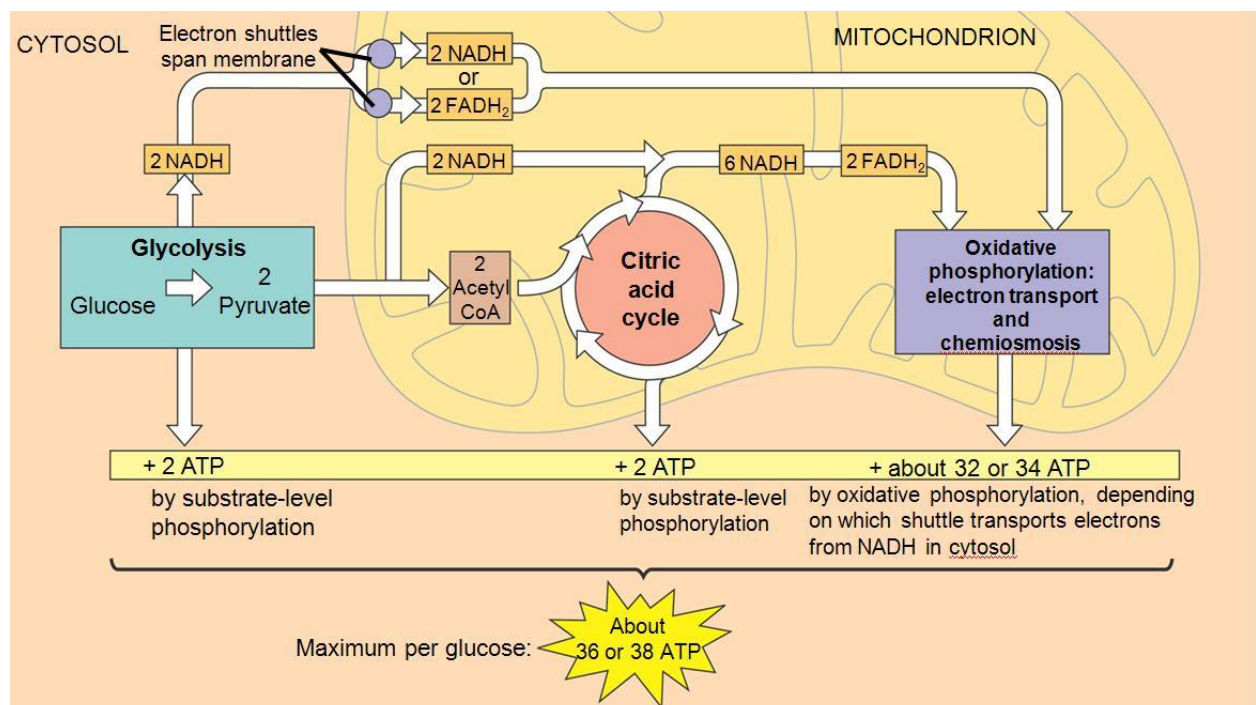
ตารางเปรียบเทียบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

ตัวเปรียบเทียบ	Non-cyclic electron flow	Cyclic electron flow
ที่มาของ e ⁻		
ระบบแสง		
Photolysis		
ATP		
NADPH		
O ₂		
จำนวนแสง		
ตัวรับ e ⁻ ตัวสุดท้าย		

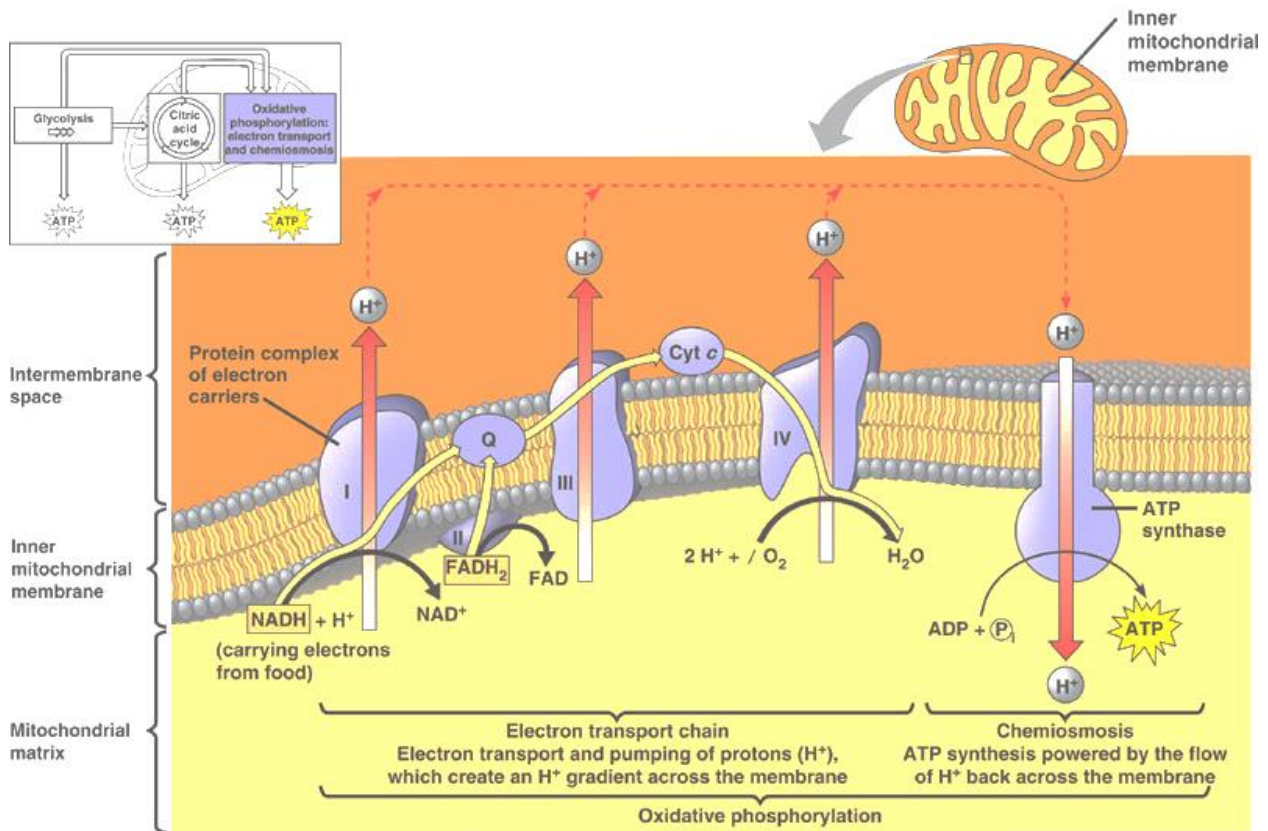
การเปรียบเทียบ การหายใจระดับเซลล์กับการสังเคราะห์ด้วยแสง

การหายใจระดับเซลล์ (cellular respiration)

Concept การหายใจระดับเซลล์



การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport chain : ETC)

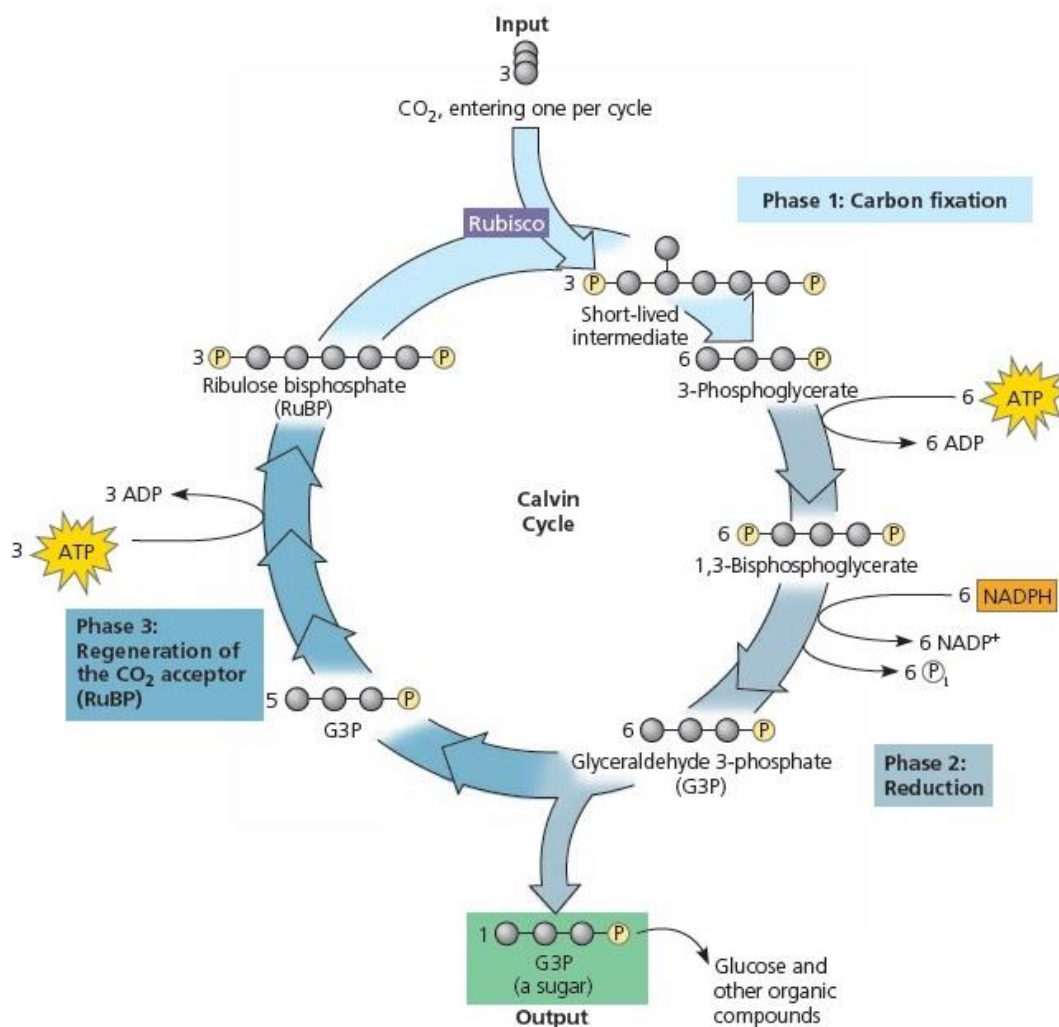
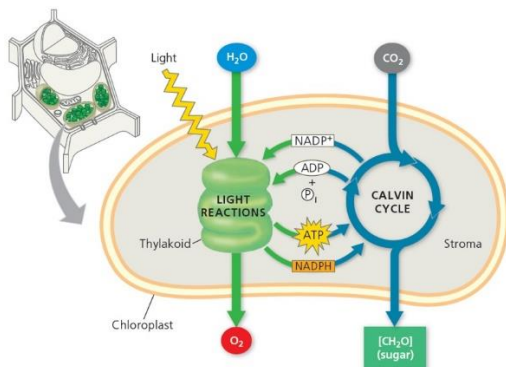


เปรียบเทียบ	Photosynthesis	Cellular respiration (ใช้ O ₂)
ตัวรับ e ⁻ ตัวสุดท้าย		
ETC		
กระบวนการสร้าง ATP		
Organelle ที่เกิด		
chemiosmosis		

ปฏิกิริยาตรึง CO₂ (CO₂ fixation)

- เกิดขึ้นที่ chloroplast บริเวณ **Stroma** ซึ่งเกิดในเวลากลางวัน เช่นเดียวกับ Light reaction
- เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากแสง และอาศัยแสงเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ
- เป็นกระบวนการที่
 - ใช้ พลังงานเคมี ในรูป **ATP และ NADPH+H⁺** จาก Light reaction
 - เพื่อ ตรึง CO₂ เอาไปสร้าง สารอินทรีย์ (น้ำตาล)

***** ถ้าขาด **ATP และ NADPH+H⁺** จะเกิด CO₂ fixation ไม่ได้*****



ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน

1) Phase I Carbon fixation (ไม่ใช้พลังงานในรูป ATP)

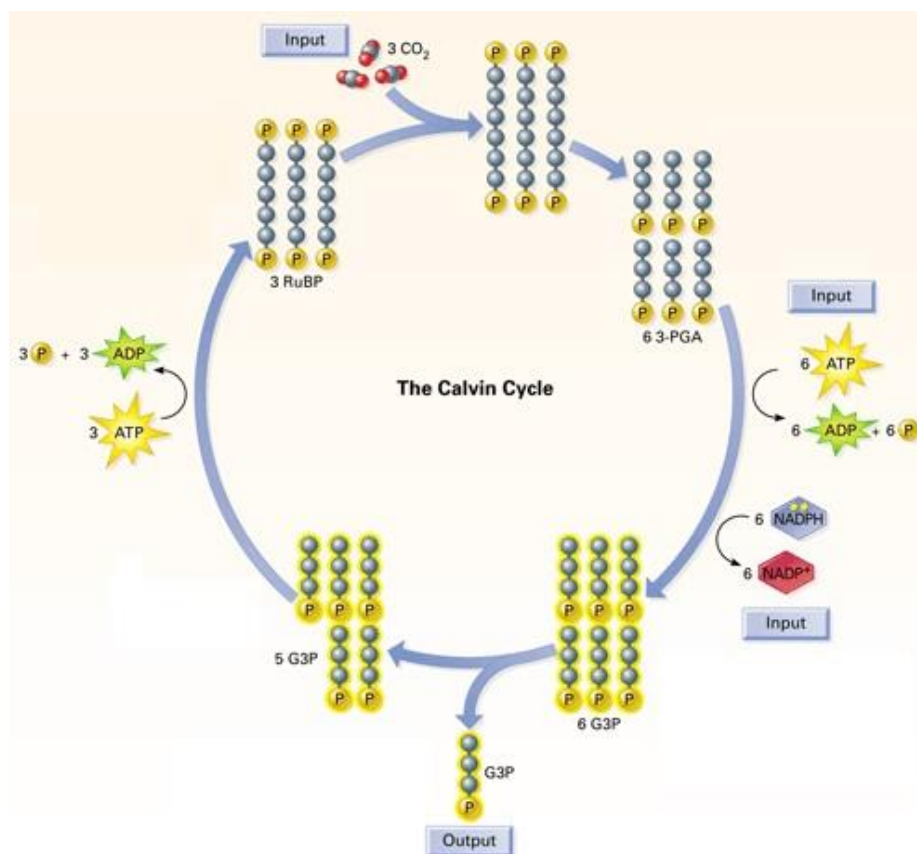
- เป็นการใส่อินทรีย์ คือ Ribulose-1,5-Bisphosphate : RuBP (5C) ทำปฏิกิริยากับ CO_2 (1C) โดยมีเอนไซม์ Ribulose-1,5-Bisphosphate carboxylase oxygenase : Rubisco เร่งปฏิกิริยา
- เมื่อสาร 5C + 1C ได้สาร 6C ที่ไม่เสถียร จึงแตกตัวเป็นสาร 3C ซึ่งเป็น สารเสถียรตัวแรก ในวัฏจักร เรียกว่า Phosphoglycerate : PGA (3C)

2) Phase II Reduction

- PGA เติมหมู่ phosphate จาก ATP แล้วเปลี่ยนเป็น 1, 3-bisphosphoglycerate (3C)
- จากนั้นมีการรับอิเล็กตรอน (ถูกรีดิวซ์) จาก $\text{NADPH} + \text{H}^+$ แล้วเปลี่ยนเป็น น้ำตาลตัวแรก เรียกว่า Glyceraldehyde-3-phosphate : G3P (3C) / Phosphoglyceraldehyde : PGAL (3C)

3) Phase III Regeneration

- เป็นขั้นตอนการสร้าง RuBP ขึ้นมาใหม่ เพื่อหมุนเวียนไปรับ CO_2 โดย
- PGAL ที่ได้จาก Phase II Reduction มีทั้งหมด 6 โมเลกุล ซึ่ง 5 โมเลกุล จะนำกลับไปสร้าง RuBP ส่วนอีก 1 โมเลกุล จะออกจากวัฏจักร เพื่อไป สร้างน้ำตาล (glucose) และสารอินทรีย์อื่นๆ



*****Rubisco เป็นเอนไซม์ (โปรตีน) ที่พบมากที่สุดในพื้นที่และในโลก*****

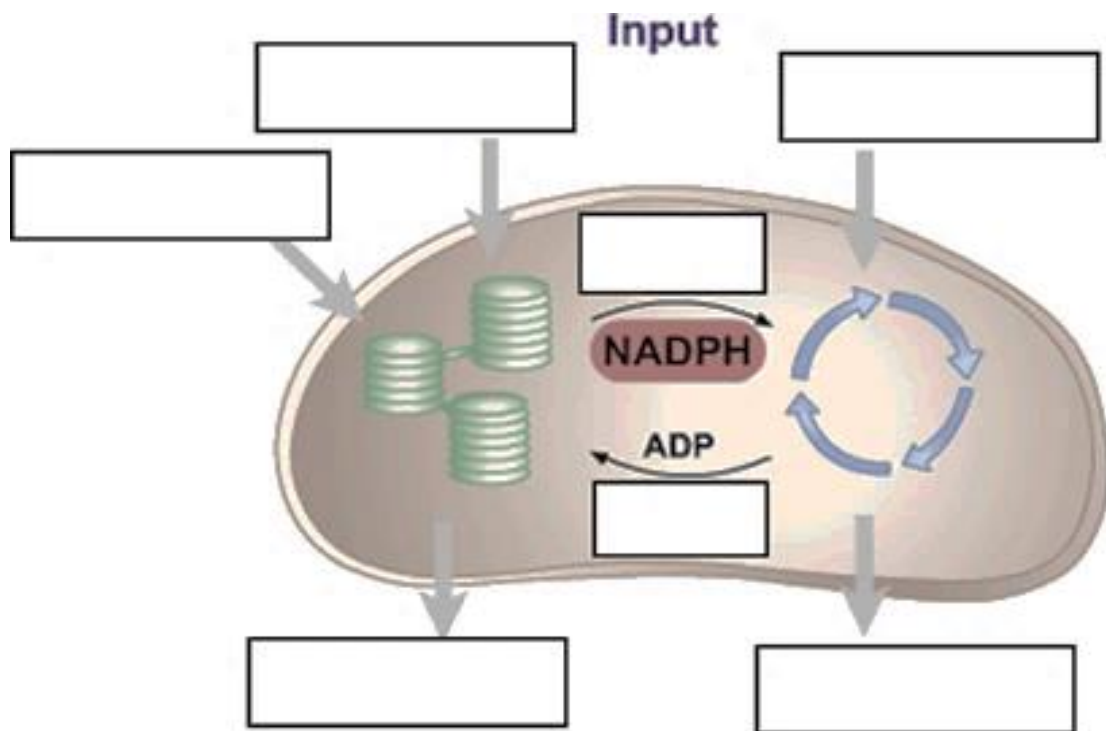
เพิ่มเติม...

❖ Calvin cycle สมบูรณ์ 1 รอบ จะได้

- PGAL (3C).....โมเลกุล ซึ่งนำไปสร้างน้ำตาล.....โมเลกุล
- ต้องใช้.....ATP และ.....NADPH+H⁺

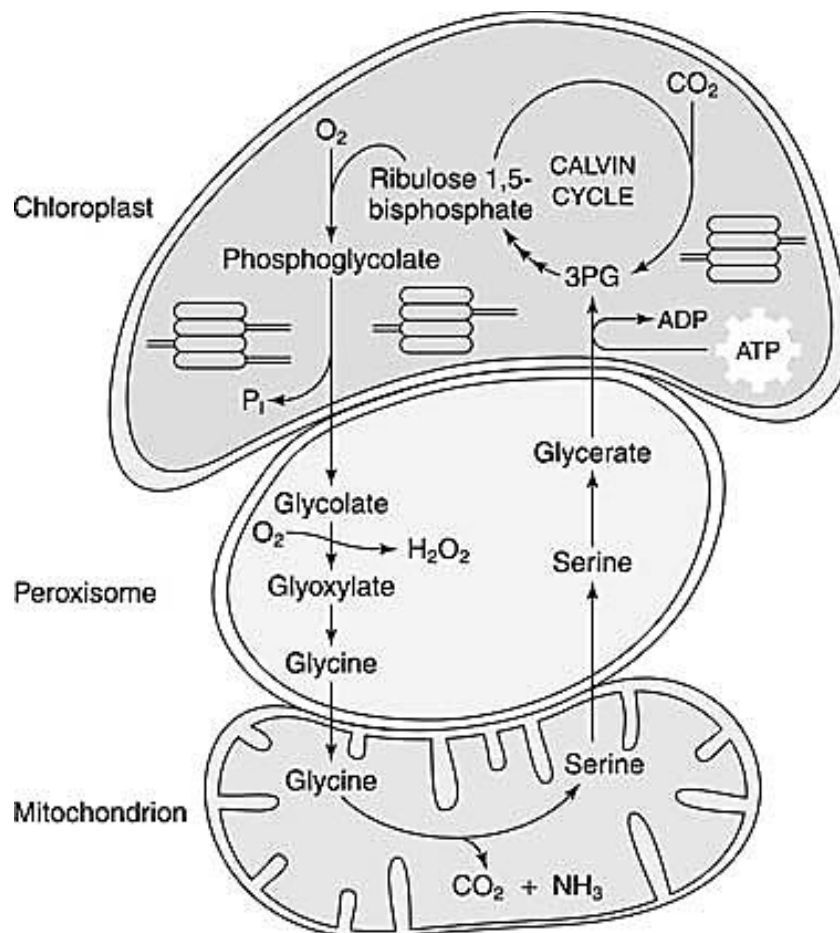
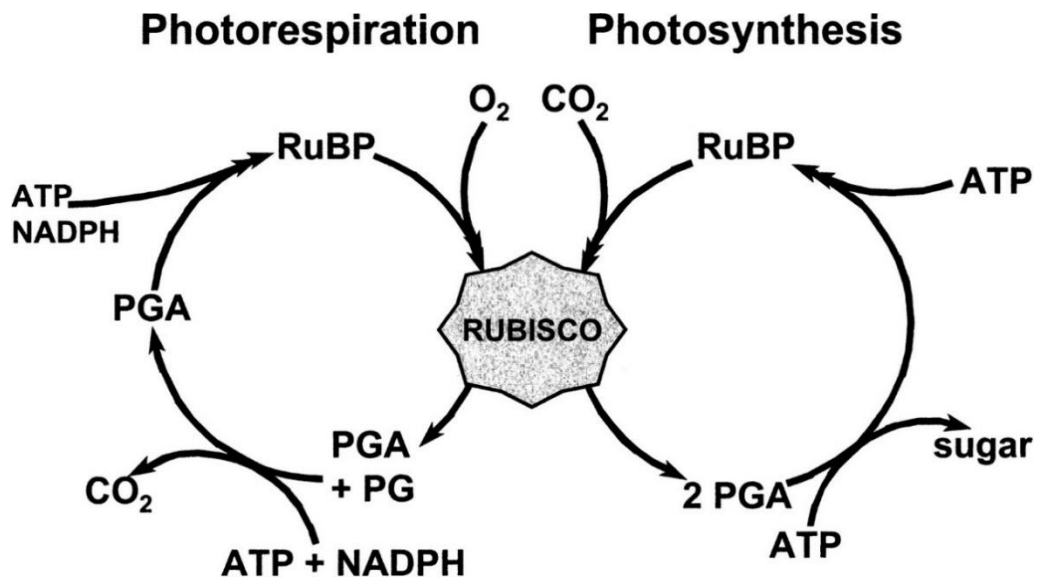
❖ การสร้าง Glucose (6C) 1 โมเลกุล ต้องเกิด Calvin cycleรอบ

❖ เติมในช่องว่าง ด้วยนะครึบบบบบ



❖ การหายใจแสง (Photorespiration) : ไม่เกี่ยวกับการหายใจระดับเซลล์ (Cellular respiration)

- เป็นปฏิกิริยา ดูดพลังงาน (Endergonic reaction)
- เป็นกระบวนการที่พืชใช้เอนไซม์ Rubisco และ RuBP *ตรึง* O_2 แทน CO_2
- ส่งผลให้การตรึง CO_2 น้อยลง เนื่องจากเกิดการแก่งแย่งกับ O_2 ทำให้การเจริญเติบโตช้าลง
- *ข้อดี* ช่วยลดอันตรายจากสารพลังงานสูงที่มาจากแสงมากเกินไปได้
- เกิดได้ดีที่ *อุณหภูมิสูงๆ* และมักเกิดกับพืช C_3



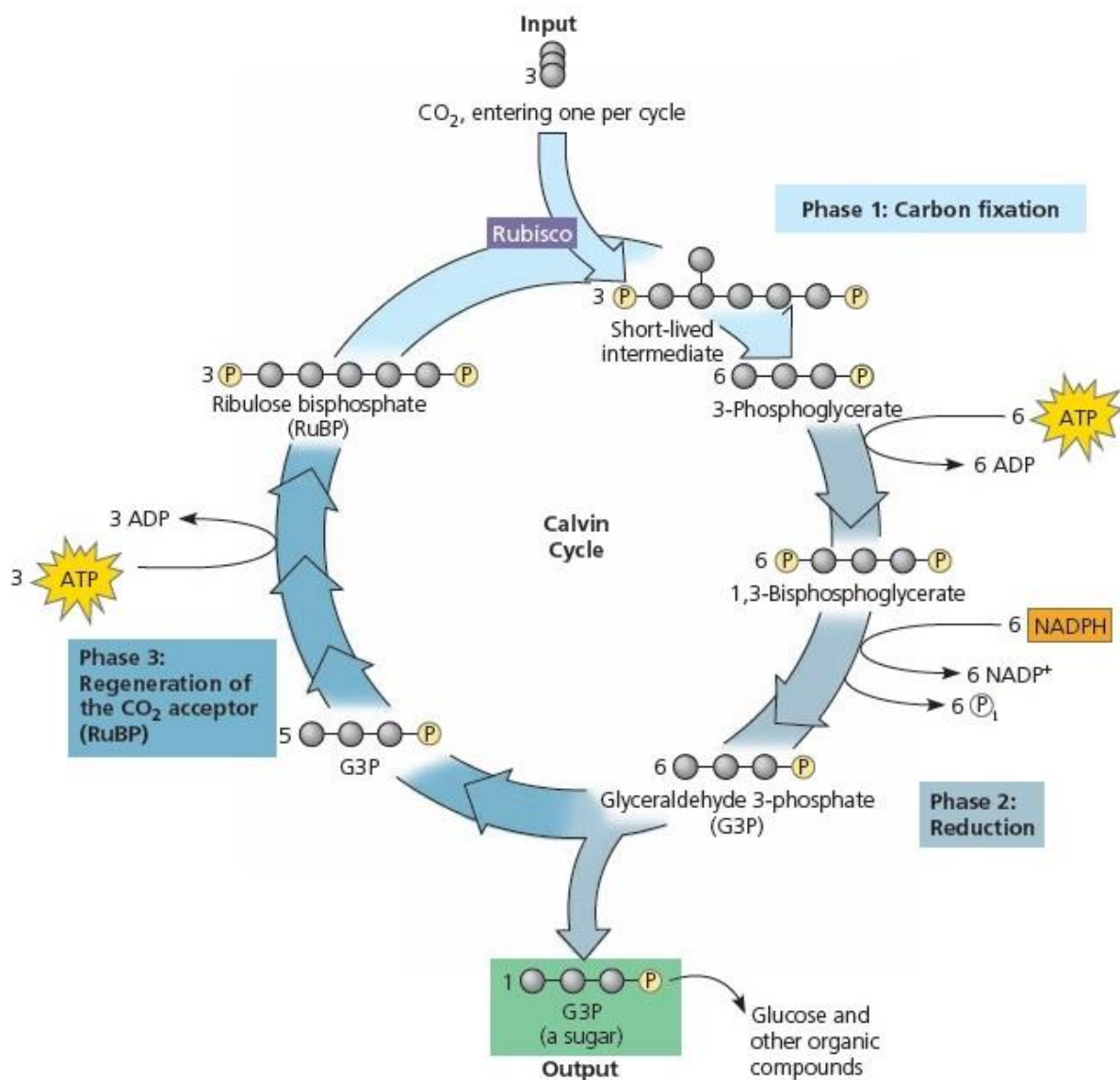
ตารางเปรียบเทียบระหว่าง Cellular respiration และ Photorespiration

ข้อเปรียบเทียบ	Cellular respiration	Photorespiration
ช่วงเวลาในการเกิด		
การปลดปล่อย CO ₂		
การใช้เอนไซม์ Rubisco		
ได้สารพลังงานสูง (ATP)		
บริเวณที่เกิด		

5. การตรึง CO₂ ของพืช

➤ C₃ – plant

- เป็นพืชที่ตรึง CO₂ จากอากาศ แล้วได้สารเสถียรตัวแรก เป็น สารที่มี 3C (PGA)
- เป็นพืชทั่ว ๆ ไป เช่น ข้าว, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวโอ๊ต, ข้าวสาลี
- มีการตรึง CO₂ เพียง 1 ครั้ง คือ Calvin cycle โดยใช้.....
และเอนไซม์.....ตรึง CO₂ จากอากาศ
- ผลิตภัณฑ์ตัวแรกที่เสถียรคือ
- น้ำตาลตัวแรกที่ได้คือ.....แล้วถูกนำไปสร้างเป็น.....
- เกิดขึ้นที่ *Mesophyll* และทุกเซลล์ที่มี *Chloroplast* ของใบ



➤ C₄ – plant

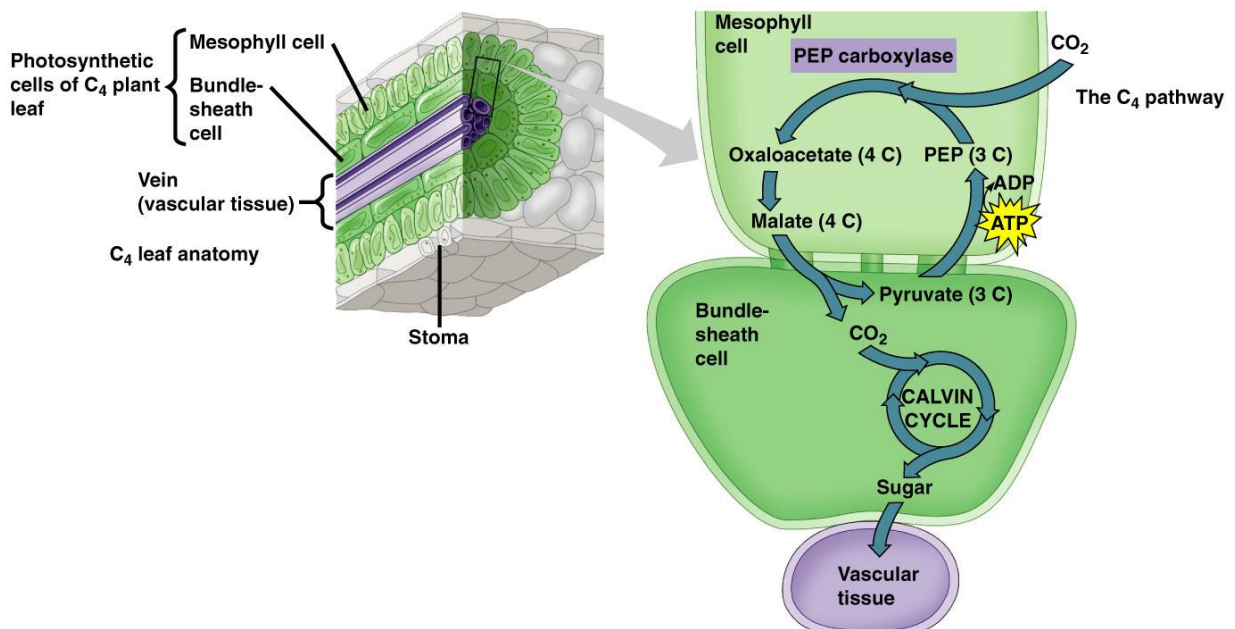
- เป็นพืชที่ตรึง CO₂ จากอากาศ แล้วได้สารเสถียรตัวแรก เป็นสารที่มี 4C (Oxaloacetate : OAA)
- เป็นพืชในเขตร้อน เช่น อ้อย, ข้าวฟ่าง, ข้าวโพด, หญ้าแพรก, หญ้าหัวหมู, ผักโขมจีน, บานไม่รู้โรย, หญ้าขน, หญ้าคา, หญ้าจวบ, ลูกเดือย,
- มีการตรึง CO₂ 2 ครั้ง คือ **Hatch-Slack cycle** กับ **Calvin cycle**

❖ ครั้งที่ 1 Hatch-Slack cycle (ตรึง CO₂ จากอากาศ)

- เกิดขึ้นที่ **Mesophyll** ของใบ
- ใช้ Phosphoenol pyruvic acid : PEP (3C) ตรึง CO₂ จากบรรยากาศ
- โดยใช้เอนไซม์.....แล้ว
เปลี่ยนเป็น.....ซึ่งเป็น **ผลิตภัณฑ์ตัวแรก**ที่เสถียร
- จากนั้นเปลี่ยนเป็น.....แล้วลำเลียงผ่านรู
plasmodesmata เข้าสู่ Bundle sheath cell

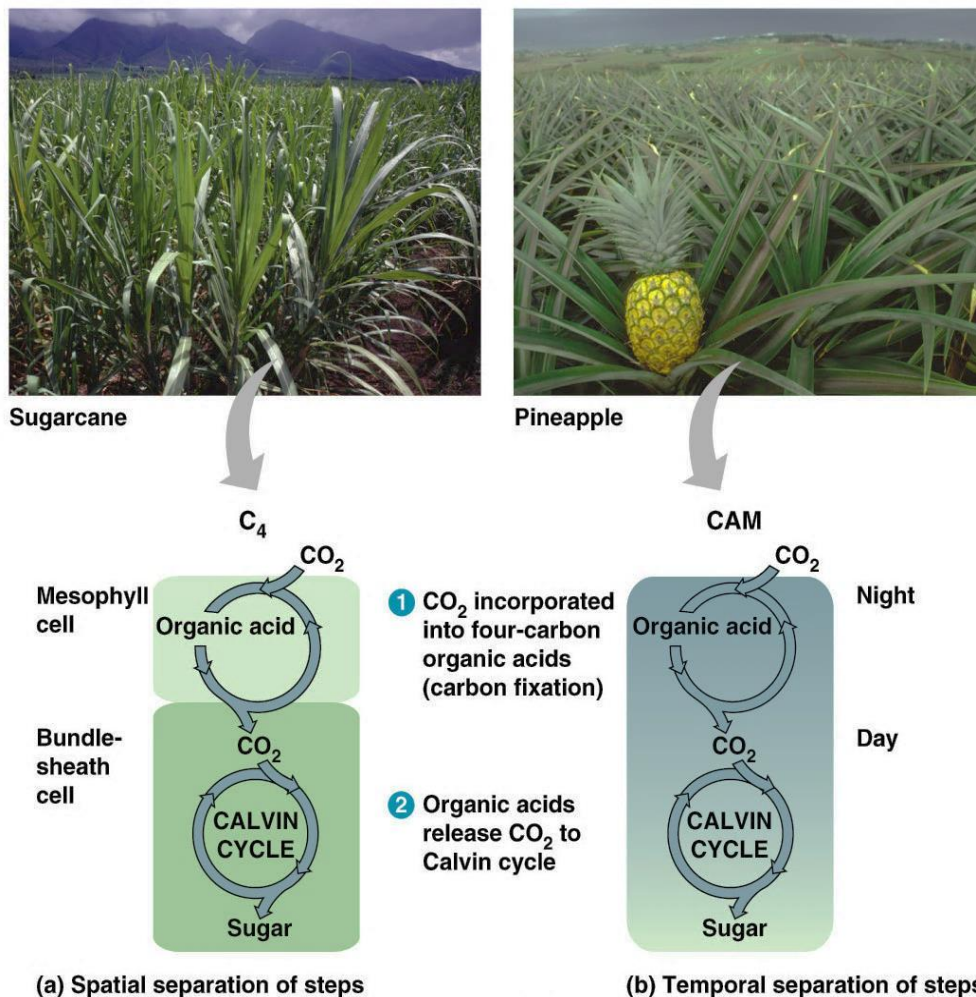
❖ ครั้งที่ 2 Calvin cycle (ตรึง CO₂ ต่อจาก hatch slack cycle)

- เกิดขึ้นที่ **Bundle sheath cell** ของใบ
- Malate (4C) ที่ได้จาก hatch slack cycle จะปล่อย CO₂ แล้วเปลี่ยนเป็น pyruvate (3C) และ PEP (3C) ตามลำดับ โดยใช้ ATP
- ส่วน CO₂ จะเข้าสู่ Calvin cycle ซึ่งในการตรึงจะเหมือนกับพืช C₃



➤ CAM plant (Crassulacean Acid Metabolism : พืชอวบน้ำ)

- เป็นพืชที่เจริญในที่แห้งแล้งหรือทะเลทราย เช่น กระบองเพชร, กัลยไม้, ศรนารายณ์, สับปะรด ว่านหางจระเข้, ลิ้นมังกร, พืชทะเลทราย, พืชป่าชายเลน, กุหลาบหิน, คว่ำตายใบเป็น
- มีวิวัฒนาการที่จะลดการสูญเสียน้ำ โดยลดรูปใบให้เล็กลง
- การปิด-เปิด ปากใบ (สลับกับพืช C_3 และ C_4)
 - เปิด ในเวลากลางคืน
 - ปิด ในเวลากลางวัน
- มีการตรึง CO_2 2 ครั้ง คือ *Hatch-Slack cycle* กับ *Calvin cycle* (เหมือนพืช C_4) โดย
 - Hatch-Slack cycle เกิดในเวลา.....
 - Calvin cycle เกิดในเวลา.....
- หลังจากเกิดสาร OAA จะเปลี่ยนเป็น *Malic acid* แล้วลำเลียงมาเก็บสะสมไว้ใน *Vacuole*
- เมื่อถึงเวลากลางวัน *Malic acid* จะลำเลียงสู่ chloroplast และถูกตรึง CO_2 เข้า Calvin cycle ตามปกติ
- เกิดขึ้นที่ *Mesophyll* และทุกเซลล์ที่มี *Chloroplast* ของใบ



ตารางเปรียบเทียบของพืช C_3 , C_4 และ CAM

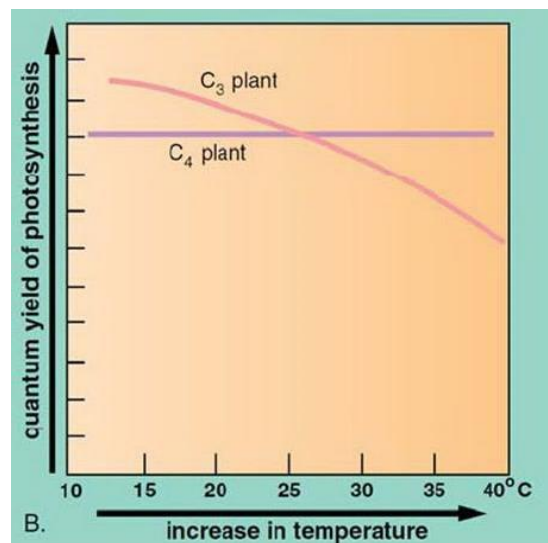
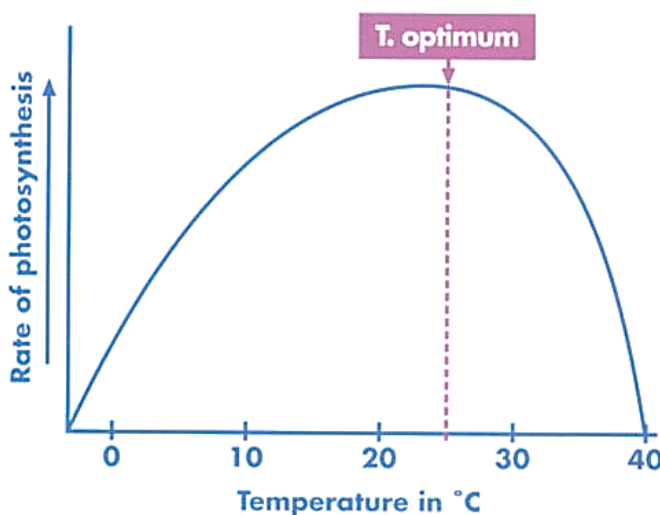
ข้อเปรียบเทียบ	พืช C_3	พืช C_4	พืช CAM
Bundle sheath cell (kranz-type)			
Chloroplast ที่สะสมใน bundle sheath cell			
จำนวนครั้งของการตรึง CO_2 และ บริเวณที่ตรึง CO_2			
บริเวณที่เกิด Calvin cycle			
สารที่ใช้ในการตรึง CO_2 จาก บรรยากาศ			
เอนไซม์ที่ใช้ตรึง CO_2 จากอากาศ			
ช่วงเวลาในการตรึง CO_2 ใน บรรยากาศ			
ผลิตภัณฑ์เสถียรตัวแรก			
ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง			
Photorespiration			
ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจริญเติบโต เทียบกับน้ำหนักแห้งของพืช 1 กรัม			

เพิ่มเติม...

Kranz type คือ โครงสร้างกายวิภาคที่ใบ ซึ่งพบ bundle sheath ที่มีการสะสมของ chloroplast และสามารถทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเหมือนชั้น mesophyll ได้ เช่น พืช C_4

6. ปัจจัยบางประการที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง

- ความยาวคลื่นแสง = แสงสีเขียว (500–600 nm) พืชนำไปใช้ได้น้อย
- H_2O ในดิน = ถ้ามีน้อยพืชจะหลั่งสาร Absciscic acid (ABA) ทำให้ปากใบปิด ปริมาณ CO_2 จึงน้อยลง
- O_2 = ทำให้เกิด photorespiration โดยเฉพาะพืช C_3
- Mineral
 - ขาด N + Mg ทำให้ขาด Chlorophyll ใบเหลืองซีด (chlorosis)
 - Mn + Cl ช่วยในกระบวนการ photolysis
 - Cu เป็นองค์ประกอบของ plastocyanin (Pc) ซึ่งทำหน้าที่รับและจ่าย e^-
 - Fe เป็นองค์ประกอบใน Cytochrome และ Ferredoxin ซึ่งทำหน้าที่รับและจ่าย e^- และช่วยกระตุ้นการสร้าง chlorophyll
- อายุใบ = ใบแก่หรืออ่อนก่อนใบสังเคราะห์ได้ไม่ดี
- อุณหภูมิ (พืชแต่ละชนิดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงแตกต่างกัน)
 - มีผลต่อการทำงานของ enzyme ทำให้เกิด Denaturation
 - ทำให้เกิด photorespiration โดยเฉพาะในพืช C_3

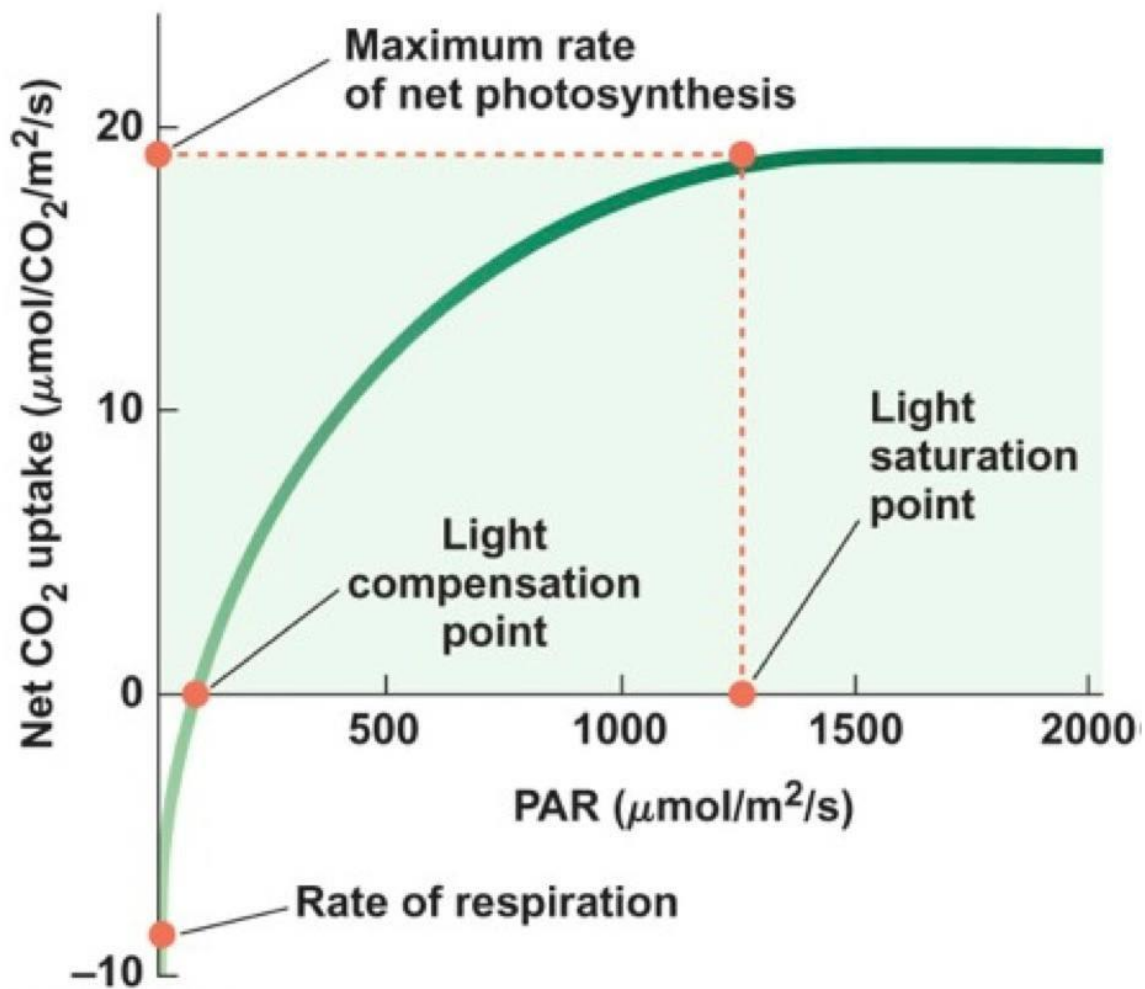


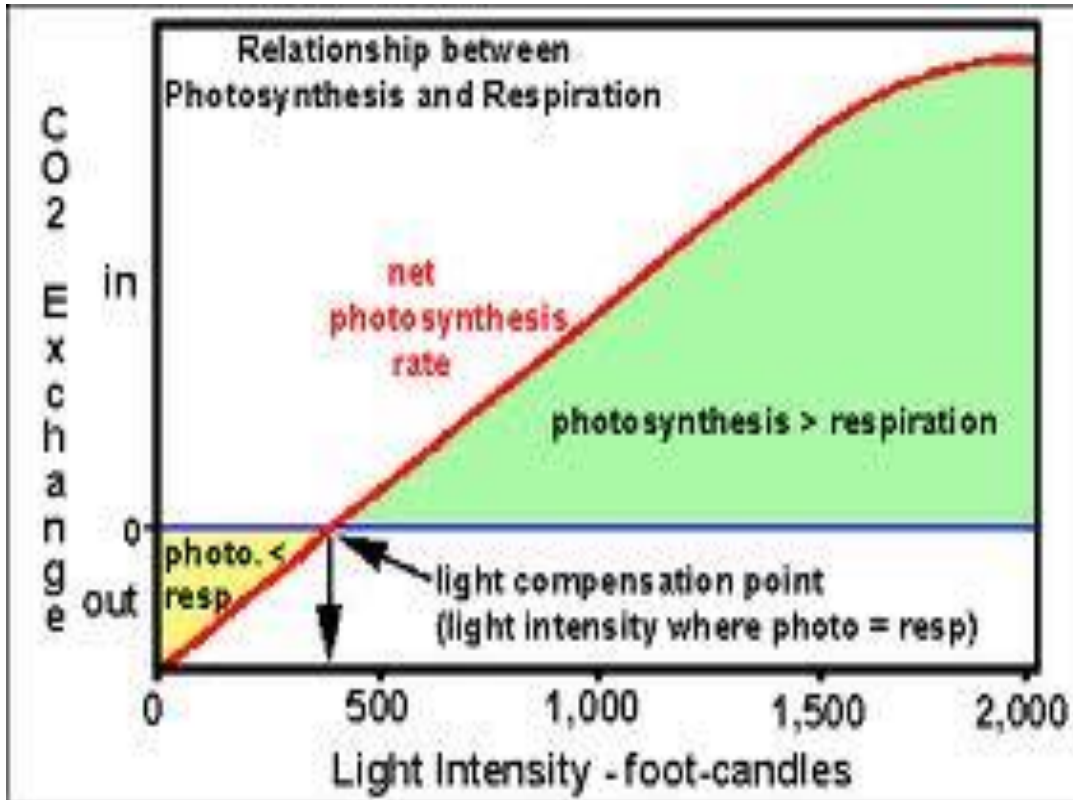
— ความเข้มแสง

- *light saturation point* (จุดอิ่มตัวแสง) = จุดที่เพิ่มความเข้มแสงแล้วอัตราการตรึง CO_2 สูงขึ้นเท่าเดิม
- *light compensation point* = จุดที่ความเข้มแสง ทำให้อัตราการ**ปล่อย** CO_2 จากการหายใจ

เท่ากับ อัตราการ**ตรึง** CO_2 จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (จุดตัดแกน X)

Photosynthesis = Cellular respiration

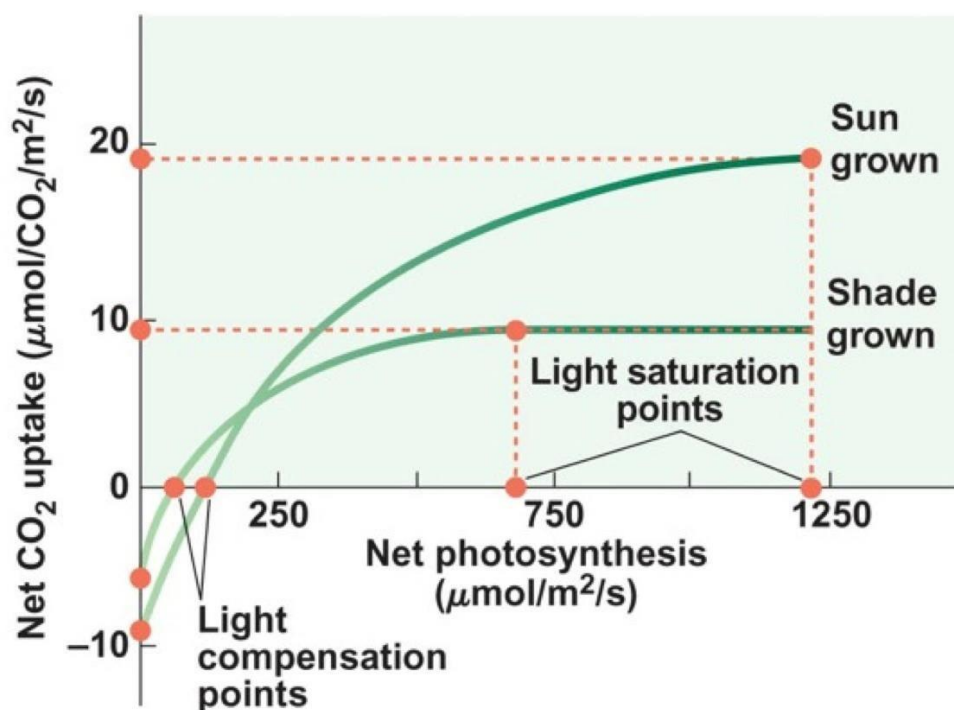




ทดสอบความเข้าใจ...

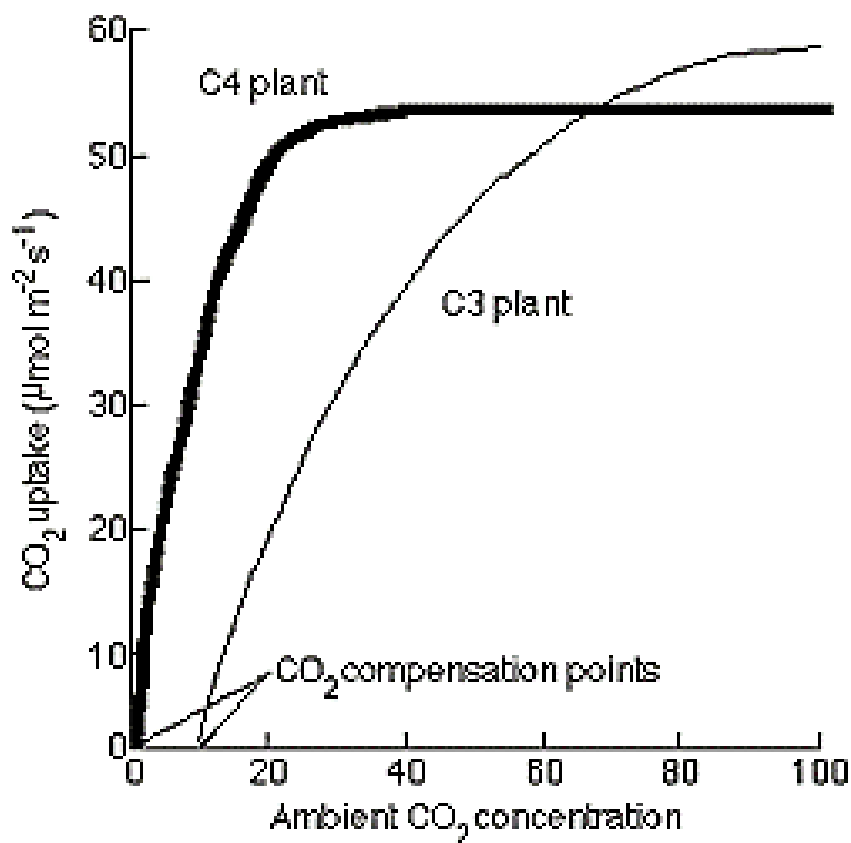
- ความเข้มแสงที่ต่ำกว่า Light compensation point ทำให้พืช.....
- ความเข้มแสงที่เท่ากับ Light compensation point ทำให้พืช.....
- ความเข้มแสงที่สูงกว่า Light compensation point ทำให้พืช.....

ผลจากความเข้มแสงในพืช C3 และ C4



– CO₂

- CO₂ saturation point = จุดที่เพิ่ม CO₂ แล้วอัตราการตรึง CO₂ สุกติเท่าเดิม
- CO₂ compensation point = จุดที่ CO₂ ทำให้อัตราการปล่อย CO₂ จากการหายใจ เท่ากับ อัตราการตรึง CO₂ จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (จุดตัดแกน X) ซึ่งเป็นจุดที่พืชมีอัตราการตรึง CO₂ สุกติเท่ากับศูนย์

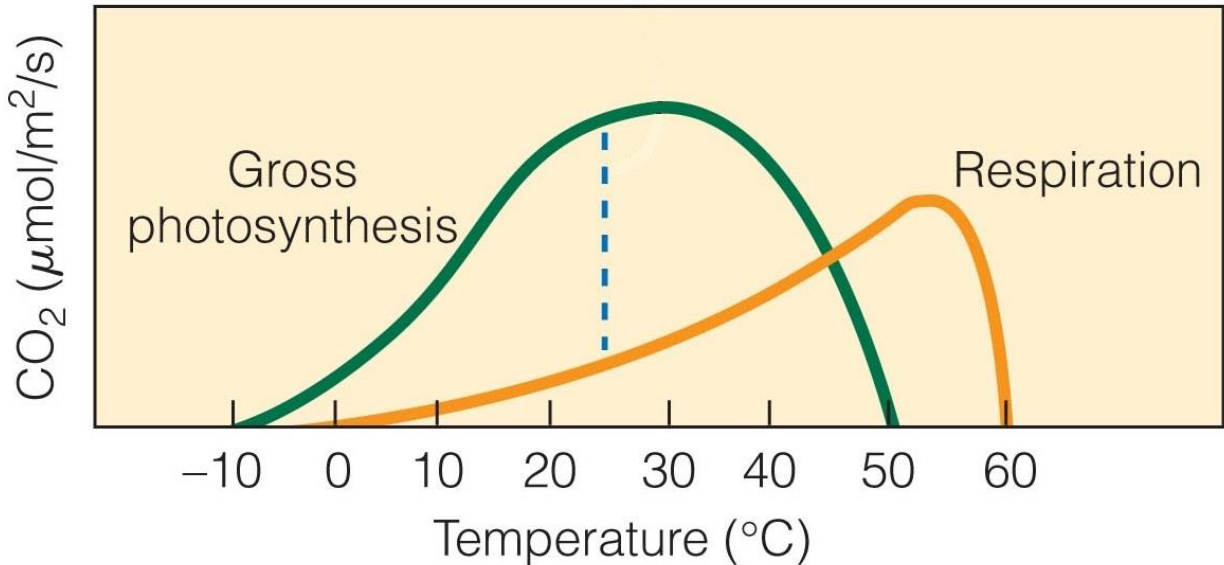


ความเข้มแสง	ปริมาณ CO ₂

ทดสอบความเข้าใจอีกนิด...

ภาพที่ 1

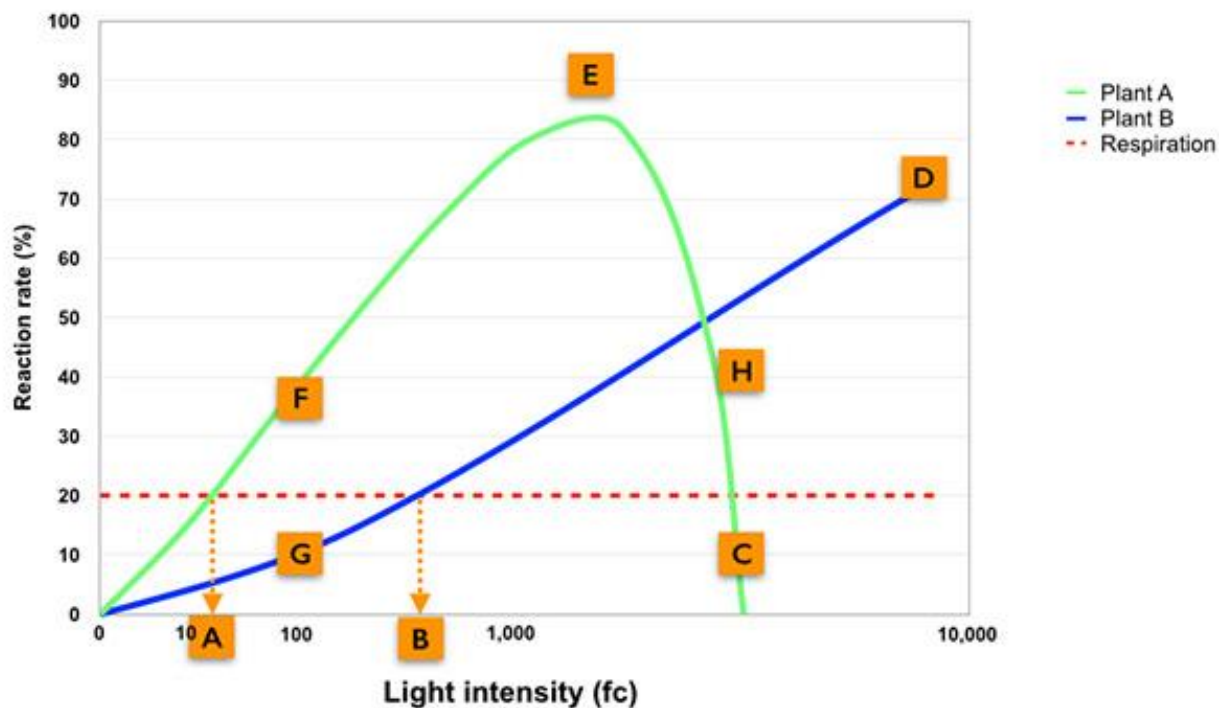
- 1) อุณหภูมิประมาณเท่าไรที่ทำให้พืชนี้ไม่มีการเจริญเติบโต แต่ยังมีชีวิตต่อไปได้.....



ภาพที่ 2

- 2) ความเข้มแสงที่ตำแหน่งใด ที่ทำให้พืช A ไม่มีการเจริญเติบโต แต่ยังมีชีวิตต่อไปได้.....
- 3) ความเข้มแสงที่ตำแหน่งใด ที่ทำให้พืช B ไม่มีการเจริญเติบโต แต่ยังมีชีวิตต่อไปได้.....
- 4) ความเข้มแสงที่ตำแหน่งใด ที่ทำให้พืช A และ B มีการสังเคราะห์แสงเท่ากัน.....

Photosynthesis and respiration rates compared in two plants



แบบฝึกหัด เรื่อง การสังเคราะห์ด้วยแสง

ตอนที่ 1

1. พืช C4 มีการตรึง CO₂ จากบรรยากาศ 2 ครั้ง ครั้งแรกที่ mesophyll และครั้งที่สองที่ bundle sheath (True/False)
2. นอกจากแสง, ปริมาณ CO₂ และอุณหภูมิแล้ว อายุใบ, ปริมาณน้ำที่ได้รับ และธาตุอาหาร ล้วนส่งผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของพืชทั้งสิ้น (True/False)
3. พืช C4 เป็นพืชไม่อิมแสง เพิ่มความเข้มแสงไปเรื่อยๆ ก็ไม่มีปัญหา (True/False)
4. พืช C3 ไม่มี bundle sheath cell (True/False)
5. ถ้าในปฏิกเอร์มีแต่น้ำกับ chloroplast ที่สกัดจากพืชดอก เพียงแค่เติมสาร 3 ชนิดคือ ATP, NADPH, และ CO₂ เท่านั้น ก็ทำให้เกิดน้ำตาลได้ (True/False)
6. ลำดับการลำเลียง e⁻ สามารถเขียนได้เป็น (True/False)

$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PSII} \rightarrow \text{PSI} \rightarrow \text{NADPH} \rightarrow \text{PGAL}$$
7. PGA เป็นน้ำตาลคาร์บอน 3 อะตอมตัวแรกที่ได้ใน Calvin cycle (True/False)
8. Chlorophyll เป็นรงควัตถุที่พบในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ทุกชนิด (True/False)
9. Photosynthesis เป็นกระบวนการที่พบในผู้ผลิตทุกชนิด (True/False)
10. Calvin cycle เหมือน Krebs cycle ตรงที่เกิด phosphorylation (True/False)
11. Photosynthesis กับ Photorespiration ต่างก็เป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน (True/False)
12. Carotenoids มีบทบาทสำคัญ เพราะนอกจากจะส่งผ่านพลังงานแล้ว ยังช่วยป้องกันอนุมูลอิสระที่เกิดจากแสงด้วย (True/False)
13. สิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่สังเคราะห์ด้วยแสงจะเพิ่ม O₂ ในบรรยากาศ (True/False)
14. Phycobilin พบเฉพาะในสาหร่ายสีแดงและสีเขียวแกมน้ำเงิน (True/False)
15. ถ้าให้น้ำที่มีอะตอมออกซิเจนกัมมันตรังสี (H₂¹⁸O) จะพบอะตอมนี้อีกทีในรูปสารอินทรีย์เมื่อพืชได้รับแสง (True/False)

ตอนที่ 2

1. ข้อใด ไม่ถูกต้อง เกี่ยวกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

- ก. เฉพาะพืชเท่านั้นที่สามารถเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้
- ข. ปากใบทำหน้าที่ให้ CO_2 ผ่านเข้าสู่ใบ และปล่อย O_2 ออกสู่อากาศ
- ค. ใบพืชมีสีเขียวเนื่องจากมีรงควัตถุดูดกลืนแสงสีเขียว
- ง. ออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำตาลกลูโคสได้มาจากโมเลกุลน้ำ

- 1) ก ข ค 2) ข ค ง 3) ก ค ง 4) ก ข ง

2. ข้อใด ไม่เป็นจริง เกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

- ก. ผลิตออกซิเจน กลูโคส และน้ำ
- ข. การลำเลียงอิเล็กตรอนจากน้ำไปให้โมเลกุลคลอโรฟิลล์
- ค. การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในตอนกลางวัน
- ง. เกิดที่ใบพืชเนื่องจากใบมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการรับแสงและแลกเปลี่ยนก๊าซ

- 1) ก ข 2) ค ง 3) ก ค 4) ข ง

3. นำคลอโรพลาสต์จากพืชใส่ในหลอดทดลองให้แสงและปัจจัยควบคุมที่เหมาะสม แล้วเติม

ADP, Pi และ NADP^+ ผลที่เกิดขึ้นคือข้อใด

- ก. น้ำตาลกลูโคส ข. ATP
- ค. NADPH ง. O_2

- 1) ก ง 2) ก ข ง 3) ข ค ง 4) ก ข ค ง

4. สิ่งมีชีวิตในข้อใดที่กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ไม่ได้เกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์

- 1) สาหร่ายสีน้ำตาล 2) สาหร่ายสีแดง
- 3) ไชยาโนแบคทีเรีย 4) ไดอะตอม

5. จากปฏิกิริยา $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{S}$ ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับปฏิกิริยานี้

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| ก. Autotroph | ข. พืชชั้นต่ำ |
| ค. แวน นีล | ง. แบคทีเรีย |
| จ. การสังเคราะห์ด้วยแสง | ฉ. โจเซฟ ปริสต์ลีย์ |
| ช. การหายใจ | |

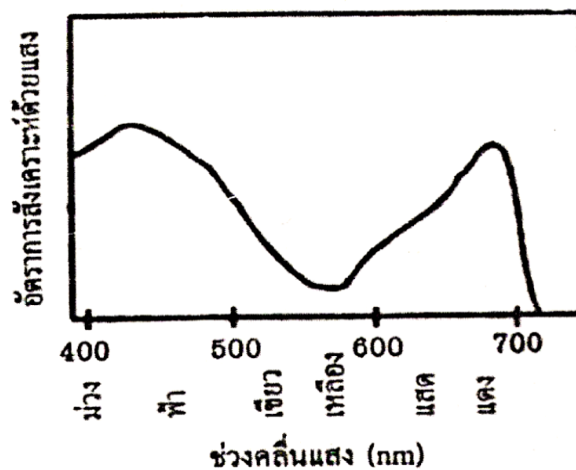
- 1) ก ข ค ง 2) ก ค ง จ 3) ข จ ฉ ช 4) ค ง ฉ ช

6. เมื่อผ่านแสงเข้าไปในของผสมที่มีคลอโรพลาสต์ ถ้าจะให้น้ำในของผสมนั้นแตกตัวเป็นออกซิเจนจะต้องใส่สารใด

- | | |
|--------------------|---------------------|
| ก. CO_2 | ข. เกลือเฟอร์รัส |
| ค. NADP^+ | ง. สารรับอิเล็กตรอน |

- 1) ก ข 2) ข ค 3) ก ค 4) ค ง

7. ข้อใดเป็นข้อสรุปจากกราฟแสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ช่วงคลื่นแสงต่างๆ ได้ถูกต้อง

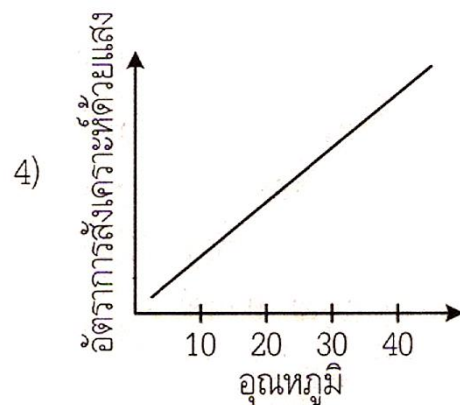
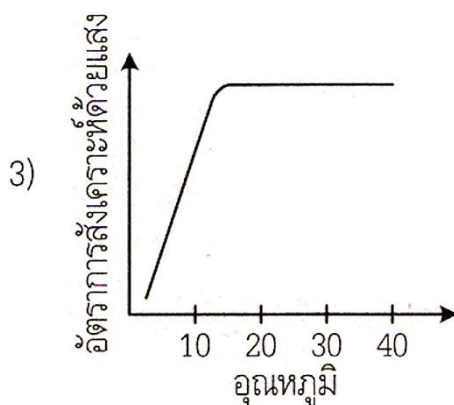
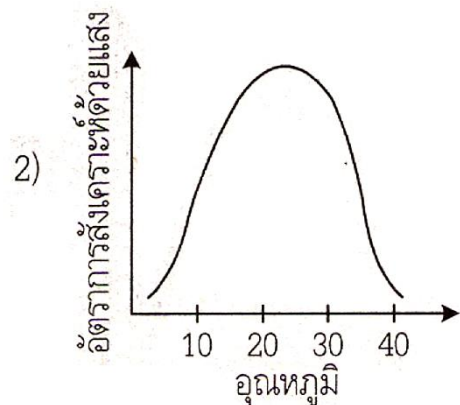
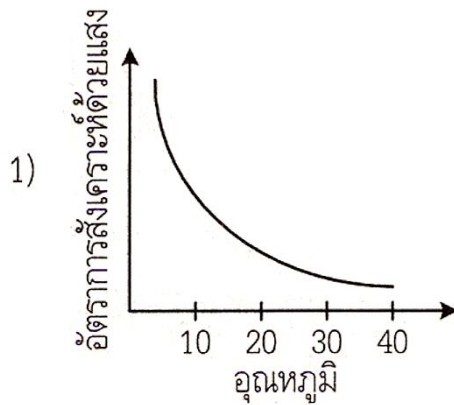


- 1) คลอโรฟิลล์ดูดแสงสีเขียวได้มากกว่าแสงสีแดง
- 2) พืชใช้แสงทุกสีที่ตามองเห็นได้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
- 3) แสงทุกสีใช้ได้ดีเท่าๆ กันในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
- 4) แสงสีเขียวจะทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีประสิทธิภาพสูงสุด

8. ถ้าเอาแสงไฟส่องสารละลายคลอโรฟิลล์ แสงความยาวคลื่น (nm) ในข้อใดจะส่องออกมา มากที่สุด

- 1) 400–500 2) 500–600 3) 600–700 4) 400–500 และ 600–700

9. กราฟใดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงกับอุณหภูมิได้ถูกต้อง



10. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับคลอโรฟิลล์

- ก. คลอโรฟิลล์เอ พบในพืชและสาหร่ายทุกชนิด
- ข. คลอโรฟิลล์เอ และบี พบในพืชและสาหร่ายทุกชนิด
- ค. คลอโรฟิลล์พบที่บริเวณเยื่อหุ้มชั้นในของคลอโรพลาสต์
- ง. คลอโรฟิลล์พบที่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์

1) ก ข

2) ข ค

3) ก ง

4) ข ง

11. แสงสีแดงและสีน้ำเงิน ก่อให้เกิดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงดีกว่าสีอื่นๆ เนื่องจากสาเหตุใด

- 1) แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินส่องมายังพื้นโลกมากกว่าแสงสีอื่นๆ
- 2) แคโรทีนอยด์ไม่สามารถดูดกลืนแสงสีแดงและน้ำเงิน
- 3) คลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินได้มากกว่าแสงสีอื่นๆ
- 4) พลังงานจากแสงสีแดงและสีน้ำเงิน สามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ATP synthase

12. ขนาดของโครงสร้างในข้อใดเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ที่สุดจนถึงเล็กที่สุด ได้ถูกต้องตามลำดับ

ก. Chloroplast

ข. Photosystem

ค. Thylakoid

ง. Granum

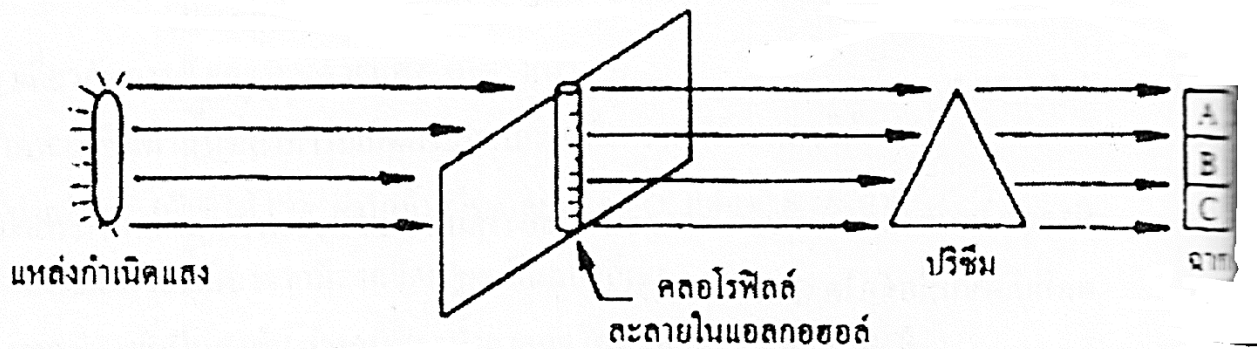
1) ก>ข>ค>ง

2) ง>ก>ค>ข

3) ก>ง>ค>ข

4) ก>ค>ง>ข

13. จากภาพถ้าวัดความเข้มแสงที่บริเวณฉากรับแสง บริเวณใดจะมีความเข้มของแสงน้อยที่สุด



1) A B

2) A C

3) B C

4) เฉพาะ B

14. ข้อใดบรรยายเกี่ยวกับระบบแสง II (Photosystem II) ได้ถูกต้อง

ก. มีตำแหน่งอยู่ในเยื่อไทลาคอยด์

ข. ทำหน้าที่สร้าง ATP

ค. ทำหน้าที่สร้าง $\text{NADPH} + \text{H}^+$

ง. ประกอบด้วยโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอและบี

1) ก ข

2) ข ค

3) ค ง

4) ก ง

15. ในกะหล่ำปลีสีม่วงสามารถสังเคราะห์แสงได้โดยใช้รงควัตถุใด

ก. คลอโรฟิลล์

ข. แคโรทีนอยด์

ค. แอนโทไซยานิน

1) ก ข

2) ข ค

3) ก ค

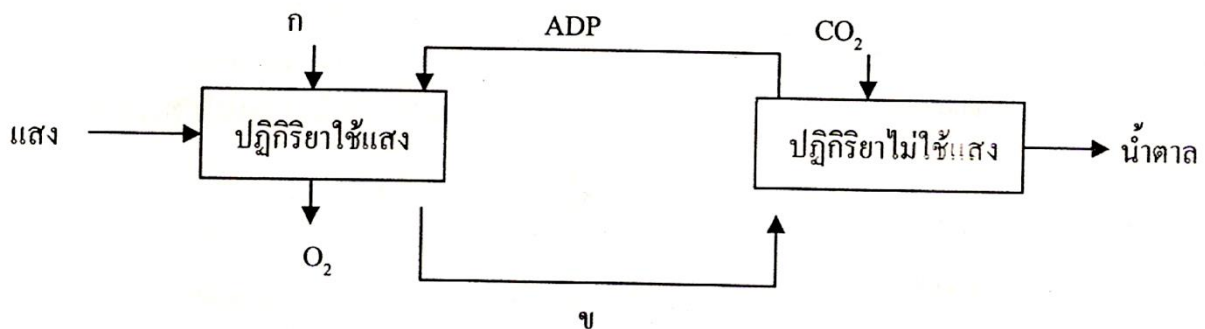
4) ก ข ค

16. ข้อใดถูกต้องเมื่อนำใบถั่วเขียวมาศึกษา

- ก. มีคลอโรฟิลล์ ซี และดี เป็นรงควัตถุเสริมในการรับพลังงานแสง
- ข. มีคลอโรฟิลล์เอ และบี ที่บริเวณไทลาคอยด์
- ค. มีแคโรทีนและแซโทฟิลล์ที่บริเวณไทลาคอยด์

- 1) ក ខ 2) ខ គ 3) ក គ 4) ក ខ គ

17. จากแผนภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สาร ก และ ข คือข้อใด



- 1) H₂O, PGA 2. H₂O, NADPH
3) CO₂, PGA 4) CO₂, NADPH

18. วัสดุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายสีแดงคือข้อใด

ข้อ	คผลอโรไฟล์ล์				แคโรทีนอยด์	ไฟโคบิลิน
	เอ	บี	ซี	ดี		
1.	+	+	-	-	-	+
2.	+	-	-	+	+	+
3.	-	-	+	+	+	+
4.	-	+	+	-	-	+

+ มีรังควัตถุ, - ไม่มีรังควัตถุ

19. สำหรับรายสี่เขียวและสำหรับรายสี่เขียวเกมน้ำเงินมีรางวัลฤดูชนิดใดใช้ในการเล่นการสังเคราะห์ด้วยแสงเหมือนกัน

- 1) คลอโรฟิลล์ เอ 2) คลอโรฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์
- 3) คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี 4) คลอโรฟิลล์ เอ, บี และแคโรทีนอยด์

20. คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จะพบที่ใด

- ก. เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์
- ข. เยื่อไทลาคอยด์
- ค. สโตรมา

- 1) ก 2) ข 3) ก ข 4) ข ค

21. ธาตุออกซิเจนในโมเลกุลของโปรตีนภายในเซลล์ในพืช ได้มาจากสารอะไร

- 1) CO_2 เท่านั้น 2) O_2 เท่านั้น 3) H_2O เท่านั้น 4) CO_2 และ H_2O เท่านั้น

22. ระบบแสง I และ II จะต้องร่วมกันทำงานเพื่อสร้างสารในข้อใด

- 1) ATP 2) NADPH 3) NADH 4) FADH_2

23. ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พลังงานแสงถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีไว้ในสารชนิดใด

- ก. ATP
- ข. NADPH
- ค. NADPH และ FADH_2

- 1) ก 2) ก ข 3) ข ค 4) ก ข ค

24. รงควัตถุชนิดใดที่พืชและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเหมือนกัน

- ก. คลอโรฟิลล์ เอ
- ข. คลอโรฟิลล์ บี
- ค. แคโรทีนอยด์

- 1) ก ข 2) ข ค 3) ก ค 4) ก ข ค

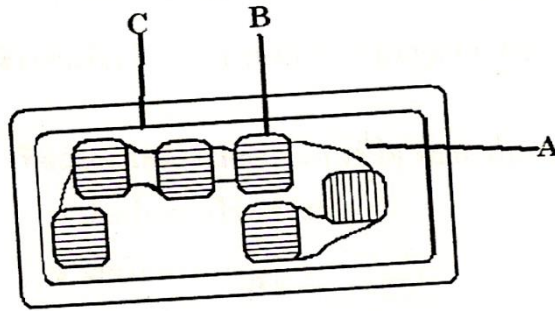
25. ในระยะแรกของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พลังงานแสงถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในสารประกอบใดบ้าง

- 1) NADH, ATP 2) NADH, FADH_2
3) FADH_2 , NADPH 4) NADPH, ATP

26. สารพวกใดที่ได้จากปฏิกิริยาที่ใช้แสง แล้วนำไปใช้ในปฏิกิริยาที่ไม่ใช้แสง

- | | |
|------------------------------|--|
| 1) ATP, NADH+H ⁺ | 2) O ₂ , NADP ⁺ , ATP |
| 3) ATP, NADPH+H ⁺ | 4) O ₂ , NADPH+H ⁺ , ATP |

27. กระบวนการผลิต NADPH จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นตรงบริเวณใด



- | | | | |
|------|------|--------|----------|
| 1) A | 2) B | 3) A B | 4) A B C |
|------|------|--------|----------|

28. การเกิดฟอสโฟริเลชันในปฏิกิริยาใช้แสง คล้ายกับที่เกิดขึ้นในระยะใดของการหายใจแบบใช้ออกซิเจน

- ก. ไกลโคไลซิส
- ข. วัฏจักรเครปส์
- ค. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน

- | | | | |
|---------------|---------------|--------|----------|
| 1) ก เท่านั้น | 2) ค เท่านั้น | 3) ก ค | 4) ก ข ค |
|---------------|---------------|--------|----------|

29. ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การแยกสลายโมเลกุลของน้ำเกิดขึ้นที่บริเวณใด

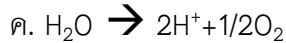
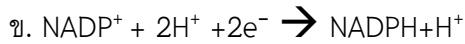
- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| 1) เยื่อหุ้มชั้นในของคลอโรพลาสต์ | 2) เยื่อไทลาคอยด์ |
| 3) ระบบแสง I | 4) ระบบแสง II |

30. กลไกการสร้าง ATP ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงคล้ายคลึงกับกลไกการหายใจในข้อใด

- ก. การสังเคราะห์ ATP การถ่ายทอดอิเล็กตรอน
- ข. การสร้าง ATP ในเมทริกซ์
- ค. การสร้าง ATP ในไซโตพลาสซึม

- | | | | |
|------|------|--------|----------|
| 1) ก | 2) ข | 3) ก ข | 4) ก ข ค |
|------|------|--------|----------|

31. ปฏิกริยาเคมีในข้อใดเกิดขึ้นเฉพาะในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร



1) ก ข

2) ข ค

3) ก ค

4) ก ข ค

32. ถ้าเจาะ thylakoid ทำให้สารภายในไหลออกมาปนกับ stroma จะมีผลโดยตรงกับกระบวนการใด

1) การแยกน้ำ

2) การสร้าง ATP

3) การดูดพลังงานแสงอาทิตย์

4) การไหลของอิเล็กตรอนจากระบบแสง II ไปยังระบบแสง I

33. ข้อใดถูกต้องสำหรับปฏิกิริยาแสง (light reaction)

1) กลุ่มโปรตีนสำคัญในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสงมีเพียง 2 กลุ่ม คือระบบแสง I และแสง II

2) คลอโรฟิลล์ทุกโมเลกุลในระบบแสง สามารถเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสง หากได้รับความยาวคลื่นที่เหมาะสม

3) ATP synthase ที่อยู่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสร้าง ATP ในปฏิกิริยาแสง

4) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรทำให้ได้ NADH

34. ปฏิกริยาและโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ในข้อใด มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันถูกต้อง

ข้อ	ปฏิกิริยาของฮิลล์	การถ่ายทอดอิเล็กตรอน	การตรึง CO_2 ของพืช C_3
1.	ไทลาคอยด์	เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์	สโตรมา ไทลาคอยด์
2.	กรานัม	เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์	สโตรมา ไทลาคอยด์
3.	ไทลาคอยด์	เยื่อไทลาคอยด์	สโตรมา
4.	กรานัม	เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์	สโตรมา

35. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในข้อใดถูกต้องสำหรับพืช C_3

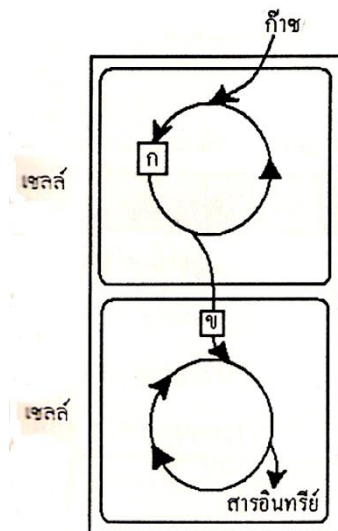
ข้อ	การผลิต NADPH	การตรึง CO_2
1.	เกิดตอนกลางวัน	เกิดตอนกลางคืนเท่านั้น เพราะไม่ต้องการแสงสว่าง
2.	เกิดตอนกลางวัน	เกิดตอนกลางวันเท่านั้น
3.	เกิดตอนกลางวัน	เกิดในช่วงมีแสงหรือไม่มีแสงก็ได้ ถ้ามี ATP และ NADPH พอเพียง
4.	เกิดตอนกลางวันและกลางคืน	เกิดทั้งตอนกลางวันและกลางคืน

42. การสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวโพดและทานตะวันแตกต่างกันในข้อใด

- ก. ผลิตภัณฑ์ตัวแรกจากการตรึง CO_2 จากบรรยากาศ
 ข. สารที่ใช้ในการตรึง CO_2
 ค. เซลล์ที่มีการตรึง CO_2 จากบรรยากาศ

- 1) ก ข 2) ข ค 3) ก ค 4) ก ข ค

43. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับปฏิกิริยาไมใช้แสงของพืชตามภาพ



ข้อ	พืช	สารอินทรีย์ที่ผลิตได้
1.	อ้อย	น้ำตาล 3C
2.	ข้าวโพด	น้ำตาล 6C
3.	สับปะรด	น้ำตาล 4C
4.	ข้าวฟ่าง	น้ำตาล 5C

 44. ข้อใดไม่เป็นจริงเกี่ยวกับพืช C_4

- ก. มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงกว่าพืช C_3
 ข. มีความเข้มข้นของ CO_2 ในเซลล์บันเดิลชีทมากกว่าที่เซลล์มีไซฟิลล์ของพืช C_3
 ค. มีการตรึง CO_2 จากอากาศทั้งที่บริเวณมีไซฟิลล์และบันเดิลชีท
 ง. ใช้ RuBP caboxylase ตรึง CO_2 จากอากาศ

- 1) ก ข 2) ค ง 3) ก ข ค 4) ข ค ง

45. พืชข้อใดที่มีสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม และคาร์บอน 5 อะตอม ทำหน้าที่ในการตรึง

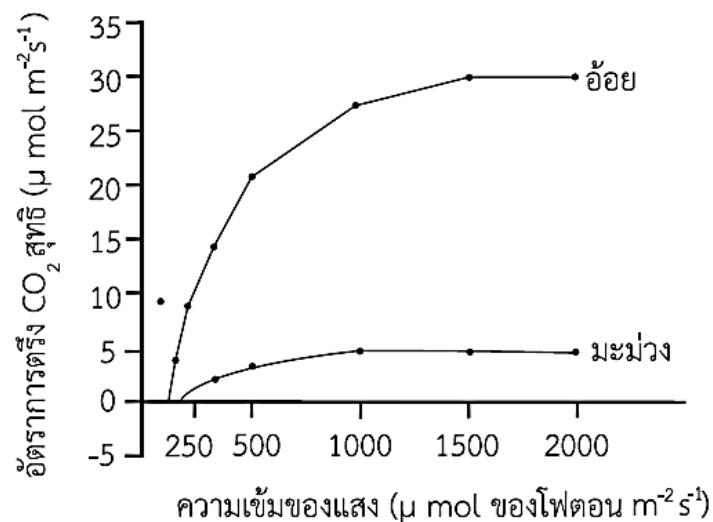
CO_2

- 1) ข้าว ข้าวสาลี 2) ข้าวสาลี อ้อย
 3) ข้าวฟ่าง อ้อย 4) ข้าวฟ่าง ข้าวไร้ต

50. ข้อใดถูกสำหรับปฏิกิริยาแสง

- 1) อิเล็กตรอนที่ถ่ายทอดจากระบบแสง I สู่ระบบแสง II ผ่านตัวรับอิเล็กตรอนหลายตัว จะมีพลังงานลดลงเป็นลำดับ
- 2) เมื่อคลอโรฟิลล์ A โมเลกุลพิเศษที่เป็นศูนย์กลางของปฏิกิริยาแสงส่งอิเล็กตรอนให้ตัวรับอิเล็กตรอนแล้วจะมีการส่งต่อให้ตัวรับอิเล็กตรอนอื่นอีกหลายตัว
- 3) ในลูเมนของไทลาคอยด์ของกรานามีการสะสมโปรตอนมากขึ้นจนเกิดความแตกต่างของปริมาณโปรตอนในลูเมนและในสโตรมาทำให้เกิดการสังเคราะห์ ATP ภายในลูเมน
- 4) ระหว่างปฏิกิริยาแสง สารที่สะสมอยู่บนเยื่อไทลาคอยด์คือ คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ แต่สารที่สะสมอยู่ในลูเมนของไทลาคอยด์ คือ อิเล็กตรอนที่ได้จากการแตกตัวของน้ำ

51. ข้อใดเป็นข้อสรุปที่ได้จากกราฟ



- 1) อ้อยมีค่าไคท์คอมเพนเซชันพอยท์สูงกว่ามะม่วง
- 2) มะม่วงมีจุดอิ่มตัวของแสงประมาณ $1,200 \mu\text{mol}$ ของโฟตอน $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 3) อ้อยมีจุดอิ่มตัวของแสงประมาณ $100 \mu\text{mol}$ ของโฟตอน $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 4) ความเข้มของแสงที่มากกว่า $1,500 \mu\text{mol}$ ของโฟตอน $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะไม่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการตรึง CO_2 สุทธิของอ้อย

52. สารชนิดหนึ่ง มีฤทธิ์ยับยั้งกระบวนการแตกตัวของน้ำ กระบวนการใดที่สามารถเกิดต่อไปได้

- 1) การเกิด O_2
- 2) การตรึง CO_2 (calvin cycle)
- 3) การสร้าง ATP
- 4) การรับอิเล็กตรอนของ NADP^+