

### หน่วยที่ 4 การสังเคราะห์ด้วยแสง

ในระบบนิเวศพืชทำหน้าที่เป็นผู้ผลิต (Producer) จึงเป็นตัวเปลี่ยนสารอนินทรีย์ให้เป็นสารอินทรีย์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งอาศัยคลอโรฟิลล์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และแสง เป็นปัจจัยสำคัญ

#### 4.1 การศึกษาที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

| ที่ | ปี ค.ศ.      | นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษา                  | การค้นพบ                                             |
|-----|--------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1   | ศตวรรษที่ 17 | Jean Van Helmont<br>( แวน เฮลมอนท์ )    | พบว่า น้ำหนักต้นหลิว ที่เพิ่มขึ้น มาจากน้ำ ไม่ใช่ดิน |
| 2   | ศตวรรษที่ 18 | Joseph Priestley                        | .....                                                |
| 3   | ศตวรรษที่ 18 | Jan Ingenhousz                          | .....                                                |
| 4   | ศตวรรษที่ 18 | Jean Senebier                           | .....                                                |
| 5   | ศตวรรษที่ 19 | Nicolas de Soussure                     | .....                                                |
| 6   | ศตวรรษที่ 19 | Joseph Pelletier and<br>Joseph Caventou | .....                                                |
| 7   | ศตวรรษที่ 19 | Robert Mayer                            | .....                                                |
| 8   | ศตวรรษที่ 19 | Julius Sachs                            | .....                                                |
| 9   | ศตวรรษที่ 19 | Jean Baptiste Bossingault               | .....                                                |
| 10  | ศตวรรษที่ 20 | Richard Willstatter                     | .....                                                |
| 11  | ศตวรรษที่ 20 | Ernst Munch                             | .....                                                |
| 12  | ศตวรรษที่ 20 | Cornelius Van Niel                      | .....                                                |
| 13  | ศตวรรษที่ 20 | Robin Hill                              | .....                                                |

| ที่ | ปี ค.ศ.      | นักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษา                     | การค้นพบ       |
|-----|--------------|--------------------------------------------|----------------|
| 14  | ศตวรรษที่ 20 | Sam Ruben and Martin Kamen                 | .....<br>..... |
| 15  | ศตวรรษที่ 20 | Melvin Calvin                              | .....<br>..... |
| 16  | ศตวรรษที่ 20 | Albert Frenkel                             | .....<br>..... |
| 17  | ศตวรรษที่ 20 | Daniel Arnon                               | .....<br>..... |
| 18  | ศตวรรษที่ 20 | Manuel Losada, Achim Trebst and co-workers | .....<br>..... |
| 19  | ศตวรรษที่ 20 | Robert Emerson and Eugene Rabinowitch      | .....<br>..... |
| 20  | ศตวรรษที่ 20 | Robin Hill & Fay Bendall                   | .....<br>..... |

### แบบฝึกหัดทบทวน การศึกษาค้นคว้ากระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

คำสั่ง ให้นักเรียนนำชื่อนักวิทยาศาสตร์ ไปเติมในช่อง แต่ละข้อที่มีข้อความสัมพันธ์กับการศึกษาค้นคว้าของนักวิทยาศาสตร์ดังกล่าว

|              |                  |                 |                 |                               |
|--------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| แวน เฮลมอนท์ | โจเซฟ ปริสต์ลีย์ | เจนนี อีเจน ฮูซ | ซินนิเยร์       | นิโคลาส ชีโอดอร์ โซซูร์       |
| เอนเกลมัน    | แวน นิล          | โรบิล ฮิลล์     | แดเนียล อาร์นอน | จูเลียส ซาซ                   |
|              |                  |                 |                 | แซมมวล รูเบน และมาร์ติน คามัน |

1. น้ำหนักของต้นหลิวมาจาก  $H_2O$ .....
2. ทดลองใช้ ADP, หมู่ฟอสเฟต,  $NADP^+$ ,  $CO_2$  และแสงใส่ลงไปในคลอโรพลาสต์ที่สกัดมาได้ จนเกิดปฏิกิริยา สังเคราะห์ด้วยแสงและได้น้ำตาล เกิดขึ้น.....
3. พิสูจน์ว่าอากาศเสีย คือ  $CO_2$  อากาศดี คือ  $O_2$  โดยพืชรับ  $CO_2$  จากอากาศเข้าไป และปล่อย  $O_2$  ออกมาโดยมีปัจจัยแสงมาเกี่ยวข้อง.....
4. แสดงให้เห็นว่า NADPH และ ATP เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง .....
5. วิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ได้ คือ คาร์โบไฮเดรต .....
6. ศึกษาแบบคทีเรียบางสปีชีส์ สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้โดยไม่ใช้น้ำ แต่ใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ).....
7. ทดลองใช้ออกซิเจนที่เป็นสารกัมมันตรังสี ( $O^{18}$ ) แทน  $O^{16}$  (ออกซิเจนปกติ) .....
8. ทำการทดลอง ฉายแสงเข้าไปในของผสม ซึ่งมีคลอโรพลาสต์ที่สกัดออกมาจากใบของพืชพวกผักโขม โดยเติม  $Fe^{3+}$  (เฟอร์ริก) พบว่าเปลี่ยนเป็น  $Fe^{2+}$  เฟอร์รัส รวมทั้งเกิดออกซิเจนด้วย .....
9. อากาศเสีย เปลี่ยนเป็นอากาศดีโดยพืชสีเขียว.....
10. สรุปว่า แสงสีแดง และแสงสีน้ำเงิน ให้ผลดีที่สุดในการสังเคราะห์ด้วยแสง .....

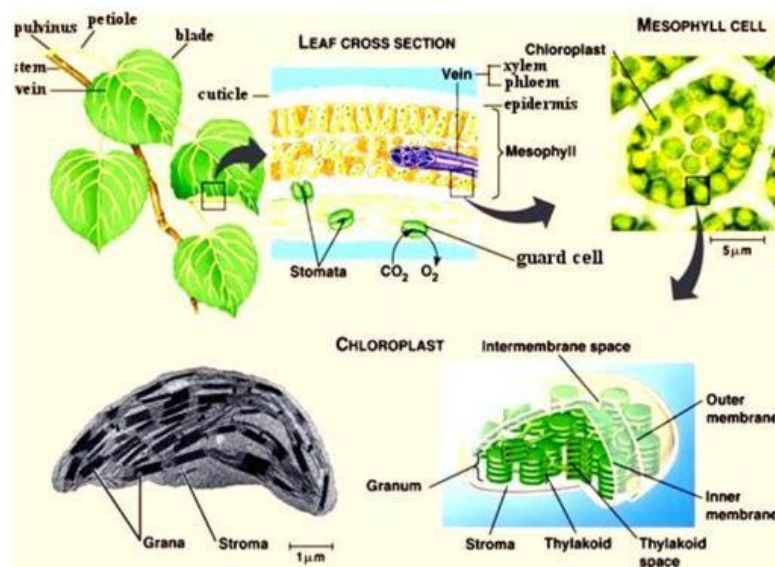
ชีววิทยา ม.5 โดยครูชีววิทยา โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี

## ความรู้เบื้องต้นก่อนศึกษาเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

### ❖ คลอโรพลาสต์(Chloroplast)

คลอโรพลาสต์(chloroplast) เป็นออร์แกเนลที่พบได้ทั่วไปในเซลล์พืชและมีความสำคัญ เพราะกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์

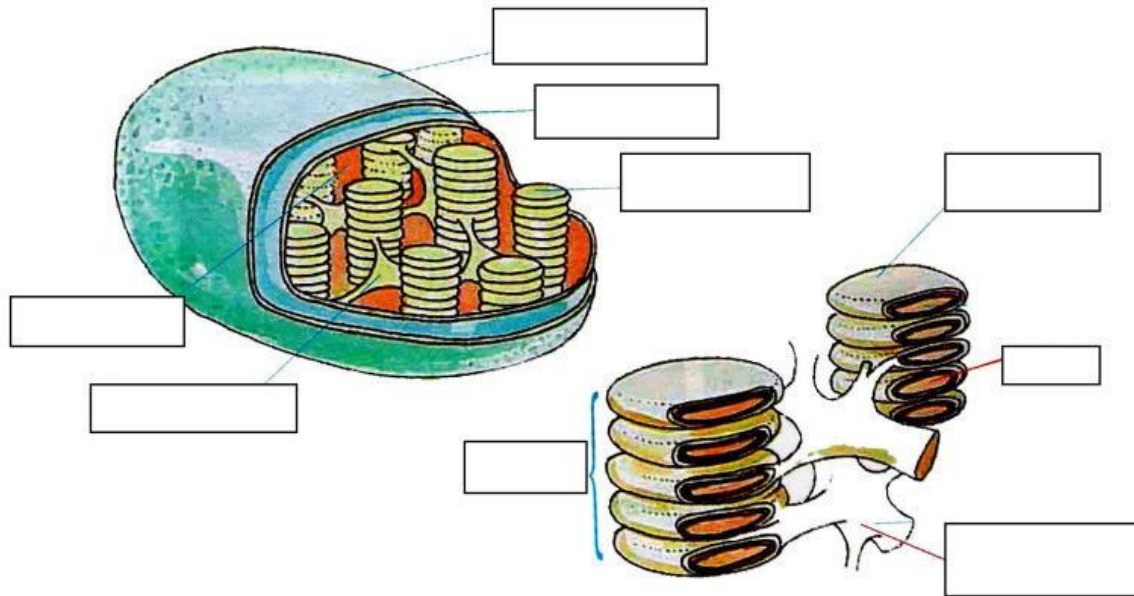
คลอโรพลาสต์(chloroplast)กระจายอยู่ทั่วไปในไซโทพลาซึมของเซลล์พืช แต่มักอยู่รวมกันแน่นมากรอบ ๆ นิวเคลียสหรืออยู่ใต้เยื่อหุ้มเซลล์ การเรียงตัวของคลอโรพลาสต์อาจแตกต่างกันไปตามปริมาณแสง ขนาดของคลอโรพลาสต์(chloroplast)แตกต่างกันตามชนิดของเซลล์ โดยทั่วไปมักมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-10 ไมโครเมตร หนา 2-3 ไมโครเมตร หรือยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร กว้าง 2-3 ไมโครเมตร หนา 1-2 ไมโครเมตร จำนวนคลอโรพลาสต์แตกต่างกันตามชนิดของพืช และต่างกันไปในแต่ละเซลล์ขึ้นกับการทำงานของเซลล์นั้น ๆ สาหร่ายมักมีคลอโรพลาสต์ขนาดใหญ่ 1 อัน แต่เซลล์พืชชั้นสูงอาจมี 20-40 คลอโรพลาสต์ต่อเซลล์



### โครงสร้างของคลอโรพลาสต์

ประกอบด้วย เยื่อหุ้ม 2 ชั้น ซึ่งเป็นยูนิตเมมเบรน (unit-membrane) ที่ประกอบด้วยฟอสโฟลิพิด และโปรตีน คือ เยื่อชั้นนอก (Outer membrane) และเยื่อชั้นใน (Inner membrane) คล้ายของไมโทคอนเดรีย เยื่อชั้นนอกมีลักษณะเรียบเป็นตัวควบคุมการผ่านของสารในไซโทพลาซึมกับใน คลอโรพลาสต์ เยื่อชั้นในขนาบกับเยื่อชั้นนอก และมีส่วนที่ยื่นเข้าเข้าข้างใน กลายเป็นลามลลา (Lamella) ลามลลาเป็นเยื่อบาง ๆ เรียงซ้อนกันและขนาบกันเป็นแผ่นซึ่งลอยอยู่ในช่องเหลวที่เรียกว่า สโตรมา(stroma) หรือเมทริกซ์ (matrix) ซ้อนกันเป็นตั่งเรียกทั้งตั่งว่า กรานุม (granum) หลาย ๆ กรานุมเรียกว่า กรานา (grana) และเรียกลามลลาแต่ละแผ่นในกรานุมว่า ไทลาคอยด์ (thylakoid) ในแต่ละกรานุมจะมีแผ่นไทลาคอยด์ตั่งแต่ 10-100 แผ่น ซึ่งจำนวนจะแตกต่างกันตามชนิดของสิ่งมีชีวิต เช่น สาหร่ายสีแดง มีไทลาคอยด์แผ่นเดียว สาหร่ายสีเขียวแกมเหลืองหรือน้ำตาลแกมเหลือง (คริส์โซไฟตา , Chrysophyta, พวกไดอะตอม , Diatom) มีไทลาคอยด์เป็นคู่

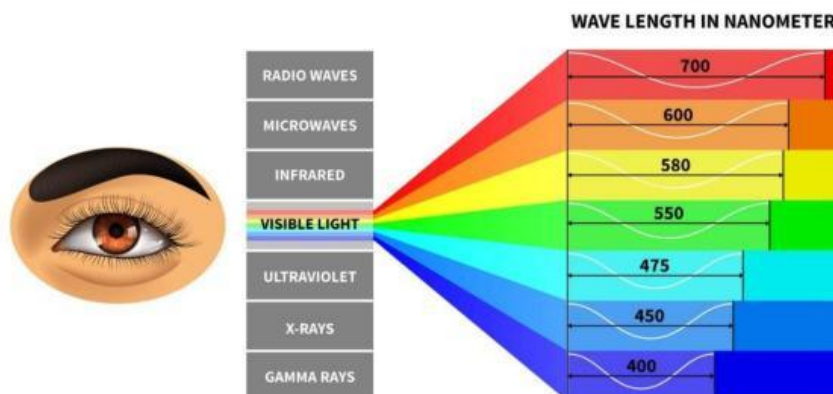
จำนวนกรานามีตั้งแต่ 40-60 อันใน 1 คลอโรพลาสต์ กรานามีส่วนของเมมเบรนยื่นออกไปเชื่อมกับกรานาอื่น ส่วนที่เชื่อมกันนี้เรียกว่า สโตรมาลามลลา (stroma lamella) หรืออินเตอร์กรานุลามลลา (Intergrana lamella) หรือ เฟร็ต (Fret)



## ❖ พลังงานแสง

แสง(light) เป็นรังสีในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic wave) และมีสมบัติเป็น อนุภาค (particle) เรียกว่า โฟตอน(.....) โดยระดับพลังงานของโฟตอน จะแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสง

$$\text{ระดับพลังงานโฟตอน} = \frac{1}{\text{ความยาวคลื่นแสง}}$$

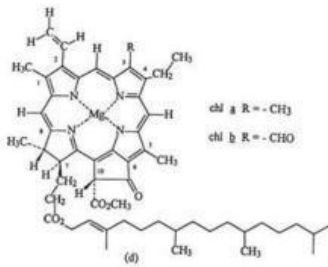


รู้หรือไม่ ?

แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (.....) เป็นแสงที่มีความยาวช่วงคลื่น .....นาโนเมตร

## ❖ สารสี (pigment)

สารสี(.....) ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานแสง โดยในสิ่งมีชีวิตพบสารสี หลายกลุ่มดังนี้



**1.คลอโรฟิลล์(.....)** ดูดแสงสีน้ำเงินและสีแดงได้มากที่สุด แต่คลอโรฟิลล์ดูดแสงสีเขียวได้น้อยมาก เราจึงเห็นคลอโรฟิลล์เป็นสีเขียว คลอโรฟิลล์อยู่ที่ไทลาคอยด์เมมเบรนธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างคลอโรฟิลล์คือ.....

**2.แคโรทีนอยด์ (.....)** พบในเนื้อเยื่อพืชที่มีสีเหลือง ส้ม แดง อยู่ร่วมกับคลอโรฟิลล์ในไทลาคอยด์เมมเบรน ดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน (400 – 500 nm) แล้วถ่ายทอดพลังงานให้คลอโรฟิลล์และปกป้องคลอโรฟิลล์ไม่ให้ถูกทำลาย โดยอะตอมของออกซิเจนที่เป็นอนุมูลอิสระ

**3.ไฟโคบิลิน (.....)** เป็นรงควัตถุเสริมที่พบในสาหร่ายสีน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง แบ่งเป็นไฟโคอีริทริน ซึ่งดูดแสงสีเขียว และไฟโคไซยานินดูดแสงสีส้มแดง

**4.แบคทีรีโอคลอโรฟิลล์ (.....)** เป็นรงควัตถุที่พบในกลุ่มแบคทีเรียที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้

ตารางแสดงรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ

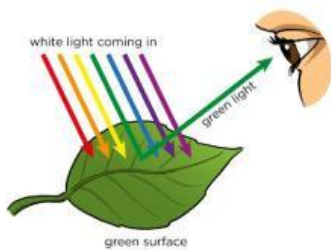
|                 | คลอโรฟิลล์ |   |   |   | แคโรทีนอยด์ | ไฟโคบิลิน | แบคทีรีโอคลอโรฟิลล์ |   |   |        |
|-----------------|------------|---|---|---|-------------|-----------|---------------------|---|---|--------|
|                 | a          | b | c | d |             |           | a                   | b | c | d      |
| กรีนแบคทีเรีย   | -          | - | - | - | +           | -         | +                   | - | + | หรือ + |
| ไซยาโนแบคทีเรีย | +          | - | - | - | +           | +         |                     |   |   |        |
| สาหร่ายสีแดง    | +          | - | - | + | +           | +         |                     |   |   |        |
| สาหร่ายสีน้ำตาล | +          | - | + | - | +           | -         |                     |   |   |        |
| สาหร่ายสีเขียว  | +          | + | - | - | +           | -         |                     |   |   |        |
| มอส             | +          | + | - | - | +           | -         |                     |   |   |        |
| เฟิน            | +          | + | - | - | +           | -         |                     |   |   |        |
| พืชมีดอก        | +          | + | - | - | +           | -         |                     |   |   |        |

หมายเหตุ + หมายถึง มี - หมายถึง ไม่มี

## คำถาม

- 1.รงควัตถุ ชนิดใดพบในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด .....
- 2.สาหร่ายสีแดง สาหร่ายสีน้ำตาล และสาหร่ายสีเขียว มีคลอโรฟิลล์ใดเหมือนและต่างกันอย่างไร.....
- 3.ไฟโคบิลิน พบในสิ่งมีชีวิตชนิดใดบ้าง.....

### ทำไมคลอโรฟิลล์จึงเป็นสีเขียว

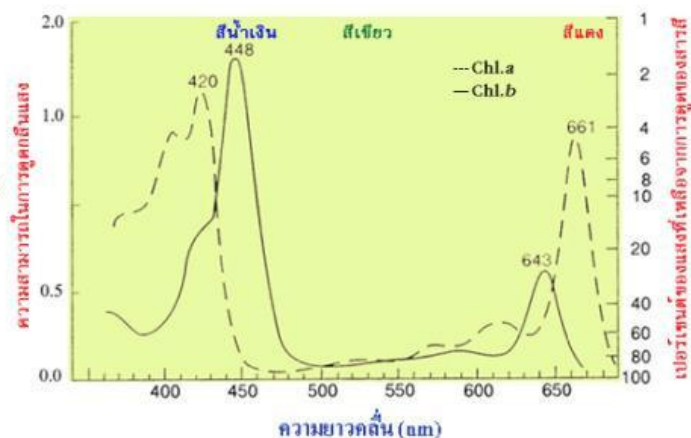
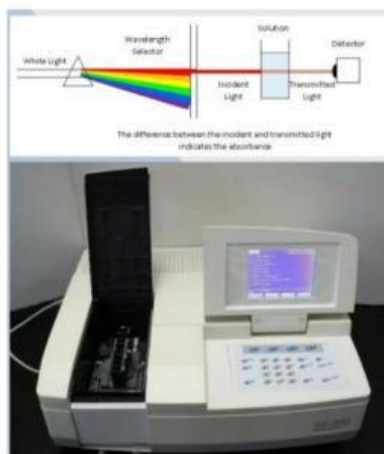


สเปกตรัมของทั้งคลอโรฟิลล์ a และ b มีส่วนที่เป็นยอด หมายถึงดูดแสงได้ดีคือ ช่วงแสงสีน้ำเงิน ที่ความยาวคลื่นประมาณ 420-460 nm และ แสงสีแดง ที่มีความยาวคลื่น ในช่วง 630-660 nm และมีการดูดแสงได้ไม่ดีในช่วงคลื่น 480-620 nm ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงสีเขียว-เหลือง พืชจะดูดแสงสีน้ำเงินและแดงไว้ได้หมดหรือเกือบหมด ส่วนแสงสีเขียว-เหลืองจะถูกสะท้อนออกไปหรือทะลุผ่านใบไม้ไป ดังนั้น คลอโรฟิลล์ จึงมี สีเขียว

### ❖ การดูดกลืนแสงของสารสี

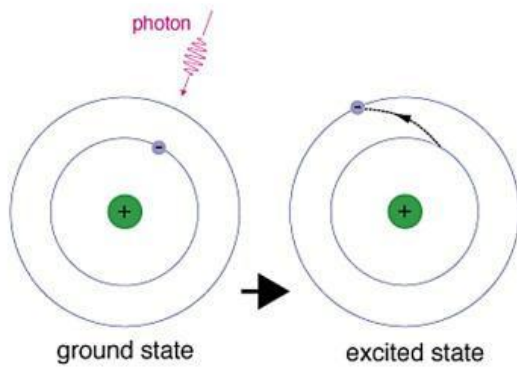
สเปกตรัม (spectrum) ของสารคือการแสดงความสามารถในการดูดแสงของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมของสารที่มีสีจึงเป็นกราฟที่มียอด มีเนินมีที่ราบและเหวที่แสดงว่าที่ความยาวคลื่นใด สารตัวนั้นๆ ดูดแสงได้ดีเพียงใด ยอดที่สูง ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ แสดงถึงความสามารถในการดูดแสงที่ความยาวคลื่นนั้นที่ราบหรือเหว แสดงถึงความสามารถดูดแสงที่ต่ำ การวัดสเปกตรัมของสารทำได้โดยใช้ เครื่อง spectrophotometer



### เกิดอะไรขึ้น เมื่อรังควัดดูดกลืนแสง

รังควัดต่าง ๆ ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงหรือโฟตอน ที่ความยาวคลื่นแสงต่างกัน พลังงานของโฟตอนแปรผันกลับกับความยาวคลื่น ถ้าแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นยาว แสงที่มีพลังงานสูงมาก จะทำให้พันธะเคมีของรงควัตถุแตกตัวออกและปล่อยอิเล็กตรอนออกเป็นอิสระ แต่ถ้าแสงนั้นมีพลังงานน้อยจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนเท่านั้น

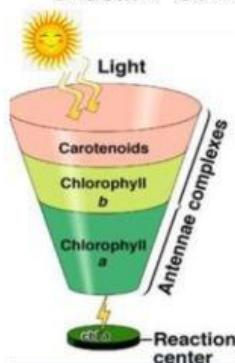


เมื่อรังสีควอดูกกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตาคนเรามองเห็น จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพปกติ(Ground state) ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงมากขึ้น และเคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้น (Higher - energy orbital) อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงขึ้นเรียกว่า อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพเร่งเร้า (Excite eletron)

พลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับสูง เรียกว่าพลังงานเร่งเร้า (Excitation energy) พลังงานเร่งเร้านี้ไม่คงตัว และอาจสูญเสียในรูป ก) ความร้อน หรือ ข) เปลี่ยนเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าเดิม จึงเกิดการเรืองแสง (Fluorescence) หรือ ค) ส่งต่อพลังงานไปยังโมเลกุลของ รังควัตถุที่อยู่ติดกันเป็นทอด ๆ จนถึงศูนย์กลางปฏิกิริยาซึ่งมีคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ ทำให้คลอโรฟิลล์ เอ ที่ศูนย์กลางปฏิกิริยาได้รับพลังงานจนอิเล็กตรอนในคลอโรฟิลล์ เอ หลุดออกมา อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้จะมีตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) มารับอิเล็กตรอน ดังการทดลองของแดเนียล อาร์โนน ที่พบว่า  $\text{NAD}^+$  เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาพที่มีคลอโรพลาสต์ และได้ NADPH เกิดขึ้น

#### ❖ ระบบแสง (Photosystem : PS)

ระบบแสง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ



ก) แอนเทนนาคอมเพล็กซ์(.....) ประกอบด้วย **แคโรทีนอยด์** **คลอโรฟิลล์ b** และ **คลอโรฟิลล์ a** ตามลำดับ ทำหน้าที่จับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และส่งต่อพลังงาน ต่อกันจนถึงศูนย์กลางปฏิกิริยา(reaction center)

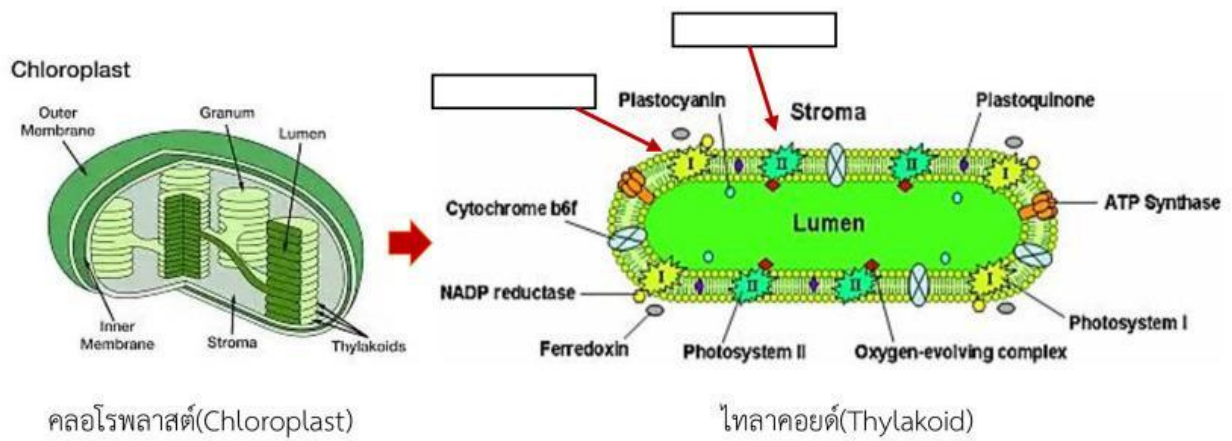


ข) ศูนย์กลางปฏิกิริยา(.....) ประกอบด้วย**คลอโรฟิลล์ เอ** **โมเลกุลพิเศษ 1** คู่ ทำหน้าที่รับพลังงานโฟตอน และถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพเร่งเร้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอนที่อยู่นอกคลอโรฟิลล์

#### ชนิดของระบบแสง

ระบบแสง(PS) อยู่ที่เยื่อไทลาคอยด์(thylakoid membrane) มี 2 ชนิด ได้แก่

- ❖ ระบบแสงI (Photosystem I : PSI) ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า .....
- ❖ ระบบแสงII (Photosystem II : PSII) ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า .....



### Note

ระบบแสง (Photosystem : PS)

ประกอบด้วย 2 ส่วน .....  
และ.....

ระบบแสง I (PSI)

หรือ .....

ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น ..... nm.

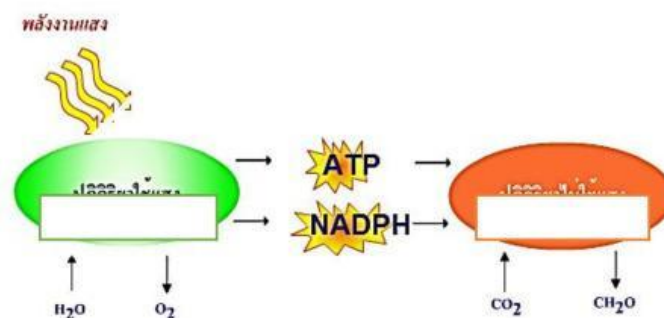
ระบบแสง II (PSII)

หรือ .....

ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น..... nm.

## 4.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

ปฏิกิริยาของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้



## ขั้นที่ 1. ปฏิกิริยาแสง (Light reaction หรือ Photochemical reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีในปฏิกิริยานี้จะมีการออกซิไดส์น้ำ และปล่อยแก๊สออกซิเจนออกมา และได้ ATP กับ NADPH ที่เอาไปใช้ในปฏิกิริยาตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อรีดิวซ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์โบไฮเดรต

ระบบแสงประกอบด้วยกลุ่มของรงควัตถุที่รับพลังงานจากแสง และมีตำแหน่งอยู่ที่เยื่อไทลาคอยด์ ระบบแสงมี 2 ระบบคือ ระบบแสง I และระบบแสง II ที่ศูนย์ปฏิกิริยาของระบบแสง I จะมีคลอโรฟิลล์ เอ อยู่ 1 คู่ที่เรียกว่า P700 เพราะดูดพลังงานแสงได้ดีที่สุด ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร และที่ศูนย์ปฏิกิริยาของระบบแสง II มีคลอโรฟิลล์ 1 คู่ที่เรียกว่า P680 ซึ่งรับพลังงานแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ระบบแสงทั้ง 2 ระบบทำงานร่วมกัน ในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร

✎ เมื่อมีแสง PSI และ PSII ก็ทำงาน electron ที่ดึงขึ้นมาจะถูกถ่ายทอดได้ 2 แบบคือ

1.1 การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non cyclic electron transfer)

1.2 การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (cyclic electron transfer)

1.1 การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non cyclic electron transfer)

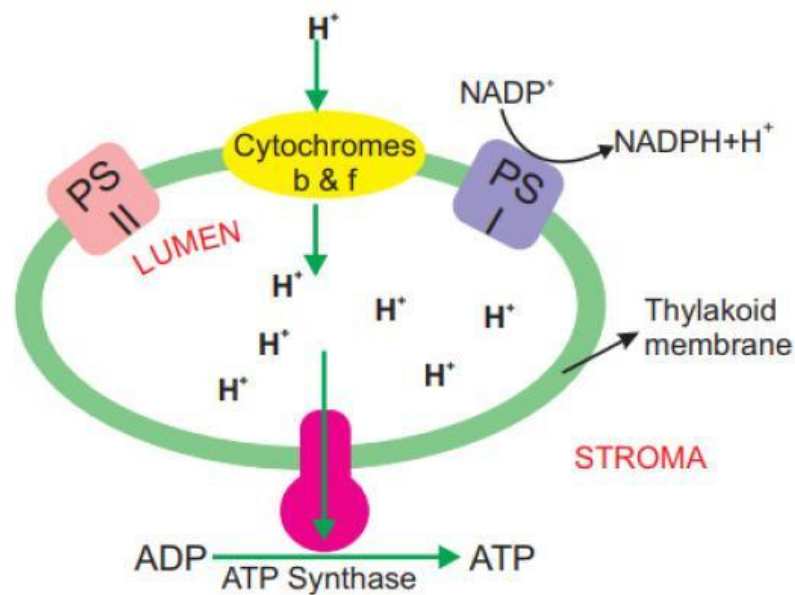
✎ เมื่อ electron ของ reaction center ใน PSII ดึงขึ้นมา ทำให้ PSII ต้องการ electron อย่างมาก (Strong Oxidant) มันจึงแย่ง electron มาจากน้ำใน Thylakoid space ทำให้น้ำแตกตัว โดยมีธาตุ Mn และ Cl เข้าช่วย เรียกว่าเกิด Photolysis หรือ Hill's Reaction ดังสมการ  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  ซึ่ง  $\text{O}_2$  ที่เกิดขึ้นใน photosynthesis ก็มาจาก Photolysis นั่นเอง

✎  $\text{e}^-$  ของ PSII ที่ดึงขึ้นจะถูกเอาไปอุดช่องว่างของ PSI ที่  $\text{e}^-$  ของมันก็ดึงขึ้นเหมือนกัน การจะเอาไปอุดนี้ต้องผ่านกระบวนการการถ่ายทอด  $\text{e}^-$  (electron transfer) ซึ่งเหมือนใน Cellular Respiration ที่มีโปรตีนมารับ  $\text{e}^-$  เป็นทอดๆ คือ

PSII  $\rightarrow$  Phaeophytin (primary electron acceptor)  $\rightarrow$  Plastoquinone (Pq)  $\rightarrow$  Cytochrome complex (มี Fe เป็นองค์ประกอบ)  $\rightarrow$  Plastocyanin (Pc, มี Cu เป็นองค์ประกอบ)  $\rightarrow$  PSI

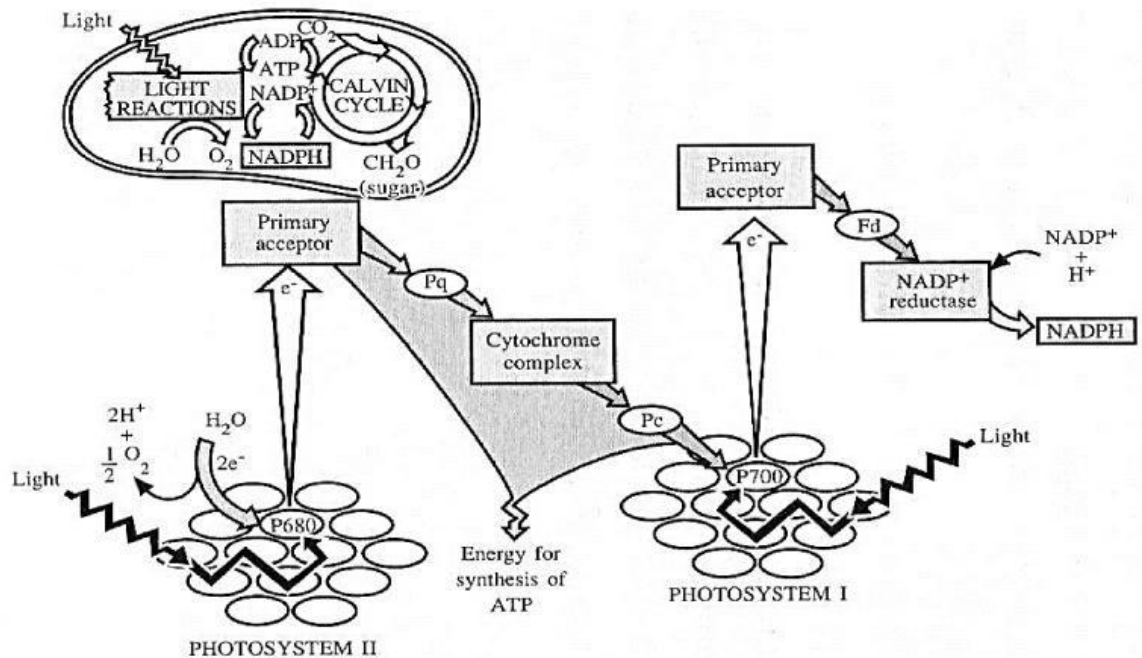
และในขณะที่ถ่ายทอด พลังงานที่สะสมใน  $\text{e}^-$  ของ PSII นี้ก็จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมา นำไปสร้าง ATP ด้วยวิธี chemiosmosis เหมือนใน cellular respiration คือใช้พลังงานนั้น pump  $\text{H}^+$  เข้าไปใน Thylakoid space (จึงมี pH ต่ำ) แล้วเกิด  $\text{H}^+$  gradient  $\text{H}^+$  แพร่กลับออกมาที่ Stroma ผ่านเอนไซม์ ATP synthase กระตุ้นให้เอนไซม์นี้สร้าง ATP จาก  $\text{ADP} + \text{P}_i$  ใน Stroma จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่า เป็นการนำพลังงานแสงมาเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในรูปพันธะพลังงานสูงของ ATP เรียกการสร้าง ATP แบบนี้ว่า Photophosphorylation ส่วน  $\text{e}^-$  ของ Reaction center ใน PSI ที่ดึงขึ้นมา มันจะถูกถ่ายทอดไปให้ ferredoxin (Fd, มี Fe เป็นองค์ประกอบ) ก่อนจะนำไปใส่  $\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADPH}$  และ ตอนนี้พลังงานแสงที่กระตุ้นระบบแสงทั้งสองถูกเก็บไว้ใน NADPH และ ATP เรียบร้อยแล้ว

## เคมีออสโมซิส (chemiosmosis)

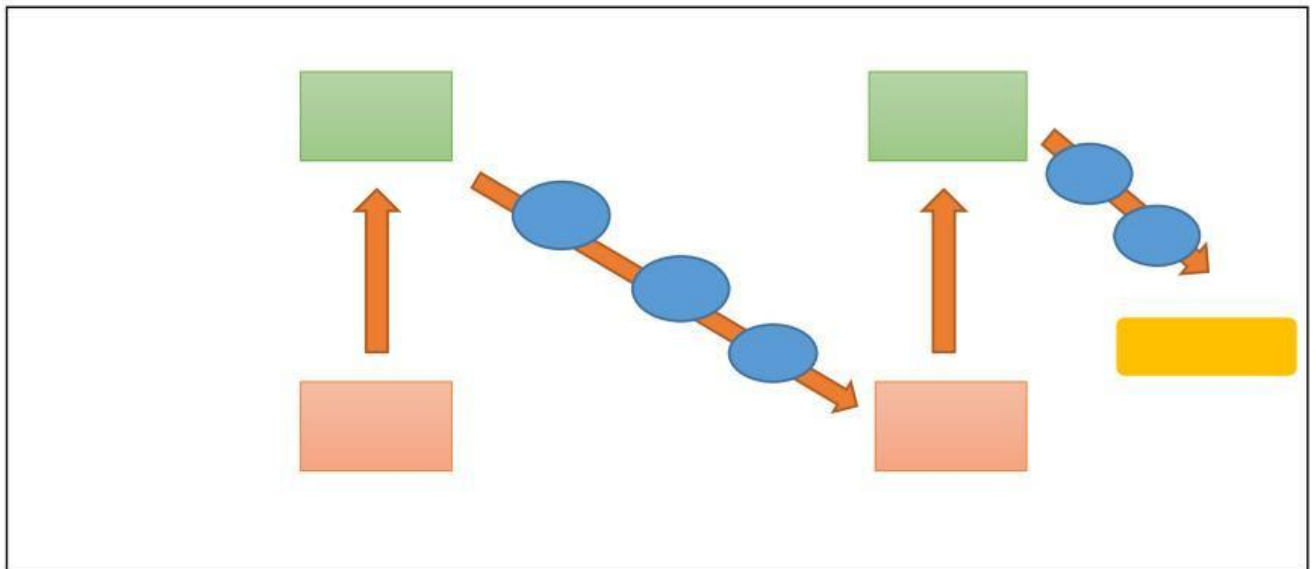


ในขณะที่ถ่ายทอด  $e^-$  ที่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์  $H^+$  จะถูกทอดทิ้งไว้ในลูเมน(Lumen)ของไทลาคอยด์ เกิด  $H^+$  gradient  $H^+$  ซึ่งจะแพร่ ผ่านเอนไซม์ ATP synthase กลับออกมาที่ Stroma ซึ่งขณะแพร่ผ่านเอนไซม์ ATP synthase จะกระตุ้นให้เอนไซม์นี้สร้าง ATP จาก  $ADP + P_i$  ใน Stroma

การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non cyclic electron transfer) แสดงดังภาพ



**ลองทำดู** ให้นักเรียนเขียนแผนภาพการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรลงในช่องว่าง

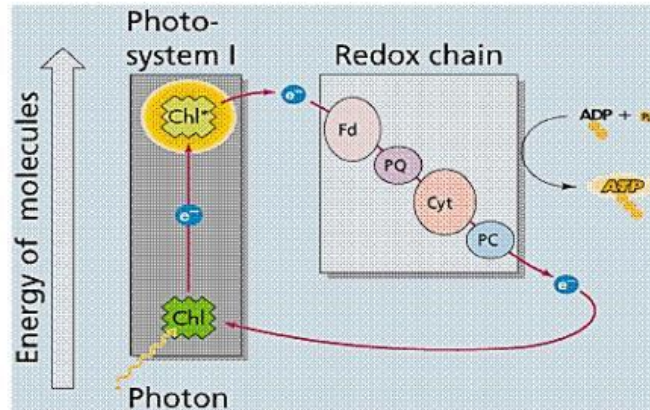


**สรุป** ผลผลิตที่ได้ จาก Non cyclic electron transfer ได้แก่

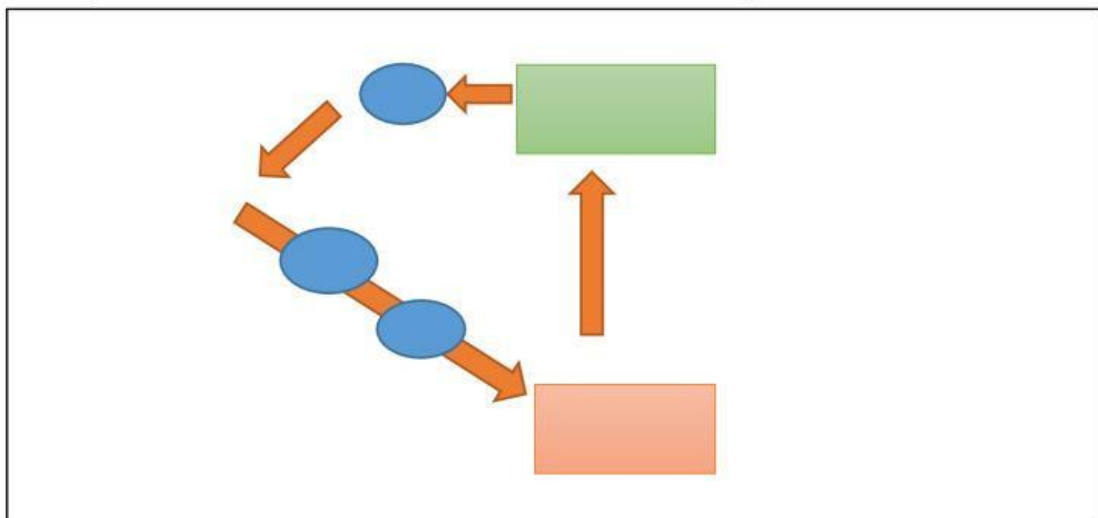
1.....2.....3.....

## 1.2 การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic electron transfer)

ในปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสงนี้ยังมี Cyclic photophosphorylation ซึ่งตัดตอนอยู่ในบางช่วงของ Noncyclic photophosphorylation โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนในระบบแสง I แล้ววกกลับเข้าสู่ที่เดิม คือระบบแสง I ทุก ๆ สองอิเล็กตรอนที่เข้าสู่การถ่ายทอดอิเล็กตรอน ช่วงนี้จะสร้าง ATP 2 โมเลกุล แต่ไม่มีการสร้าง NADPH ในช่วงนี้ไม่มีการสลายโมเลกุลของน้ำ ดังนั้น จึงไม่มีการสร้างแก๊สออกซิเจน



**ลองทำดู** ให้นักเรียนเขียนแผนภาพการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักรลงในช่องว่าง



**สรุป** ผลผลิตที่ได้ จาก cyclic electron transfer ได้แก่

1.....

เมื่อคลอโรฟิลล์ที่เป็นแอนเทนนาของระบบแสง I ดูดพลังงานแสง จะถ่ายทอดพลังงานไปสู่ศูนย์ปฏิกิริยา ทำให้ปล่อยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงออกมา ซึ่งจะถูกถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก แล้วส่งต่อไปยังเฟอริดอกซิน (Ferredoxin, Fd), พลาสโทควิโนน (Plastoquinone, Pq) ระบบไซโทโครม คือ ไซโทโครม  $b_6$  และไซโทโครม  $f$  และพลาสโตไซยานิน (Plastocyanin, Pc) ซึ่งจะส่งอิเล็กตรอนกลับคืนให้ P700 ที่เป็นคลอโรฟิลล์ที่ศูนย์ปฏิกิริยา ในระหว่างที่มีการขนส่งอิเล็กตรอน พลังงานจะถูกนำไปปั๊ม  $H^+$  ให้ผ่านเยื่อไทลาคอยด์ แรงขับเคลื่อนโปรตอนนำไปสังเคราะห์ ATP

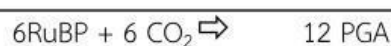
## ขั้นที่ 2. วัฏจักรคัลวิน (Calvin Cycle) หรือ CO<sub>2</sub> fixation

“ใช้” พลังงานเคมีใน ATP and NADPH เพื่อ Reduce CO<sub>2</sub> เป็น sugar

Calvin cycle เกิดใน Stroma เดิมเรียกว่า dark reaction หรือ light independent reaction ซึ่งไม่จริง เพราะ เอนไซม์ส่วนใหญ่ต้องถูกกระตุ้นด้วยแสงก่อน อีกทั้งยังต้องอาศัย ATP และ NADPH จาก Light Reactions ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสง เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

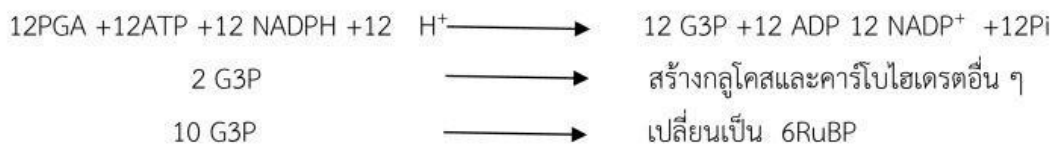
1. ....
2. ....
3. ....

ขั้นที่ 1. .... – เป็นการนำน้ำตาล C 5 อะตอมเรียก ..... (ribulose-1,5-bisphosphate) มาทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub> เองโดยเอนไซม์ rubisco (เป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในโลก) ได้สาร C 6 อะตอมที่ไม่เสถียร แตกตัวเป็นกรด C 3 อะตอมเรียก ..... (Phosphoglycerate) เป็นสารเสถียรตัวแรกของวัฏจักร

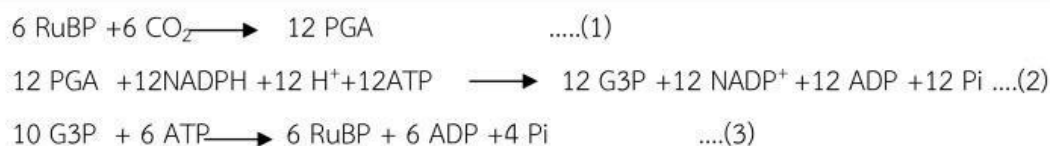


วัฏจักรคัลวินอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า  $C_3$  Pathway เพราะผลที่ได้จากการตรึงคาร์บอนในครั้งแรกเป็นสารประกอบคาร์บอน 3 อะตอม และเรียกพืชที่สังเคราะห์ด้วยแสงแล้วได้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดแรกคือ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต หรือ PGA ว่า **พืช  $C_3$  ( $C_3$  plant)**

**ขั้นที่ 2.** ..... - เอากรด PGA ที่ได้มารีดิวซ์ด้วย NADPH และทำปฏิกิริยากับ ATP ได้น้ำตาล C 3 อะตอมเรียก ..... (glyceraldehydes-3-phosphate) หรือ..... (phosphoglyceraldehyde) หรือเรียกง่ายๆว่า triose phosphate น้ำตาล PGAL ที่ได้บางตัวจะออกจาก Calvin cycle ไปรวมกับ PGAL ตัวอื่นก่อนหน้า กลายเป็นคาร์โบไฮเดรตขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะแป้งซึ่งเป็นอาหารสะสมใน Vacuole ของเซลล์พืช หรือซูโครสซึ่งเป็นอาหารที่ลำเลียงใน phloem



**ขั้นที่ 3.** ..... - น้ำตาล PGAL ที่เหลือจะกลับเข้าวัฏจักร โดยทำปฏิกิริยากับ ATP ได้น้ำตาล RuBP เตรียมรวมกับ  $\text{CO}_2$  ต่อไป



**รวมสมการในวัฏจักรคัลวินทั้ง 3 สมการ**



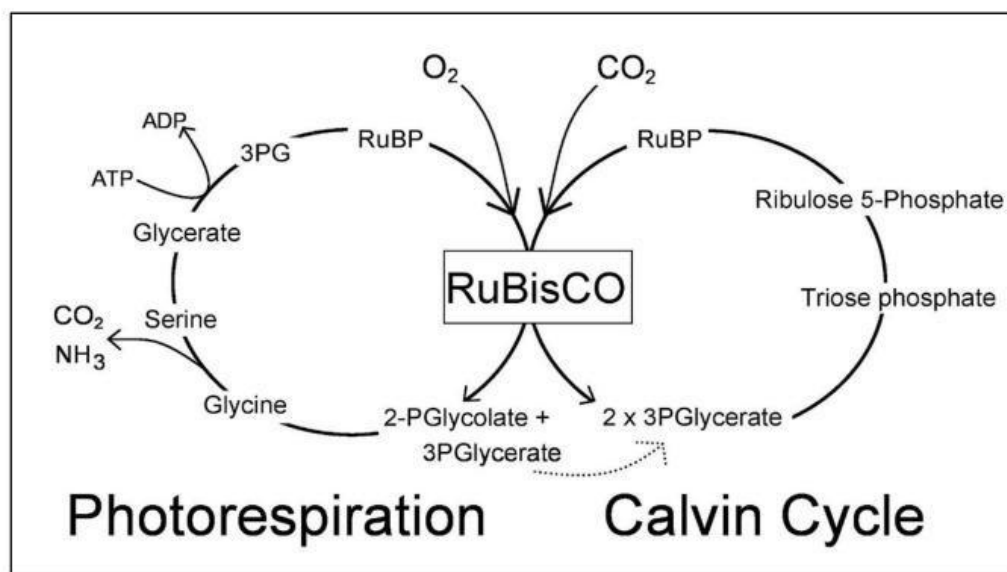
\* Calvin cycle ที่สมบูรณ์ 1 รอบ จะได้ PGAL (C 3 อะตอม) 1 โมเลกุลออกมา ใช้ 9 ATP และ 6 NADPH ถ้าอยากได้น้ำตาล C 6 อะตอมอย่างกลูโคสก็ต้องหมุนวัฏจักร 2 รอบ สารต่างๆที่ใช้ก็เป็นสองเท่า

\* Starch ถูกสร้างใน Chloroplast แต่ Sucrose ถูกสร้างที่ Cytosol

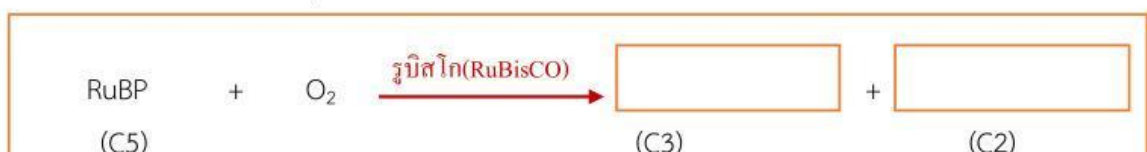
### 4.3 โฟโตเรสไพเรชัน(Photorespiration)

☞การหายใจแสง ( ..... ) เกิดขึ้นเนื่องจาก rubisco (RuBP carboxylase oxygenase) สามารถจับ RuBP มาทำกับ  $\text{CO}_2$  (Carboxylation) หรือ  $\text{O}_2$  (Oxygenation) ก็ได้ โดยมี affinity ต่อ  $\text{CO}_2$  มากกว่า  $\text{O}_2$  แต่ในเวลาร้อนๆ  $\text{CO}_2$  ละลายในอากาศได้แยกว่่า  $\text{O}_2$  ทำให้ rubisco ตริ่ง  $\text{O}_2$  ได้เยอะกว่าตริ่ง  $\text{CO}_2$

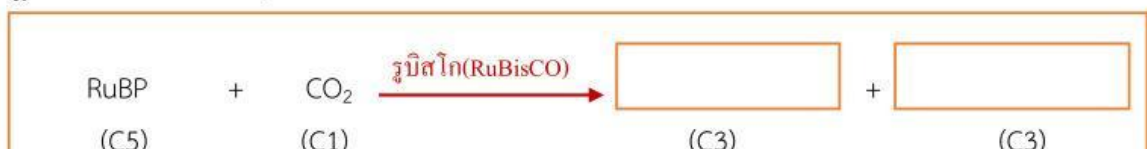
เมื่อ RuBP จับกับ  $\text{O}_2$  จะเกิดเป็นสาร C 5 อะตอม แล้วแตกเป็น C 3 อะตอมของ PGA กับสาร C 2 อะตอม (phosphoglycolate) ซึ่งเข้าวัฏจักร Calvin cycle ไม่ได้ การกำจัดสาร C 2 อะตอมนี้ต้องใช้ photorespiration ซึ่งเสียทั้ง ATP แล้วยังทำให้ตริ่ง  $\text{CO}_2$  ได้น้อยลง (นึกสภาพตริ่ง  $\text{CO}_2$  ได้เท่าไร่ แต่ต้องคาย  $\text{CO}_2$  ที่ได้จาก photorespiration ออกทำให้  $\text{CO}_2$  สุทธิที่ตริ่งได้น้อยลง) หมายถึง Photosynthetic rate ลดลงด้วย (เวลาเขาวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง เขาวัดจากปริมาณ  $\text{CO}_2$  สุทธิที่พืชใช้ไป)



#### โฟโตเรสไพเรชัน (Photorespiration)



#### วัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle)



Photorespiration มีข้อดีในกรณีที่ไม่มี ATP มากเกิน(ซึ่งมักเป็นในที่ๆแดดแรง เพราะ pigment มัน capture พลังงานแสงเปลี่ยนเป็น ATP) จะได้ photorespiration ใช้ ATP ให้มันไม่มากเกินไป อีกทั้ง photorespiration ยังทำให้พืชทนต่อสภาพ stress ต่างๆเช่น ทนเค็ม ทนแล้ง ได้ดีขึ้น