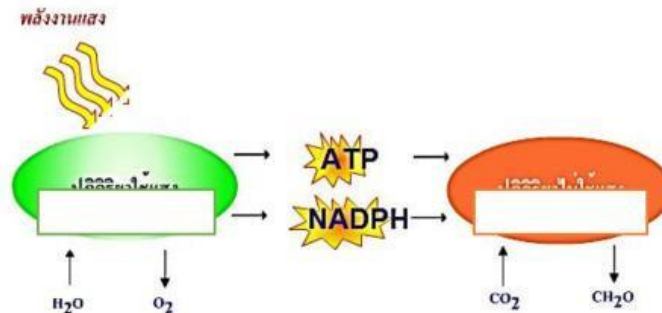


หน่วยที่ 4 การสังเคราะห์ด้วยแสง

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)

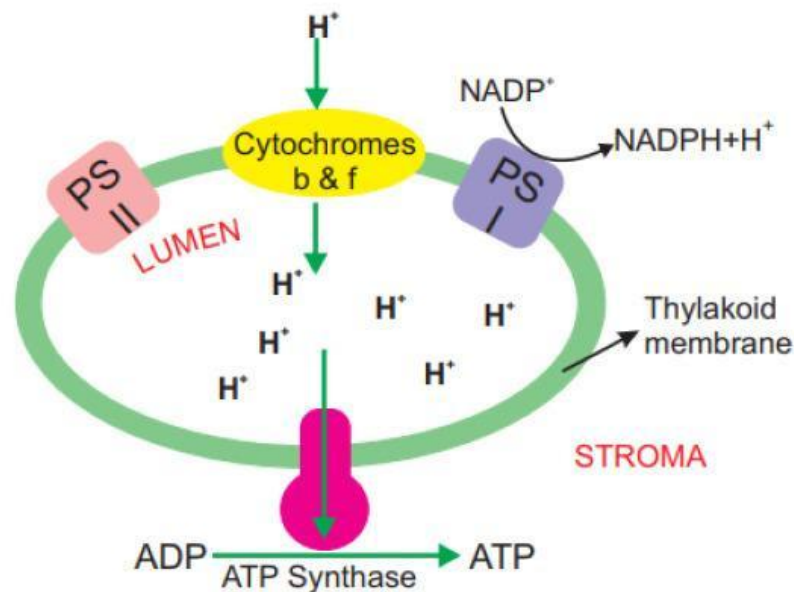
☞ เมื่อ electron ของ reaction center ใน PSII ดึงขึ้นมา ทำให้ PSII ต้องการ electron อย่างมาก (Strong Oxidant) มันจึงแย่ง electron มาจากน้ำใน Thylakoid space ทำให้น้ำแตกตัว โดยมีธาตุ Mn และ Cl เข้าช่วย เรียกว่าเกิด Photolysis หรือ Hill's Reaction ดังสมการ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ซึ่ง O_2 ที่เกิดขึ้นใน photosynthesis ก็มาจาก Photolysis นั่นเอง

☞ e^- ของ PSII ที่ดึงขึ้นจะถูกเอาไปอุดช่องว่างของ PSI ที่ e^- ของมันก็ดึงขึ้นเหมือนกัน การจะเอาไปอุดนี้ต้องผ่านกระบวนการการถ่ายทอด e^- (electron transfer) ซึ่งเหมือนใน Cellular Respiration ที่มีโปรตีนมารับ 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

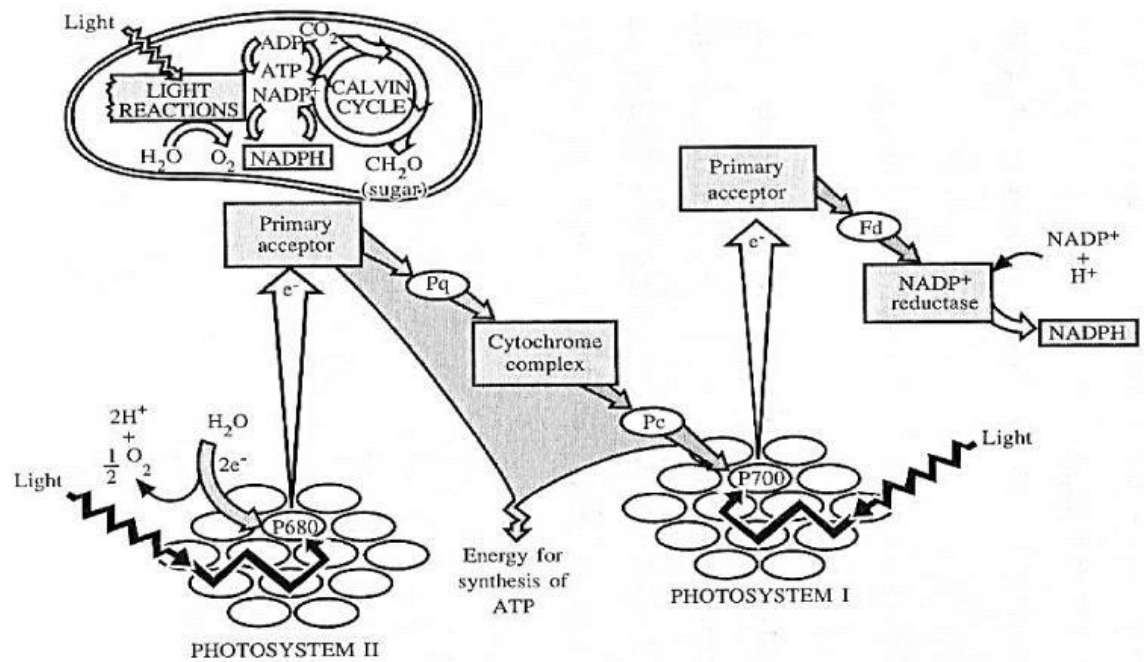
และในขณะที่ถ่ายทอด พลังงานที่สะสมใน e^- ของ PSII นี้ก็จะค่อยๆถูกปลดปล่อยออกมา นำไปสร้าง ATP ด้วยวิธี **chemiosmosis** เหมือนใน cellular respiration คือใช้พลังงานนั้น pump H^+ เข้าไปใน Thylakoid space (จึงมี pH ต่ำ) แล้วเกิด H^+ gradient H^+ แพร่กลับออกมาที่ Stroma ผ่านเอนไซม์ ATP synthase กระตุ้นให้เอนไซม์นี้สร้าง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

เคมีออสโมซิส (chemiosmosis)

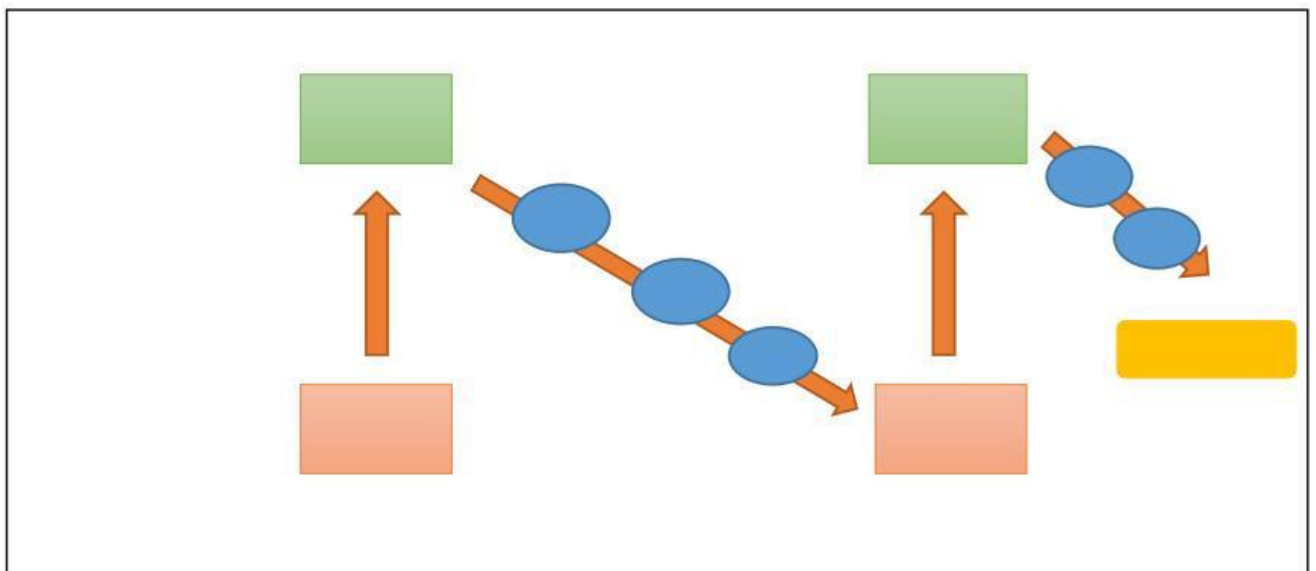


ในขณะที่ถ่ายทอด e^- ที่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์ H^+ จะถูกหอดทิ้งไว้ในลูเมน(Lumen)ของไทลาคอยด์ เกิด H^+ gradient H^+ ซึ่งจะแพร่ ผ่านเอนไซม์ ATP synthase กลับออกมาที่ Stroma ซึ่งขณะแพร่ผ่านเอนไซม์ ATP synthase จะกระตุ้นให้เอนไซม์นี้สร้าง ATP จาก $ADP+P_i$ ใน Stroma

การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (Non cyclic electron transfer) แสดงดังภาพ



ลองทำดู ให้นักเรียนเขียนแผนภาพการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรลงในช่องว่าง

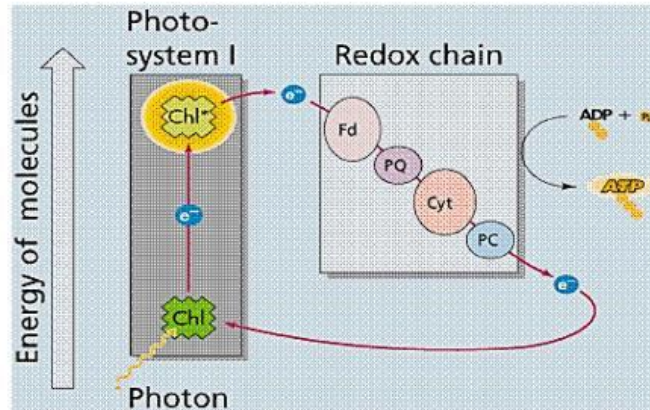


สรุป ผลผลิตที่ได้ จาก Non cyclic electron transfer ได้แก่

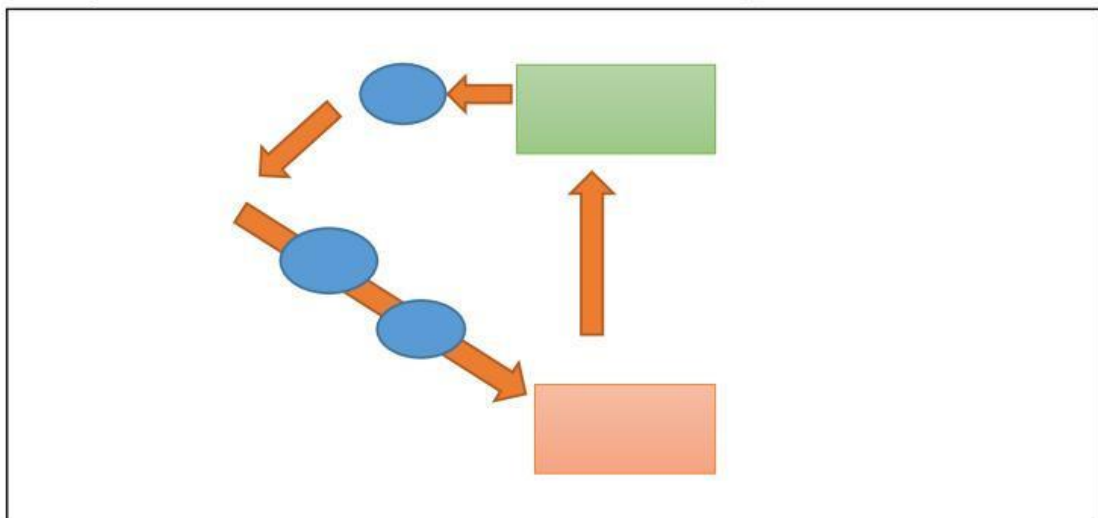
1.....2.....3.....

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 ซึ่งจะถูกลำเลียงไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก 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

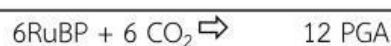
ขั้นที่ 2. วัฏจักรคัลวิน (Calvin Cycle) หรือ CO₂ fixation

“ใช้” พลังงานเคมีใน ATP and NADPH เพื่อ Reduce CO₂ 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

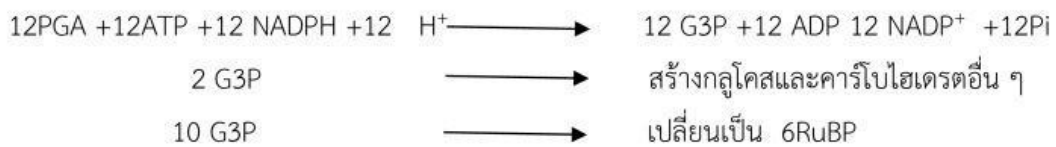
1.
2.
3.

ขั้นที่ 1. – เป็นการนำน้ำตาล C 5 อะตอมเรียก (ribulose-1,5-bisphosphate) มาทำปฏิกิริยากับ CO₂ แรงโดยเอนไซม์ rubisco (เป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในโลก) ได้สาร C 6 อะตอมที่ไม่เสถียร แตกตัวเป็นกรด C 3 อะตอมเรียก (Phosphoglycerate) เป็นสารเสถียรตัวแรกของวัฏจักร

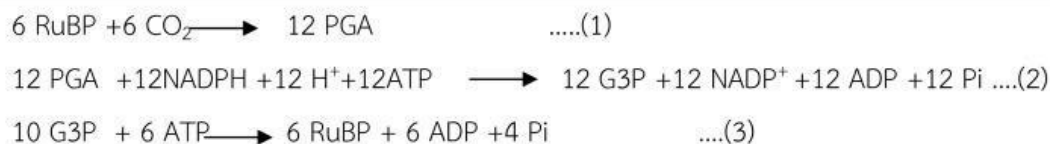


วัฏจักรคัลวินอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า C_3 Pathway เพราะผลที่ได้จากการตรึงคาร์บอนในครั้งแรกเป็นสารประกอบคาร์บอน 3 อะตอม และเรียกพืชที่สังเคราะห์ด้วยแสงแล้วได้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดแรกคือ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต หรือ PGA ว่า **พืช C_3 (C_3 plant)**

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 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