



# คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

## วิชาชีววิทยา

เรื่อง

ปฏิกิริยาแสง

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์

พุทธศักราช 2554



## กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ นันทนา อังกินันท์

รองศาสตราจารย์ สุมิตรา คงชื่นสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัทธรา ลิ้มปะนะเวช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์

นางปริชญ์นุช กลิ่นรัตน์

นางฐปนา บางยี่ขัน

## สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ข้อมูล

ห้องปฏิบัติการกลาง ภาควิชาพฤกษศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## คำชี้แจง

สื่อนำเข้าสู่บทเรียน เรื่องปฏิกิริยาแสง เป็นตอนหนึ่งของสื่อประกอบการสอน เรื่องการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งมีสื่อทั้งหมด 14 ตอน ได้แก่

1. พลังงานชีวิต
2. ปฏิกิริยาแสง
3. สรุปปฏิกิริยาแสง
4. ความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารสีชนิดต่าง ๆ
5. ปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle
6. สรุปปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle II
7. กระบวนการเกิดโฟโตเรสไพเรชัน
8. ปัจจัยทางกายภาพและการเกิดโฟโตเรสไพเรชัน
9. กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช  $C_4$
10. ทบทวนกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช  $C_4$
11. กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM
12. ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสง
13. สรุปกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง
14. คำถามทบทวนเรื่องการสังเคราะห์ด้วยแสง

คู่มือการใช้สื่อประกอบการสอนวิชาชีววิทยา เรื่อง ปฏิกิริยาแสงนี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้สอนเข้าใจจุดประสงค์ของสื่อการสอนที่ผลิตขึ้น และเสนอแนวทางการใช้สื่อดังกล่าวเพื่อกระตุ้นการเรียนรู้ของผู้เรียนในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมถึงให้ความกระจ่างเกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ เพื่อให้การจัดการเรียนการสอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภจิตรา ชัชวาลย์ ผู้จัดทำคู่มือ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญริดา โฆษิตทรัพย์ ผู้ตรวจคู่มือ



## สารบัญ

|                                           | หน้า |
|-------------------------------------------|------|
| จุดประสงค์                                | 5    |
| ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง                   | 5    |
| เนื้อหา                                   | 6    |
| แนวทางในการจัดการเรียนรู้                 | 16   |
| ภาคผนวก                                   | 20   |
| ก. คำอธิบายศัพท์                          |      |
| ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม                 |      |
| รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน | 25   |



## จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายลักษณะการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาแสง
2. ระบุตำแหน่งการแตกตัวของน้ำ
3. ระบุตำแหน่งการสร้าง NADPH และ ATP
4. อธิบายการเปลี่ยนรูปของพลังงานในการสร้าง ATP โดย ATP synthase

## ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อประกอบการสอนเรื่องปฏิกิริยาแสงแล้วสามารถ

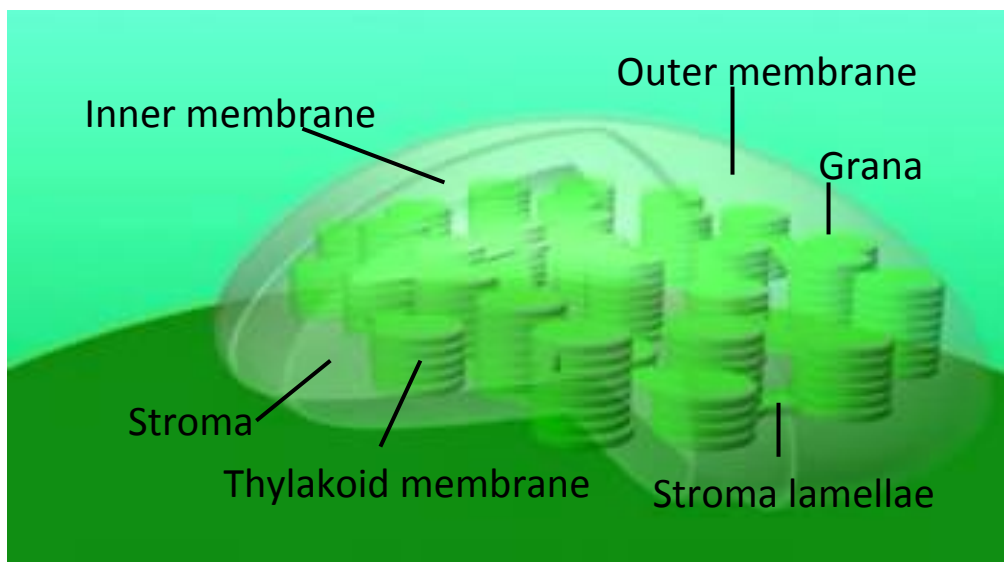
1. อธิบายกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีในปฏิกิริยาแสง
2. อธิบายลักษณะการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาแสงทั้งแบบที่ไม่เป็นวัฏจักร และแบบที่เป็นวัฏจักร
3. ระบุกลไกการสังเคราะห์สารพลังงานสูงในรูปของ ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง



## เนื้อหา

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นกระบวนการที่สิ่งมีชีวิต เช่น พืช เปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยมีกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือ ปฏิกิริยาแสง (light reaction) และปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) โดยทั้งสองปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์ สื่อการสอนเรื่องนี้เป็นสื่อการสอนที่สรุปภาพรวมของปฏิกิริยาแสง

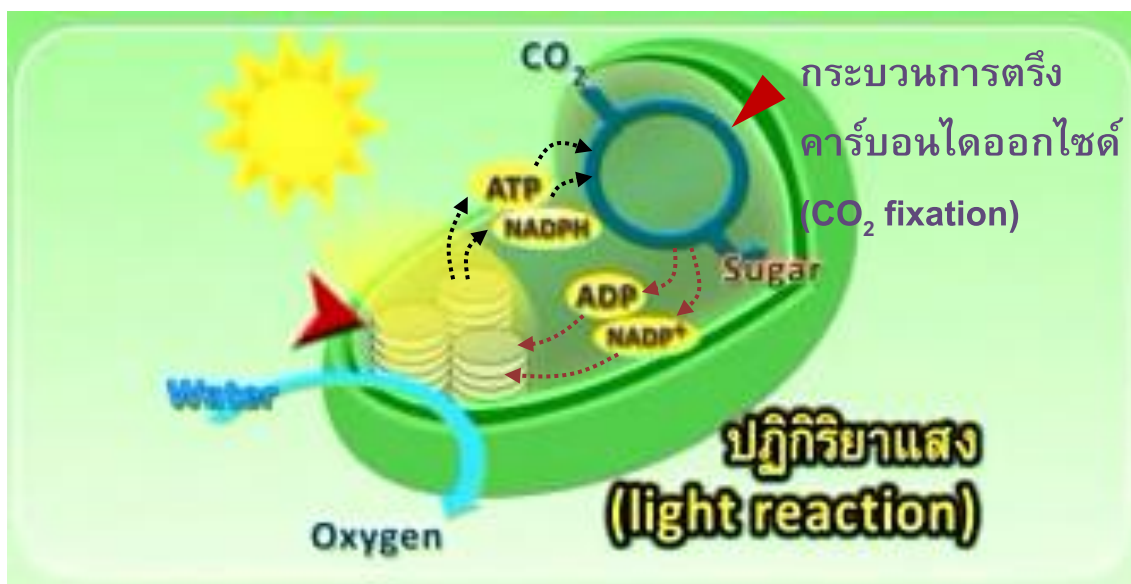
คลอโรพลาสต์ (chloroplast) เป็นออร์แกเนลล์ (organelle) ที่มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น คือ เยื่อหุ้มชั้นนอก (outer membrane) และเยื่อหุ้มชั้นใน (inner membrane) ภายในเป็นของเหลว เรียกว่า สโตรมา (stroma) ซึ่งมีเอนไซม์และสารอินทรีย์หลายชนิดละลายอยู่ บริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอน หรือ กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากส่วนที่เป็นของเหลวแล้วยังประกอบด้วยส่วนที่เป็นเยื่อ เรียกว่า เยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) ประกอบด้วย phospholipids และกลุ่มโปรตีนเชิงซ้อนหลายชนิด เช่น ระบบแสง (photosystem) และเอนไซม์ ATP synthase ซึ่งเป็นตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาแสง เยื่อไทลาคอยด์บางส่วนจะพับซ้อนกันเป็นถุงเรียงกันเป็นต่งเรียกว่า กรานุม (granum) หากเป็นพหุพจน์ เรียก กรานา (grana) ส่วนที่ไม่ได้พับเป็นถุง เรียกว่า สโตรมาลามลลีส (stroma lamellae) เดิมเรียกว่า สโตรมาลามลลลา นอกจากนี้ยังอาจเรียกว่า สโตรมาไทลาคอยด์ (stroma thylakoid) ภายในถุงของไทลาคอยด์เป็นของเหลวที่มีโปรตอน สารอินทรีย์ และโปรตีนละลายอยู่ เรียกว่า ไทลาคอยด์ลูเมน (thylakoid lumen) หรือบางที่เรียก ลูเมน (lumen) (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 โครงสร้างของคลอโรพลาสต์



สารสี (pigment) ที่อยู่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์ทำหน้าที่รับพลังงานแสง ซึ่งปฏิกิริยาแสงจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแสงจะได้พลังงานเคมีในรูปของ ATP และ NADPH ละลายใน stroma ซึ่งจะได้มีการเปลี่ยนพลังงานเคมีในโมเลกุลดังกล่าวให้กลายเป็นพลังงานเคมีในโมเลกุลของน้ำตาลโดยกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 2)



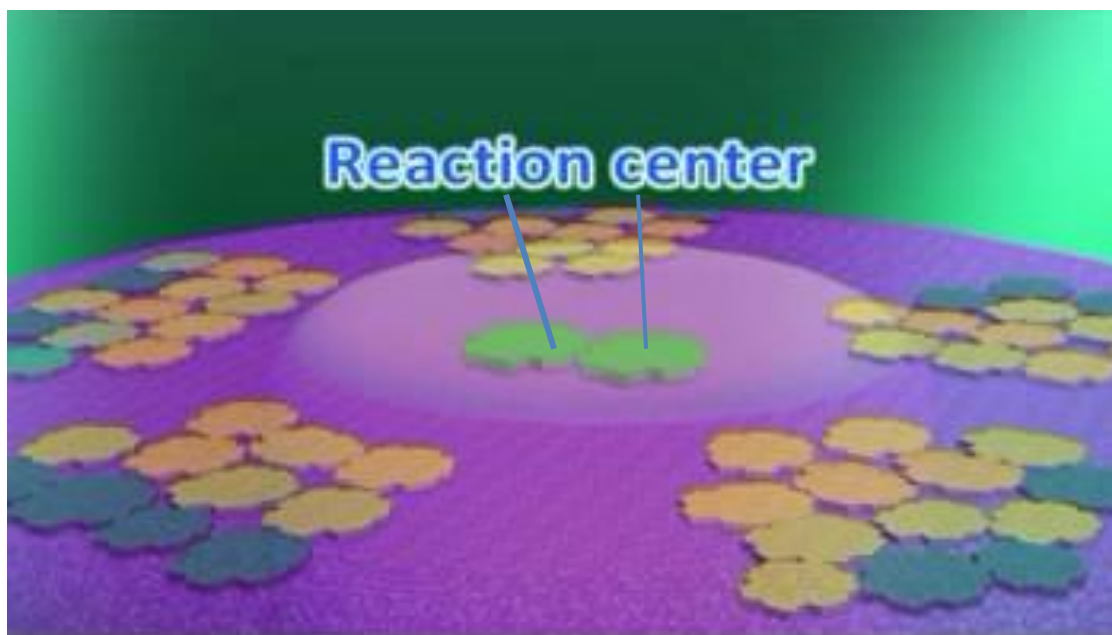
รูปที่ 2 ภาพรวมของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

### การเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี

ปฏิกิริยาแสงเป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นโดยมีสารสีที่เยื่อไทลาคอยด์เป็นตัวรับพลังงานแสง แล้วนำพลังงานดังกล่าวไปใช้ในปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเรียกว่า photochemical reaction

การรับพลังงานของสารสีเพื่อนำไปใช้ในการเกิด photochemical reaction นั้นเป็นการทำงานร่วมกันของกลุ่มสารสีที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระบบ เรียกว่า antenna การเกิด photochemical reaction จะเกิดที่ตำแหน่งของศูนย์กลางปฏิกิริยาหรือ reaction center ของ antenna ซึ่ง reaction center ของสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอตประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ เอ ชนิดพิเศษ 2 โมเลกุล (รูปที่ 3)

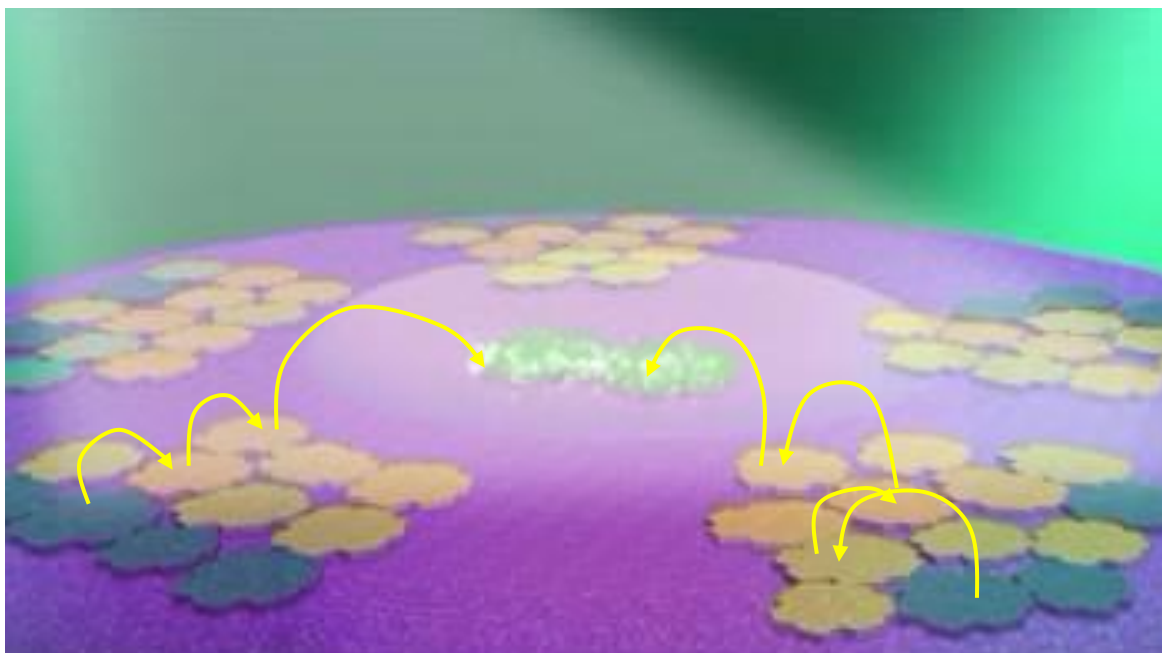
ในพืชชั้นสูงมีสารสีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll a) คลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll b) แซนโทฟิลล์ (xanthophylls) และแคโรทีน (carotene) สารสีต่าง ๆ เหล่านี้อยู่รวมกันเป็นกลุ่มเพื่อทำงานร่วมกันในการรับพลังงานแสงเพื่อนำไปสร้างพันธะเคมีโดยการถ่ายทอดอิเล็กตรอน กลุ่มรับพลังงานแสงของสารสีเหล่านี้ เรียกว่า แอนเทนนาเชิงซ้อน (antenna complex) ซึ่งประกอบด้วยสารสีชนิดต่าง ๆ รวมกันประมาณ 200-300 โมเลกุล



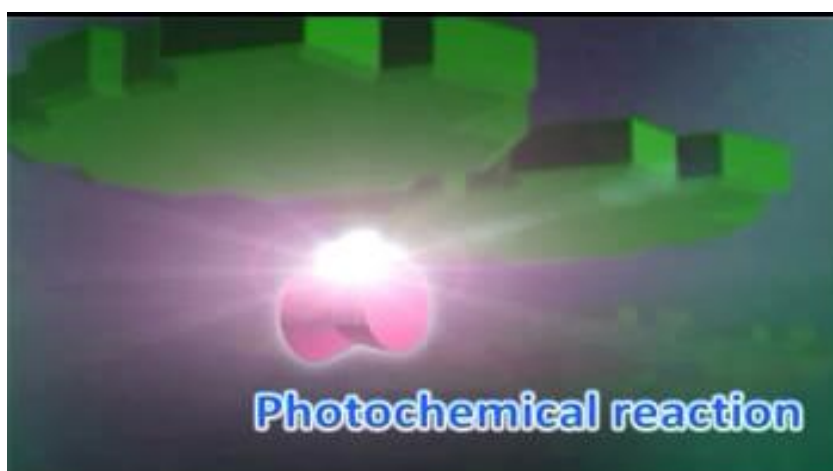
**รูปที่ 3** antenna ใน photosystem ซึ่งมี reaction center ของการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นคลอโรฟิลล์ เอ โมเลกุลคู่

แต่ละ antenna complex มีสารสีที่ทำหน้าที่ในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก (primary electron acceptor) เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น เรียกว่า ศูนย์กลางปฏิกิริยา ซึ่งเป็นโมเลกุลคู่ของคลอโรฟิลล์ เอ ส่วนสารสีโมเลกุลอื่น ๆ จะทำหน้าที่ในการรับพลังงานแสงแล้วส่งพลังงานต่อเป็นทอด ๆ มายัง reaction center โดยไม่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแต่อย่างใด แต่เป็นการส่งพลังงานจากสารสีโมเลกุลหนึ่งไปยังสารสีอีกโมเลกุลหนึ่งเท่านั้น ซึ่งในการถ่ายทอดพลังงานดังกล่าวในแต่ละขั้นอาจมีประสิทธิภาพไม่ถึง 100 % ทำให้ระดับพลังงานที่เข้าสู่ reaction center ค่อย ๆ ลดลงเป็นลำดับเมื่อเทียบกับจุดที่รับพลังงานเป็นครั้งแรก จึงมีการเปรียบว่า antenna complex ทำหน้าที่เสมือนกรวยนำพลังงานเข้าสู่ reaction center เพื่อนำไปใช้ในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของ reaction center อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) และพร้อมที่จะถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก (รูปที่ 4)

ระดับพลังงานที่ reaction center ได้รับจะพอดีกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของคลอโรฟิลล์ เอ ชนิดพิเศษนี้ไปอยู่ที่ระดับ excited state ซึ่งเป็นภาวะที่อิเล็กตรอนดังกล่าวพร้อมเคลื่อนย้ายไปสู่สารอีกชนิดหนึ่งที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นเมื่อเกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ก็คือเกิดการสร้างพันธะเคมีใหม่ ซึ่งคือพลังงานแสงได้เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีแล้ว โดย photochemical reaction นั้นเอง (รูปที่ 5)



รูปที่ 4 ทิศทางการส่งต่อพลังงานที่สารสีแต่ละโมเลกุลได้รับเข้าสู่ reaction center ที่เกิดขึ้นใน antenna



รูปที่ 5 การเกิด photochemical reaction ซึ่งคือการที่พลังงานแสงกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของ reaction center ถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนใน photosystem



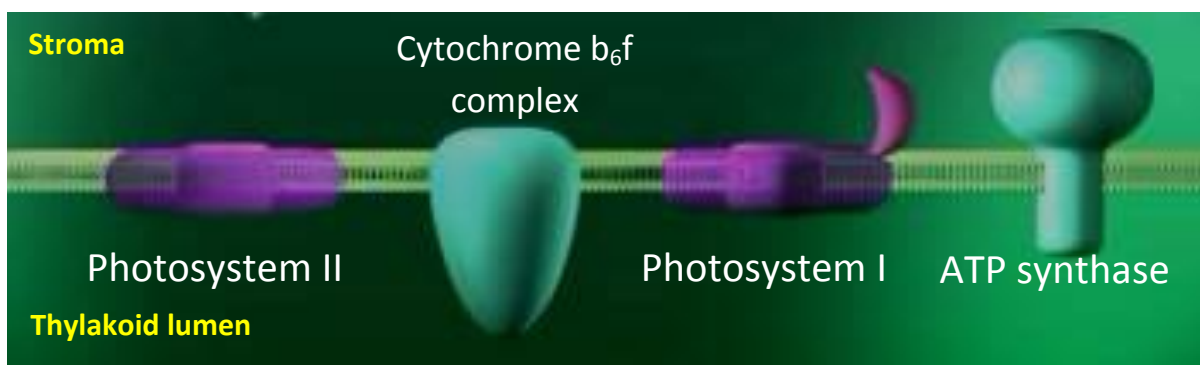
### กลุ่มโปรตีนเชิงซ้อน (protein complex) ที่ทำงานในปฏิกิริยาแสง

การทำงานของปฏิกิริยาแสงของพืชชั้นสูงอาศัยการทำงานของกลุ่มโปรตีนเชิงซ้อน 4 ชนิด (รูปที่ 6) ที่ฝังตัวอยู่บนเยื่อไทลาคอยด์โดยมีสารสี ตัวรับอิเล็กตรอน และเอนไซม์ต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบ กลุ่มโปรตีนเชิงซ้อนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ระบบแสง I (photosystem I) ระบบแสง II (photosystem II) cytochrome  $b_6f$  complex และ ATP synthase

Photosystem I มี antenna ที่สามารถเกิด photochemical reaction ได้ เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 700 นาโนเมตร เรียก reaction center ของ antenna ชนิดนี้ว่า P700 ส่วน photosystem II มี antenna ที่สามารถเกิด photochemical reaction ได้ เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 680 นาโนเมตร เรียก reaction center ของ antenna ชนิดนี้ว่า P680 นอกจากนี้ใน photosystem ทั้งสองระบบยังประกอบด้วยโปรตีนชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาแสง ตัวรับอิเล็กตรอนหลายชนิด และที่ photosystem II ยังมีเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ หรือ photolysis ซึ่งจะได้ออกซิเจนต่อไปอีกด้วย

Cytochrome  $b_6f$  complex เป็นกลุ่มโปรตีนที่มีตัวรับส่งอิเล็กตรอน cytochrome  $b_6$  และ cytochrome  $f$  เป็นองค์ประกอบ การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนผ่าน cytochrome  $b_6f$  complex นี้ มีส่วนในการเปลี่ยนพลังงานเคมีมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการสร้าง ATP โดย ATP synthase

ATP synthase มีโครงสร้างหลักสองส่วน ส่วนหนึ่งฝังอยู่ในเยื่อไทลาคอยด์ ภายในเป็นช่องที่โปรตอน ( $H^+$ ) สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อไทลาคอยด์ออกสู่ stroma อีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนเร่งปฏิกิริยายื่นออกจากเยื่อไทลาคอยด์มายัง stroma ซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาการสร้าง ATP จาก ADP และ  $P_i$



รูปที่ 6 กลุ่มโปรตีนเชิงซ้อนที่เยื่อไทลาคอยด์ที่ทำงานในปฏิกิริยาแสง



## การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร (non-cyclic electron transfer)

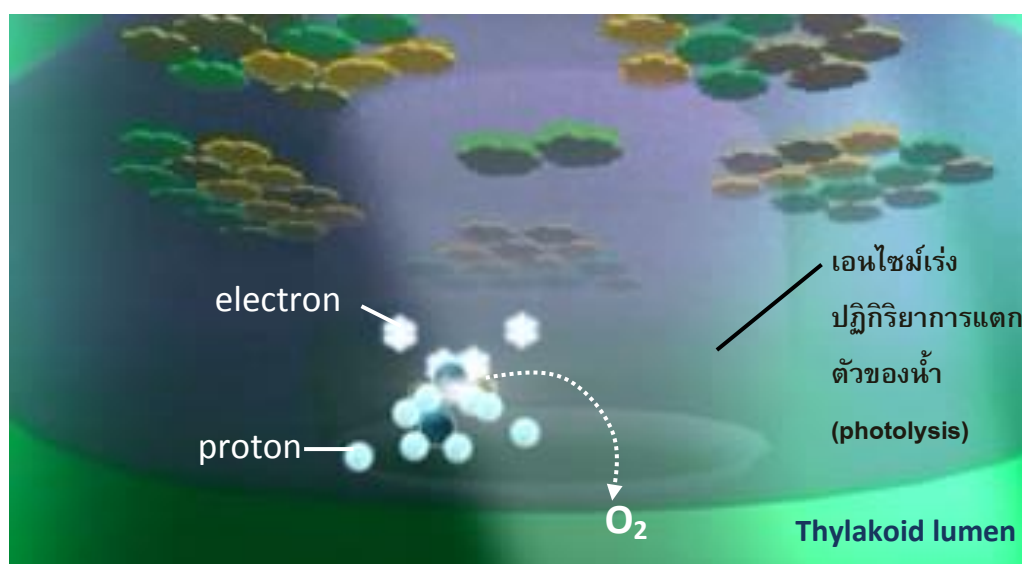
ปฏิกิริยาแสงเป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี โดยพลังงานแสงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในโมเลกุลต่าง ๆ จนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแสงแบบที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรจะได้พลังงานเคมีในรูปของโมเลกุล ATP และ NADPH

เมื่อสารสีใน antenna complex ได้รับพลังงานแสงก็จะส่งพลังงานแสงดังกล่าวเข้าสู่ reaction center ทำให้อิเล็กตรอนที่ reaction center อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและพร้อมถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรกของ photosystem (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 การรับอิเล็กตรอนของตัวรับอิเล็กตรอนใน photosystem II หลังจากที่อิเล็กตรอนของ P680 อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น

ที่ photosystem II เมื่อ reaction center อยู่ในภาวะขาดอิเล็กตรอน จะทำให้ reaction center มีความสามารถในการช่วงชิงอิเล็กตรอนได้สูงขึ้น ประกอบกับใน photosystem II มีเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ จึงทำให้ reaction center ที่อยู่ในภาวะขาดอิเล็กตรอนชิงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นก๊าซออกซิเจนและโปรตอน (รูปที่ 8)

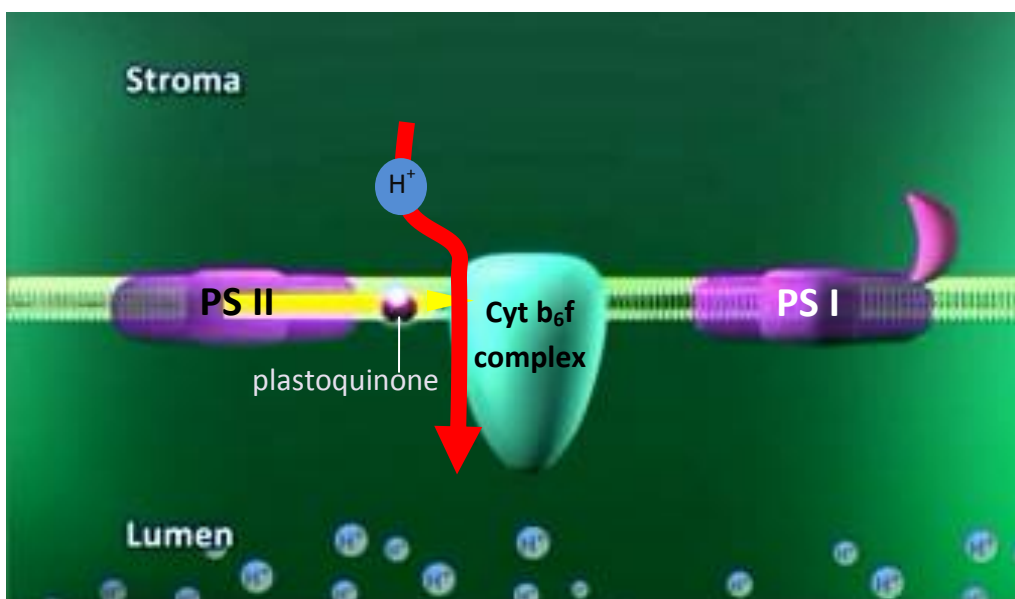


รูปที่ 8 การแตกตัวของน้ำ (photolysis) ซึ่งเกิดขึ้นที่ photosystem II ทางด้าน thylakoid lumen โดยอิเล็กตรอนจากน้ำจะถูกดึงเข้าไปทดแทนอิเล็กตรอนของ P680 ที่เสียไป น้ำจึงแตกตัวปล่อยโปรตอนและออกซิเจนสะสมทางด้าน thylakoid lumen



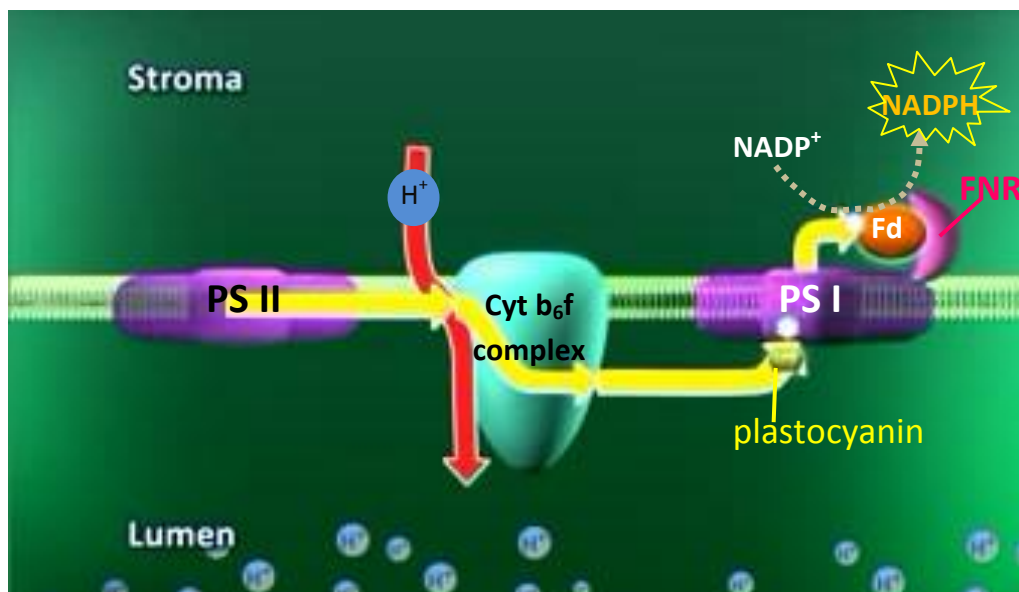
อิเล็กตรอนที่ตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรกใน photosystem II รับไปแล้วจะถูกถ่ายทอดเป็นลำดับ แล้วส่งให้กับพลาสโทควิโนน (plastoquinone) ทำหน้าที่ในการนำอิเล็กตรอนไปให้กับกลุ่มโปรตีนอีกกลุ่มหนึ่งบนเยื่อไทลาคอยด์คือ cytochrom  $b_6f$  complex ในระหว่างที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนผ่าน cytochrom  $b_6f$  complex พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะนำมาใช้ในการขนส่งโปรตอน จาก stroma เข้ามาเก็บไว้ใน lumen (รูปที่ 9)

ดังนั้น ใน lumen ก็จะมีการสะสมโปรตอนไว้เป็นจำนวนมาก ทั้งที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำ และเกิดจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนผ่าน cytochrom  $b_6f$  complex การสะสมดังกล่าวทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณโปรตอนใน lumen กับใน stroma ซึ่งเรียกว่าเกิดโปรตอนเกรเดียนต์ (proton gradient)



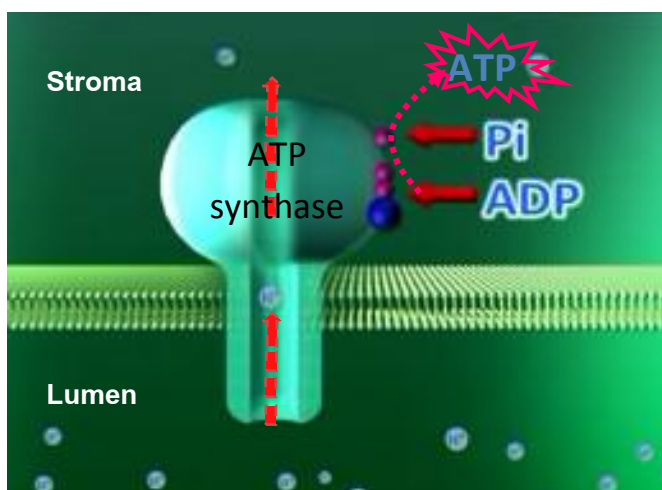
**รูปที่ 9** plastoquinone ทำหน้าที่ในการลำเลียงอิเล็กตรอนจาก photosystem II (PS II) ไปยัง cytochrome  $b_6f$  complex ซึ่งจะทำให้เกิดการนำอิเล็กตรอนจาก stroma เข้าสู่ lumen การสะสมดังกล่าวทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential) จาก proton gradient ที่เกิดขึ้น

จากนั้น พลาสโทไซยานิน (plastocyanin) เป็นโมเลกุลที่จะทำหน้าที่ในการขนส่งอิเล็กตรอน จาก cytochrome  $b_6f$  complex เพื่อไปทดแทนอิเล็กตรอนของ P700 ที่สูญเสียไปให้กับตัวรับอิเล็กตรอนใน photosystem I ภายหลังจากที่ตัวรับอิเล็กตรอนใน photosystem I ส่งอิเล็กตรอนต่อไปเป็นทอดๆ จนในที่สุดนำไปสู่เฟอร์รีดอกซิน (ferredoxin, Fd) ซึ่งละลายอยู่ใน stroma ในขณะเดียวกัน  $NADP^+$  ก็ละลายอยู่ใน stroma เช่นเดียวกัน ในสภาวะที่เหมาะสมเฟอร์รีดอกซินจะถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้กับ  $NADP^+$  โดยมี ferredoxin-NADP reductase (FNR) เป็นเอนไซม์เร่งปฏิกิริยา จะได้เป็น NADPH ใน stroma (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 plastocyanin ลำเลียงอิเล็กตรอนจาก cytochrome b<sub>6</sub>f complex ไปทดแทนให้กับ P700 ซึ่งเป็น reaction center ของ photosystem I (PS I) ซึ่งเมื่อ P700 เสียอิเล็กตรอนให้กับตัวรับอิเล็กตรอนใน PS I อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกลำเลียงไปยัง ferredoxin (Fd) ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนกับ  $\text{NADP}^+$  โดยการเร่งปฏิกิริยาของ FNR ได้ NADPH ใน stroma ของคลอโรพลาสต์

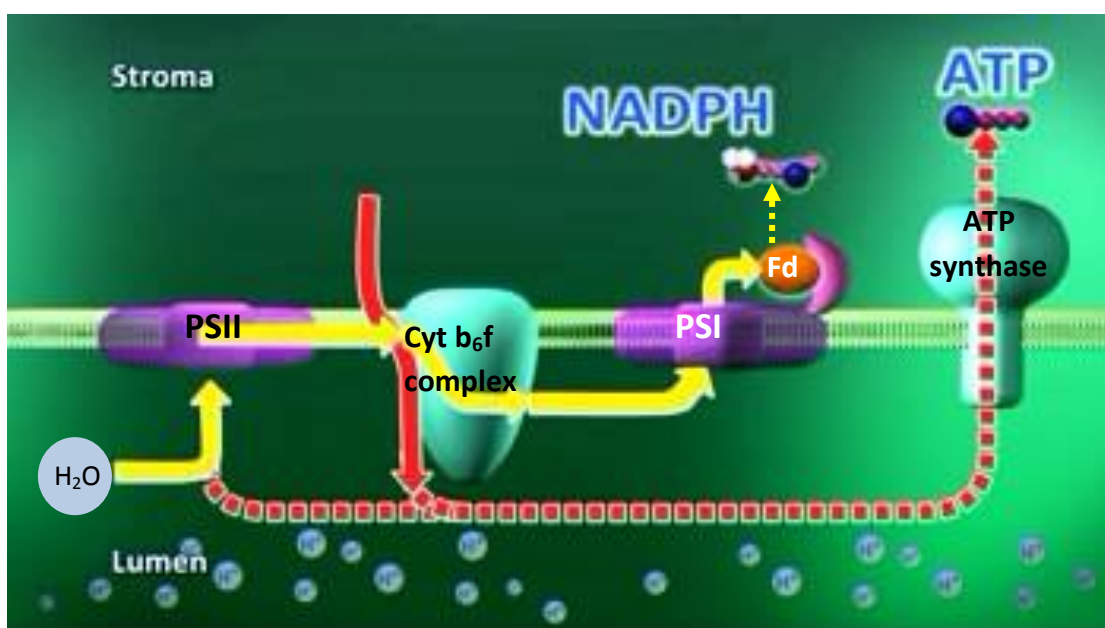
การเกิด proton gradient ระหว่าง stroma กับ lumen เนื่องจากการลำเลียงอิเล็กตรอนผ่าน cytochrome b<sub>6</sub>f complex และการแตกตัวของน้ำใน lumen สามารถผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ATP โดย ATP synthase ที่อยู่บริเวณเยื่อไทลาคอยด์ เมื่อ ATP synthase รับ proton gradient เข้าสู่สมดุล โดยปล่อยโปรตอนจาก lumen กลับสู่ stroma ผ่านทางโครงสร้างของ ATP synthase ศักย์ไฟฟ้าเคมีจะเปลี่ยนเป็นพลังงานในพันธะฟอสเฟตในโมเลกุล ATP ที่สร้างขึ้น กลไกเช่นนี้เรียกว่า chemiosmotic mechanism และการสังเคราะห์ ATP ในลักษณะนี้เรียกว่า photophosphorylation ซึ่งหมายถึงการสังเคราะห์ ATP ที่ได้จากการใช้พลังงานแสง (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 ATP synthase ใช้พลังงานในรูปของพลังงานศักย์ไฟฟ้าเคมี คือ proton gradient ที่เกิดขึ้นระหว่าง stroma และ lumen ในการสร้าง ATP จาก ADP และ  $\text{P}_i$



จะเห็นได้ว่า เมื่อแสงกระตุ้นให้ reaction center เสียอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกลำเลียงผ่านตัวรับอิเล็กตรอนหลายตัวไปยัง  $\text{NADP}^+$  การรับและส่งอิเล็กตรอนในแต่ละขั้น ก็คือการถ่ายทอดพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งนั่นเอง ในการลำเลียงอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรนี้ จะมี  $\text{NADP}^+$  เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายของปฏิกิริยา ซึ่งนั่นคือพลังงานแสงส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในโมเลกุลของ  $\text{NADPH}$  นอกจากนี้ การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรนี้ ยังมีการสร้าง proton gradient ซึ่งมีการนำพลังงานดังกล่าวไปใช้ในการสร้าง ATP โดย ATP synthase ซึ่งเรียกว่าการเกิด photophosphorylation เนื่องจากพลังงานในการสร้าง ATP นี้มาจากพลังงานแสง (รูปที่ 12)



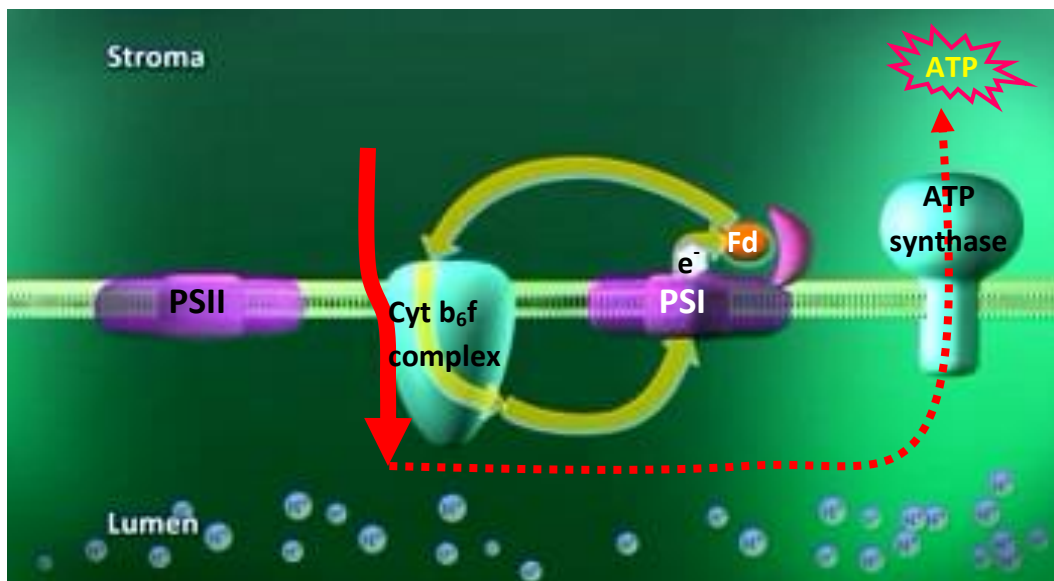
**รูปที่ 12** การลำเลียงอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักรทำให้มีการเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในโมเลกุลของ ATP และ NADPH เส้นทางสีเหลือง  $\rightarrow$  คือเส้นทางของอิเล็กตรอน เส้นทางสีแดง  $\rightarrow$  คือเส้นทางของโปรตอน

### การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร (cyclic electron transfer)

ในบางภาวะ เมื่อแสงกระตุ้นให้มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนออกจาก reaction center และเคลื่อนย้ายไปยังตัวรับอิเล็กตรอนต่างๆ ดังที่กล่าวในเรื่องปฏิกิริยาแสงแบบที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร แต่ ferredoxin ไม่สามารถส่งอิเล็กตรอนไปยัง  $\text{NADP}^+$  ได้ ferredoxin จะส่งอิเล็กตรอนมาให้กับ cytochrome ที่ cytochrome  $b_6f$  complex แทน เมื่อเกิดการส่งถ่ายอิเล็กตรอนใน cytochrome  $b_6f$  complex จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายโปรตอนเข้าสู่ lumen ด้วย และในที่สุดอิเล็กตรอนถูกส่งกลับไปยัง reaction center ของ photosystem I ที่เสียอิเล็กตรอนไป ศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อไทลาคอยด์ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้าง ATP โดย ATP synthase ดังวิธีการที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกจาก reaction center ของ photosystem I และในที่สุดก็ย้อนกลับมาสู่ที่เดิม จึงเรียกการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบนี้ว่า การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบ



เป็นวัฏจักร ซึ่งพลังงานแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีที่เข้าสู่กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์  
ในรูปของ ATP เท่านั้น (รูปที่ 13)



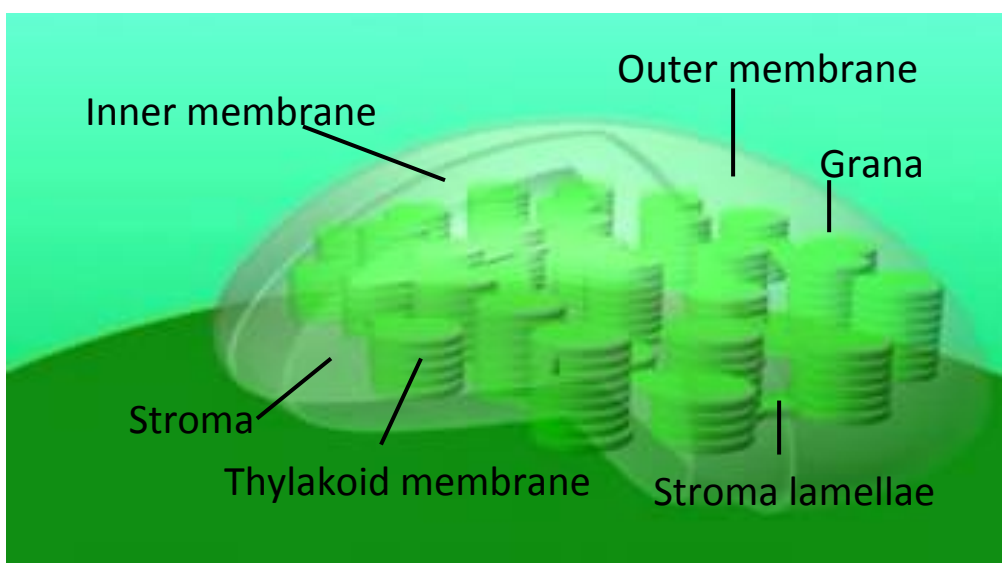
**รูปที่ 13** การลำเลียงอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักรทำให้มีการเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของ  
พลังงานเคมีในโมเลกุลของ ATP ซึ่งได้จาก proton gradient เส้นทางสีเหลือง → คือ  
เส้นทางของอิเล็กตรอน เส้นทางสีแดง → คือเส้นทางของโปรตอน

จะเห็นได้ว่า การถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร จะทำให้มีการเปลี่ยนพลังงานแสง  
ให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในโมเลกุลของ ATP และ NADPH ในขณะที่การถ่ายทอดอิเล็กตรอน  
แบบเป็นวัฏจักรนำไปสู่การสร้าง ATP เท่านั้น ดังนั้น การปรับเปลี่ยนระหว่างการถ่ายทอดอิเล็กตรอน  
แบบเป็นวัฏจักร และแบบไม่เป็นวัฏจักรจึงเป็นกลไกภายในของคลอโรพลาสต์ในการที่จะรักษาสมดุล  
ของสัดส่วนระหว่าง ATP และ NADPH (ATP/NADPH ratio) ให้เหมาะสมต่อกิจกรรมของคลอโร -  
พลาสต์ กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะเกิดควบคู่กันไปในธรรมชาติ



## แนวทางในการจัดการเรียนรู้

1. ผู้สอนแนะนำผู้เรียนเกี่ยวกับสมบัติของแสงและสมบัติของสารสีต่าง ๆ ดังปรากฏในคู่มือเรื่องพลังงานชีวิต
2. ผู้สอนแนะนำโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ ดังนี้  
คลอโรพลาสต์เป็นออร์แกเนลล์ (organelle) ที่มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น คือ เยื่อหุ้มชั้นนอก (outer membrane) และเยื่อหุ้มชั้นใน (inner membrane) ภายในคลอโรพลาสต์เป็นของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายเรียกว่าสโตรมา (stroma) ภายในยังมีเมมเบรนอีกระบบหนึ่งซึ่งไม่ได้มีความต่อเนื่องกับส่วนที่เป็นเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์เรียกว่า เยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) สารสีชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะอยู่ที่บริเวณนี้ เยื่อไทลาคอยด์บางส่วนจะมีการพับตัวเป็นถุงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เรียกว่า กรานุม (granum) พหุพจน์เรียกว่า กรานา (grana) ภายในถุงบรรจุของเหลวเรียกว่า ลูเมน (lumen) เยื่อไทลาคอยด์บางส่วนอาจอยู่ในภาวะที่คลี่เป็นแผ่น เรียกว่า สโตรมาลามेलลี (stroma lamellae) โครงสร้างของคลอโรพลาสต์แสดงได้ดังรูป



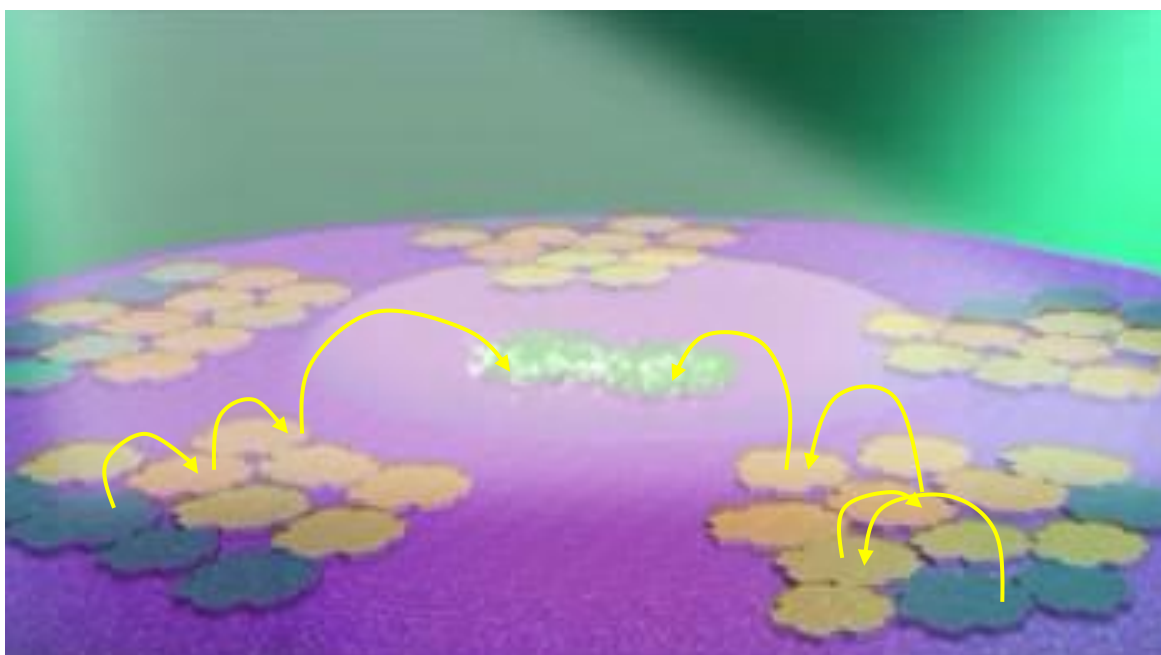


หากผู้เรียนเคยทราบมาบ้างแล้ว อาจใช้เฉพาะแผนภาพแล้วให้ผู้เรียนช่วยกันระบุโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของคลอโรพลาสต์



### 3. ผู้สอนอธิบายการทำงานของสารสีในระบบของ antenna

ในพืชชั้นสูง ซึ่งมีสารสีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนอยด์ และแคโรทีน สารสีต่างๆ เหล่านี้จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเพื่อทำงานร่วมกันในการรับพลังงานแสงเพื่อนำไปสร้างพันธะเคมีโดยการถ่ายทอดอิเล็กตรอน กลุ่มรับพลังงานแสงของสารสีเหล่านี้ เรียกว่า กลุ่มแอนเทนนา (antenna complex) ซึ่งจะประกอบด้วยสารสีชนิดต่างๆ รวมกันประมาณ 200-300 โมเลกุล





แต่ละ antenna complex จะมีสารสีที่จะทำหน้าที่ในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก (primary electron acceptor) เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น เรียกว่า ศูนย์กลางปฏิกิริยา หรือ reaction center ซึ่งเป็นโมเลกุลคู่ของคลอโรฟิลล์ เอ สารสีโมเลกุลอื่น ๆ จะทำหน้าที่ในการรับพลังงานแสงแล้วส่งพลังงานต่อเป็นทอด ๆ มายัง reaction center โดยที่ไม่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแต่อย่างใด แต่จะเป็นการส่งพลังงานจากสารสีโมเลกุลหนึ่งไปยังสารสีอีกโมเลกุลหนึ่งเท่านั้น ซึ่งในการถ่ายทอดพลังงานดังกล่าวในแต่ละชั้นอาจมีประสิทธิภาพไม่ถึง 100 % ทำให้ระดับพลังงานที่เข้าสู่ reaction center ค่อย ๆ ลดลงเป็นลำดับเมื่อเทียบกับจุดที่รับพลังงานเป็นครั้งแรก จึงมีการเปรียบว่า antenna complex ทำหน้าที่เสมือนกรวยนำพลังงานเข้าสู่ reaction center เพื่อนำไปใช้ในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของ reaction center อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและพร้อมที่จะถ่ายทอดไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวแรก

4. ผู้สอนนำผู้เรียนเข้าสู่เรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและเรื่องปฏิกิริยาแสง โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับกลุ่มโปรตีนที่ทำงานในปฏิกิริยาแสง ตลอดจนกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร และกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร รวมทั้งผลผลิตที่ได้จากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทั้ง 2 แบบ ดังที่ปรากฏในส่วนเนื้อหาข้างต้นของเอกสารนี้

5. ผู้สอนให้ผู้เรียนทบทวนเรื่องปฏิกิริยาแสงอีกครั้งด้วยสื่อการสอนนี้

6. ผู้สอนทดสอบผลการเรียนรู้ด้วยแบบทดสอบ ดังตัวอย่าง

6.1 ให้นักเรียนวาดภาพโดยให้มีองค์ประกอบต่อไปนี้ในภาพของนักเรียน พร้อมชี้ส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เยื่อไทลาคอยด์, antenna, photosystem I, photosystem II, P680, P700, cytochrome b<sub>6</sub>f complex, ATP synthase

6.2 **คำถาม** พลังงานแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีครั้งแรกที่ตำแหน่งใดของคลอโรพลาสต์

**ตอบ** ใน photosystem เมื่อ reaction center ถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้กับตัวรับอิเล็กตรอนใน photosystem

6.3 **คำถาม** องค์ประกอบของ photosystem คืออะไร

**ตอบ** โปรตีน สารสีในรูปของ antenna ซึ่งจะมี reaction center เป็นองค์ประกอบ และตัวรับอิเล็กตรอน

6.4 **คำถาม** reaction center ของ สิ่งมีชีวิตพวากยูแคริโอตเป็นสารชนิดใด

**ตอบ** คลอโรฟิลล์ เอ 2 โมเลกุล



6.5 **คำถาม** เมื่อสิ้นสุดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นวัฏจักร จะมีการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีในรูปใด

**ตอบ** ATP และ NADPH

6.6 **คำถาม** เมื่อสิ้นสุดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนแบบเป็นวัฏจักร จะมีการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีในรูปใด

**ตอบ** ATP

6.7 **คำถาม** จงเรียงลำดับการเปลี่ยนรูปพลังงานที่เกิดขึ้นใน photophosphorylation

**ตอบ** พลังงานแสง → พลังงานเคมี (ในการถ่ายทอดอิเล็กตรอน) → พลังงานศักย์ไฟฟ้าเคมี (ใน proton gradient) → พลังงานเคมีในพันธะฟอสเฟตของ ATP



## ภาคผนวก

### ก. คำอธิบายศัพท์

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| antenna                         | กลุ่มสารสีหลายชนิดที่ทำงานร่วมกันในการรับพลังงานแสงเพื่อส่งพลังงานแสงให้กับศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center)                                                                                                                                                                                                              |
| ATP                             | ชื่อเต็มว่า adenosine triphosphate เป็นสารพลังงานสูงที่สร้างขึ้นในกระบวนการหายใจและกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง                                                                                                                                                                                                                |
| ATP synthase                    | เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการสร้าง ATP จาก ADP และ $P_i$ โดยอาศัยพลังงานจาก proton gradient                                                                                                                                                                                                                                        |
| chemiosmotic mechanism          | กลไกการเคลื่อนย้ายไอออนข้ามเมมเบรนตาม electrochemical gradient ในกรณีการสังเคราะห์ ATP เป็นการเคลื่อนย้ายโปรตอนข้ามเมมเบรน ตาม electrochemical gradient แล้วนำพลังงานศักย์ไฟฟ้าเคมีที่สะสมไว้ไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP โดย ATP synthase                                                                                       |
| cytochrome $b_6f$ complex       | กลุ่มของโปรตีนเชิงซ้อนบนเยื่อไทลาคอยด์ซึ่งมี cytochrome $b_6$ และ cytochrome $f$ เป็นตัวรับและส่งอิเล็กตรอน                                                                                                                                                                                                                  |
| ferredoxin-NADP reductase (FNR) | เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจาก ferredoxin ไปยัง $NADP^+$ ได้ NADPH เป็นผลิตภัณฑ์                                                                                                                                                                                                                                |
| $NADP^+$                        | ย่อมาจาก Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate เป็น oxidized form ที่จะรับอิเล็กตรอนจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสง เพื่อนำพลังงานมาใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในวัฏจักรคัลวิน เมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะอยู่ในรูป reduced form คือ NADPH เป็น reducing power ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง                       |
| NADPH                           | ย่อมาจาก Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate NADPH เป็น reducing power ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งเป็นสารพลังงานสูงทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในวัฏจักรคัลวิน $NADP^+$ เป็น oxidized form ที่รับอิเล็กตรอนจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสง เพื่อนำพลังงานมาใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในวัฏจักรคัลวิน |



|                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P680                                               | reaction center ของ photosystem II ในยูแคริโอต                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| P700                                               | reaction center ของ photosystem I ในยูแคริโอต                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| phospholipids                                      | ลิพิด (lipid) ที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมมเบรน มีองค์ประกอบของโมเลกุล คือ diglyceride (กลีเซอรอลที่เชื่อมต่อกับกรดไขมัน 2 โมเลกุล) และหมู่ฟอสเฟต                                                                                                                                                                                                                                               |
| photochemical reaction                             | ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการกระตุ้นของพลังงานแสง ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงกระตุ้นให้เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน                                                                                                                                                                                                        |
| photophosphorylation                               | การสร้างพันธะฟอสเฟตในโมเลกุล ATP โดยอาศัยพลังงานจากแสง เป็นกระบวนการสร้าง ATP ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| proton gradient                                    | การแปรของความเข้มข้นของโปรตอนตำแหน่งต่าง ๆ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| stroma lamellae                                    | ส่วนของเยื่อไทลาคอยด์ภายในคลอโรพลาสต์ที่ไม่ได้ซ้อนพับเป็นถุง บางตำราเรียกว่า stroma thylakoid                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| thylakoid lumen                                    | ส่วนภายในถุงกรานุมซึ่งเป็นของเหลวที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย มีสารอินทรีย์หลายชนิดละลายอยู่                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| กรานา (grana)                                      | คำพหูพจน์ หมายถึงส่วนของเยื่อไทลาคอยด์ที่ซ้อนพับเป็นถุง เอกพจน์เรียกว่า กรานุม (granum)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| กรานุม (granum)                                    | ส่วนของเยื่อไทลาคอยด์ที่ซ้อนพับเป็นถุง พหูพจน์ เรียกว่า กรานา (grana)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> fixation) | หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งตามชื่อของผู้ค้นพบปฏิกิริยาว่า วัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดที่สโตรมา (stroma) ซึ่งคือส่วนที่เป็นของเหลวในคลอโรพลาสต์ เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) ให้มาอยู่ในรูปของคาร์บอนในสารอินทรีย์ซึ่งคือน้ำตาล โดยอาศัยพลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง |



|                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การแตกตัวของน้ำ<br>(photolysis)                                             | การสลายของโมเลกุลน้ำเป็น อิเล็กตรอน โปรตอน และออกซิเจน โดยมี เอนไซม์ที่ photosystem II เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ oxidized P680 เป็น oxidizing agent                                                                                                                                                                                                                                               |
| การถ่ายทอดอิเล็กตรอน<br>แบบเป็นวัฏจักร<br>(cyclic electron transfer)        | กระบวนการถ่ายอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสงที่อิเล็กตรอนจาก reaction center ของ photosystem I (P700) เคลื่อนย้ายผ่าน ferredoxin ไปยัง cytochrome b <sub>6</sub> f complex แล้วกลับคืนมายัง P700 ดังเดิม พลังงานจากแสงจะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP ผ่านทาง proton gradient ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการขนส่งอิเล็กตรอนผ่าน cytochrome b <sub>6</sub> f complex                                             |
| การถ่ายทอดอิเล็กตรอน<br>แบบไม่เป็นวัฏจักร<br>(non-cyclic electron transfer) | การถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่มีการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนออกจาก reaction center ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนเป็นลำดับ จนถึง NADP <sup>+</sup> ได้ เป็น NADPH และพลังงานอีกส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการสร้าง ATP                                                                                                                                                                         |
| คลอโรพลาสต์                                                                 | ออร์แกเนลล์ในยูแคริโอต มีหน้าที่หลักในการสังเคราะห์ด้วยแสง                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| ปฏิกิริยาคาร์บอน<br>(carbon reaction)                                       | หรือการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งตามชื่อของผู้ค้นพบปฏิกิริยาว่า วัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นที่ stroma ในคลอโรพลาสต์ เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) ให้มาอยู่ในรูปของคาร์บอนในสารอินทรีย์ซึ่งคือน้ำตาล โดยอาศัยพลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง |
| ปฏิกิริยาแสง<br>(light reaction)                                            | ขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นที่เยื่อไทลาคอยด์ เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีในรูปของ ATP และ NADPH                                                                                                                                                                                                                                                     |
| พลาสโทควิโนน<br>(plastoquinone)                                             | ตัวขนส่งอิเล็กตรอนจาก photosystem II ไปยัง cytochrome b <sub>6</sub> f complex                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| พลาสโตไซยานิน<br>(plastocyanin)                                             | โปรตีนซึ่งมีทองแดงเป็นองค์ประกอบทำหน้าที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจาก cytochrome b <sub>6</sub> f complex ไปยัง P700 ที่เสียอิเล็กตรอนไปแล้ว                                                                                                                                                                                                                                                           |



|                                               |                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เฟอรีดอกซิน<br>(ferredoxin, Fd)               | โปรตีนซึ่งมีเหล็กและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบทำหน้าที่ในการขนส่งอิเล็กตรอน ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นตัวนำอิเล็กตรอนส่งให้กับ $\text{NADP}^+$ โดยอาศัยการเร่งปฏิกิริยาของ ferredoxin-NADP reductase (FNR)                                 |
| เยื่อไทลาคอยด์<br>(Thylakoid membrane)        | เยื่อภายในคลอโรพลาสต์หรือไซยาโนแบคทีเรียทำหน้าที่ในปฏิกิริยาแสงของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง                                                                                                                                                  |
| ระบบแสง<br>(photosystem)                      | หน่วยของการสังเคราะห์ด้วยแสงบนเยื่อไทลาคอยด์ประกอบด้วยกลุ่มของโปรตีนเชิงซ้อน สารสี ตัวรับอิเล็กตรอนและเอนไซม์หลายชนิด ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีโดยการกระตุ้นให้เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอน                               |
| วัฏจักรคัลวิน<br>(Calvin cycle)               | กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ค้นพบโดย M. Calvin, A. Benson, J.A. Bassham และคณะ ในปี ค.ศ. 1950 บางครั้งเรียกว่า Calvin-Benson cycle ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ carboxylation, reduction และ regeneration                                   |
| ศักย์ไฟฟ้าเคมี<br>(electrochemical potential) | ศักย์ของพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของศักย์ทางเคมี (chemical potential) และไฟฟ้าสถิต (electrostatics)                                                                                                                                             |
| สโตรมา (stroma)                               | ของเหลวภายในคลอโรพลาสต์ มีตัวทำละลายคือน้ำ ประกอบด้วยเอนไซม์และสารอินทรีย์ต่าง ๆ หลายชนิด รวมทั้งสารพันธุกรรม                                                                                                                                 |
| สารสี (pigment)                               | สารที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ส่องผ่านหรือสะท้อนขึ้น เนื่องจากสมบัติการดูดกลืนแสงของสารนั้น เช่น เมื่อแสงส่องมายังคลอโรฟิลล์ เฉพาะแสงสีเขียวที่ส่งผ่านมายังตา เนื่องจากคลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงสีอื่น ๆ ใน visible light ยกเว้นแสงสีเขียว |



## ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม

1. Postlethwait, J.H., Hopson, J.L and Veres, R.C. 1991. Biology : Bringing Science to Life. McGraw Hill, Inc, USA.
2. Taiz, L. and Zeiger, E. Plant physiology. 5<sup>th</sup> edition. 2010. Sinauer Associates Inc. Publishers, USA.
3. Yamane, K., Hayakawa, K., Kawasaki, M., Taniguchi, M. and Miyake, H. 2003. Bundle sheath chloroplasts of rice are more sensitive to drought stress than mesophyll chloroplasts. *Journal of Plant Physiology*, 160: 1319-1327.



## รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน

| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                                                   | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ           |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1      | ชีววิทยาคืออะไร                                                                           | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 2      | ชีวจริยธรรม                                                                               | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 3      | การวางแผนการทดลอง และการตรวจสอบสมมติฐาน                                                   | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 4      | ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา                                                               | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 5      | ส่วนประกอบและวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง                                            | อ.ดร.จิรารัช กิตนะ            |
| 6      | การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาและประมาณขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง                       | อ.ดร.จิรารัช กิตนะ            |
| 7      | ปฏิกิริยา polymerization และ hydrolysis                                                   | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 8      | โปรตีน                                                                                    | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 9      | กรดนิวคลีอิก                                                                              | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 10     | การดำรงชีวิตของเซลล์                                                                      | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 11     | การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ                                                              | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 12     | การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะไกลในพืชและสัตว์                                    | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 13     | การสื่อสารระยะไกลในสัตว์                                                                  | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 14     | องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์                                                       | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 15     | ทางเดินอาหารและกระบวนการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง                                     | ผศ.ดร.พัชณี สิงห์อาษา         |
| 16     | การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก                                                                   | ผศ.ดร.พัชณี สิงห์อาษา         |
| 17     | ภาพรวมของการสลายอาหารระดับเซลล์                                                           | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 18     | ลูกโซ่หายใจ                                                                               | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 19     | oxidative phosphorylation                                                                 | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 20     | การแลกเปลี่ยนแก๊สของสัตว์น้ำและสัตว์บก                                                    | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 21     | เรื่องกลไกการหายใจและศูนย์ควบคุมการหายใจในคน                                              | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 22     | ไต: หน่วยไต และการสร้างปัสสาวะของไตคน                                                     | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 23     | ระบบหมุนเวียนเลือดแบบเปิด (open circulatory system) และแบบปิด (closed circulatory system) | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |



| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                              | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ           |
|--------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 24     | องค์ประกอบของเลือด หมู่เลือด และ การแข็งตัวของเลือด                  | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |
| 25     | การป้องกันตนเองของร่างกาย และ ระบบภูมิคุ้มกัน                        | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |
| 26     | การเคลื่อนที่ของปลา                                                  | รศ.วีณา เมฆวิชัย              |
| 27     | กลไกการหดตัวของกล้ามเนื้อโครงร่าง                                    | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 28     | การทำงานของเซลล์ประสาท                                               | อ.ดร.นพดล กิตนะ               |
| 29     | การถ่ายทอดกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาท                              | อ.ดร.นพดล กิตนะ               |
| 30     | เซลล์รับความรู้สึก                                                   | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 31     | หูและการได้ยิน                                                       | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล   |
| 32     | ฮอร์โมนคืออะไร                                                       | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 33     | ชนิดของฮอร์โมนและชนิดของเซลล์เป้าหมาย                                | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 34     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 1 วัฏจักรเซลล์ อินเทอร์เฟส และ division phase | ผศ.ดร.อรรณณ สัตย์าลัย         |
| 35     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 2 วัฏจักรเซลล์ division phase mitosis         | ผศ.ดร.อรรณณ สัตย์าลัย         |
| 36     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 3 วัฏจักรเซลล์; division phase; meiosis       | ผศ.ดร.อรรณณ สัตย์าลัย         |
| 37     | เซลล์พืช                                                             | ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่           |
| 38     | เนื้อเยื่อพืช                                                        | ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่           |
| 39     | ปากใบและการควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ                                 | อ.ดร.อัญชลี ใจดี              |
| 40     | การลำเลียงน้ำของพืช                                                  | รศ.ดร.ปรีดา บุญ-หลง           |
| 41     | พลังงานชีวิต                                                         | รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์       |
| 42     | ปฏิกิริยาแสง (Light reaction)                                        | รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์       |
| 43     | ปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle                    | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 44     | กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช C <sub>4</sub>       | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 45     | กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM                  | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 46     | ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสง                                    | รศ.ดร.ปรีดา บุญ-หลง           |



| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                            | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ          |
|--------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 47     | โครงสร้างของดอก (Structure of Flower)                              | ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีสานันท์    |
| 48     | การปฏิสนธิในพืชดอก                                                 | ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีสานันท์    |
| 49     | การเกิดและโครงสร้างผล                                              | อ.ดร.สร้อยนภา ญาณวัฒน์       |
| 50     | การงอกของเมล็ด                                                     | รศ.นันทนา อังกินันท์         |
| 51     | การวัดการเจริญเติบโตของพืช                                         | อ.ดร.อัญชลี ใจดี             |
| 52     | ออกซิน                                                             | ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ        |
| 53     | การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตร                      | ผศ.พัชรา ลิมปะนะเวช          |
| 54     | การเคลื่อนไหวของพืช                                                | ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ        |
| 55     | ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก                                       | ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์    |
| 56     | กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ                                        | ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์    |
| 57     | มัลติเปิลแอลลีล (Multiple alleles)                                 | อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรานันท์    |
| 58     | พอลิยีน (Polygene)                                                 | อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรานันท์    |
| 59     | โครงสร้างของดีเอ็นเอ (DNA structure)                               | อ.ดร.เพลินพิศ ไชยชัยชำนาญกิจ |
| 60     | โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome structure)                        | อ.ดร.เพลินพิศ ไชยชัยชำนาญกิจ |
| 61     | การถอดรหัส (Transcription)                                         | อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพานี     |
| 62     | การแปลรหัส (Translation)                                           | อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพานี     |
| 63     | แนะนำพันธุวิศวกรรม                                                 | อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศน์ย์จิต    |
| 64     | ขั้นตอนของพันธุวิศวกรรม                                            | อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศน์ย์จิต    |
| 65     | สิ่งมีชีวิตดัดแปลงพันธุกรรม (Genetically modified organisms: GMOs) | อ.ดร.รัชนิกร ธรรมโชติ        |
| 66     | ชาร์ล ดาร์วิน คือใคร                                               | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 67     | หลักฐานการเกิดวิวัฒนาการ                                           | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 68     | ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วิน                                          | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 69     | วิวัฒนาการของเชื้อดื้อยา                                           | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 70     | วิวัฒนาการของมนุษย์                                                | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 71     | อาณาจักรมอเนรา                                                     | ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์          |



| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                                                     | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ         |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 72     | อาณาจักรโพรทิสตา                                                                            | ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์         |
| 73     | อาณาจักรฟังไจ                                                                               | ผศ.ดร.จิตรตรา เพ็ญเขียว     |
| 74     | ความหลากหลายของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง                                                      | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 75     | ความหลากหลายของสัตว์มีกระดูกสันหลัง                                                         | รศ.วีณา เมฆวิชัย            |
| 76     | กลไกของพฤติกรรม                                                                             | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 77     | พฤติกรรมการเรียนรู้แบบต่าง ๆ                                                                | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 78     | การสื่อสารระหว่างสัตว์                                                                      | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 79     | แนวคิดเกี่ยวกับระบบนิเวศ                                                                    | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 80     | ไบโอมบนบก                                                                                   | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 81     | การสำรวจระบบนิเวศบนบก                                                                       | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 82     | ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตกับปัจจัยทางกายภาพ                                            | ผศ.ดร.วิเชษฐ คนเชื้อ        |
| 83     | ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในระบบนิเวศ                                         | ผศ.ดร.วิเชษฐ คนเชื้อ        |
| 84     | โซ่อาหารและใยอาหาร                                                                          | ผศ.ดร.วิเชษฐ คนเชื้อ        |
| 85     | วัฏจักรสาร                                                                                  | ผศ.ดร.วิเชษฐ คนเชื้อ        |
| 86     | ความหมายของคำว่าประชากร(population) และประวัติการศึกษาประชากร                               | รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์         |
| 87     | วิธีการหาค่าความหนาแน่นของประชากรโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบวางแปลง (quadrat sampling method) | รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์         |
| 88     | การเพิ่มขนาดของประชากร (population growth)                                                  | รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์         |
| 89     | โครงสร้างอายุ (age structure) ของประชากร                                                    | รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์         |
| 90     | ประเภทของทรัพยากร                                                                           | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |
| 91     | ปัญหาที่มีต่อทรัพยากรธรรมชาติและสภาพแวดล้อม                                                 | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |
| 92     | หลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ                                                             | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |