



คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

วิชาชีววิทยา

เรื่อง

ปฏิกิริยาคาร์บอน

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์

พุทธศักราช 2554



กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ นันทนา อังกินันท์

รองศาสตราจารย์ สุมิตรา คงชื่นสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัทธรา ลิ้มปะนะเวช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลนันท์

นางปริญญา นุช กลิ่นรัตน์

นางจุฬนา บางยี่ขัน

สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ข้อมูล

ห้องปฏิบัติการกลาง ภาควิชาพฤกษศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



คำชี้แจง

สื่อนำเข้าสู่บทเรียน เรื่องปฏิกิริยาคาร์บอน 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 ปฏิกิริยาคาร์บอนนี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้สอนเข้าใจจุดประสงค์ของสื่อ การสอนที่ผลิตขึ้น และเสนอแนวทางการใช้สื่อดังกล่าวเพื่อกระตุ้นการเรียนรู้ของผู้เรียนในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมถึงให้ความกระจ่างเกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ และเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้บูรณาการความรู้ที่ได้รับจากการอภิปรายได้อย่างกว้างขวาง เพื่อให้การจัดการเรียนการสอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภจิตรา ชัชวาลย์ ผู้จัดทำคู่มือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญหลง ผู้ตรวจคู่มือ



สารบัญ

	หน้า
จุดประสงค์	5
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	5
เนื้อหา	6
แนวทางในการจัดการเรียนรู้	13
ภาคผนวก	18
ก. คำอธิบายศัพท์	
ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม	
รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน	22



จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายกลไกการตรึงคาร์บอนอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรคัลวิน
2. อธิบายความสำคัญของสารพลังงานสูงที่ได้จากปฏิกิริยาแสงที่มีต่อปฏิกิริยาการคาร์บอนและระบุตำแหน่งของการเกิดวัฏจักรคัลวิน
3. ระบุผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัฏจักรคัลวิน

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อประกอบการสอนเรื่องปฏิกิริยาการคาร์บอนแล้วสามารถ

1. เชื่อมโยงปฏิกิริยาแสงและปฏิกิริยาการคาร์บอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้
2. ระบุบทบาทของสารพลังงานสูงที่ได้จากปฏิกิริยาแสงที่มีต่อวัฏจักรคัลวินได้
3. อธิบายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในวัฏจักรคัลวินได้
4. ยกตัวอย่างพืช C_3 ได้



เนื้อหา

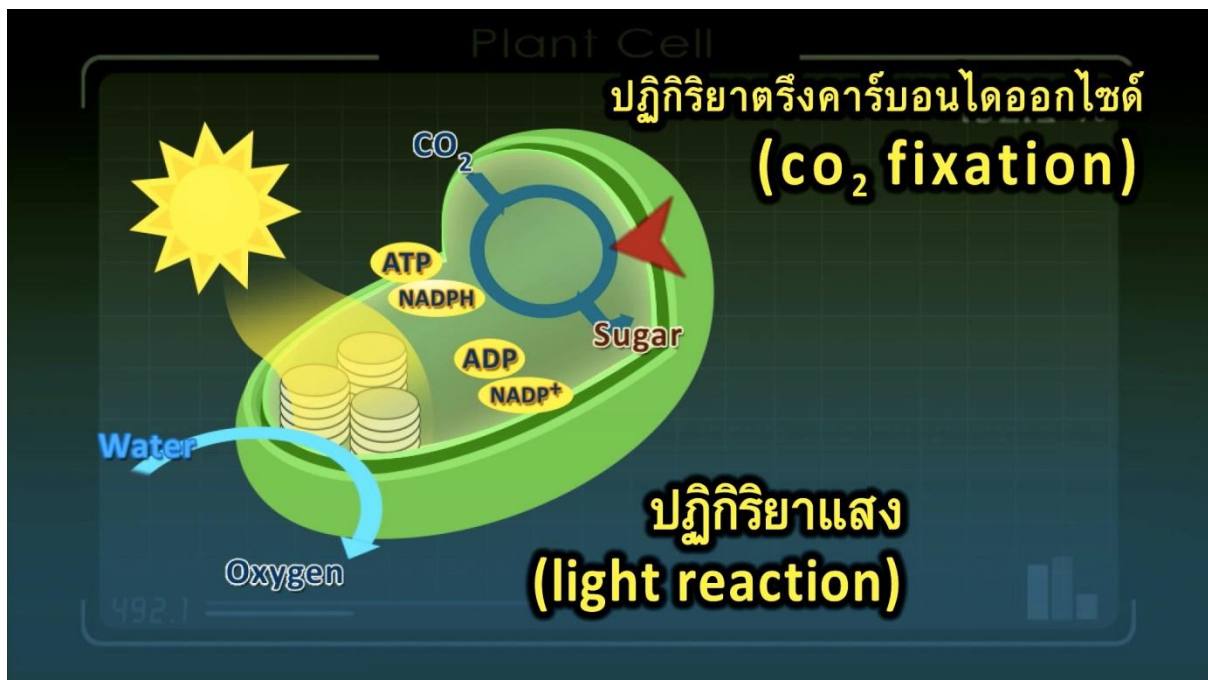
กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในโมเลกุลสารอินทรีย์ ในสิ่งมีชีวิตประเภทยูแคริโอต (eukaryote) มีคลอโรพลาสต์ (chloroplast) เป็นออร์แกเนลล์ (organelle) ที่ดำเนินกิจกรรมดังกล่าว

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก (รูปที่ 1) คือ

1. ปฏิกริยาแสง (light reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณเยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีของสารอินทรีย์พลังงานสูง 2 ชนิด ได้แก่ ATP และ NADPH ซึ่งสารพลังงานสูงดังกล่าวนี้ จะถูกนำมาใช้ในปฏิกริยาดังการบอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation reaction) ต่อไป

2. ปฏิกริยาดังการบอน (carbon reaction) หรือปฏิกริยาดังการบอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation reaction) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งตามชื่อของผู้ค้นพบปฏิกริยาว่า วัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) ปฏิกริยานี้เกิดที่บริเวณสโตรมา (stroma) ซึ่งคือส่วนที่เป็นของเหลวในคลอโรพลาสต์ ในปฏิกริยานี้ จะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้มาอยู่ในรูปของคาร์บอนอินทรีย์คือน้ำตาล โดยอาศัยพลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกริยาแสง เมื่อ ATP และ NADPH เข้าทำปฏิกริยาในวัฏจักรคัลวิน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ADP และ NADP^+ ซึ่งจะกลับเข้าไปรับพลังงานจากปฏิกริยาแสงใหม่

ดังนั้น โดยภาพรวมของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อสิ้นสุดทั้งปฏิกริยาแสง และปฏิกริยาดังการบอนไดออกไซด์ พลังงานแสงจะเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในโมเลกุลของน้ำตาล ซึ่งก็คือพันธะเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์น้ำตาลในปฏิกริยาดังการบอนไดออกไซด์ หรือวัฏจักรคัลวิน นั่นเอง



รูปที่ 1 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นที่คลอโรพลาสต์ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ ปฏิกริยาแสงและปฏิกริยาดังการบอนไดออกไซด์

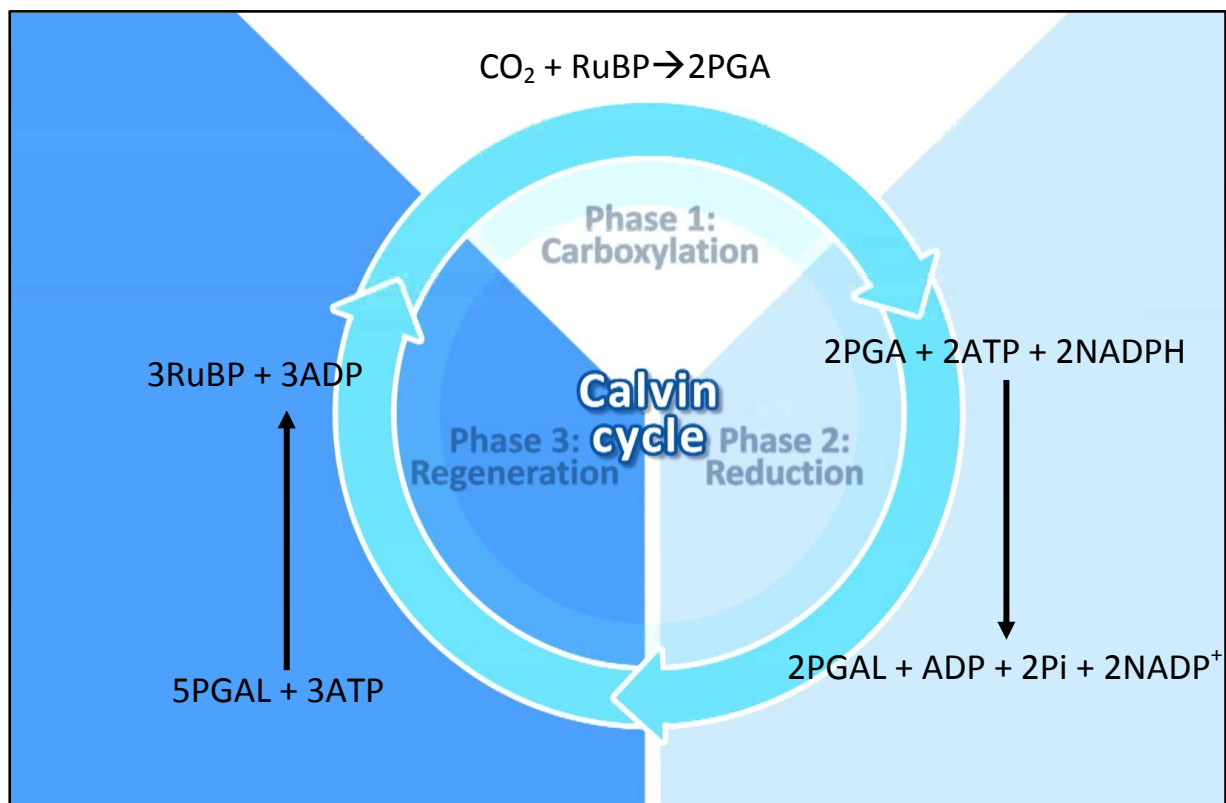


ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบด้วย 3 ระยะ (phase) (รูปที่ 2) คือ

Phase 1: Carboxylation (การตรึงคาร์บอน) คือ กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเป็นองค์ประกอบ คือ Ribulose-1,5-bisphosphate (ไรบูโลส-1,5-บิสฟอสเฟต หรือ RuBP)

Phase 2: Reduction (การรีดิวซ์) คือ กระบวนการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอน carboxylation ให้เป็นน้ำตาลโดยใช้พลังงานจาก ATP และ NADPH ซึ่งได้จากปฏิกิริยาแสง

Phase 3: Regeneration (การสร้างทดแทน) คือ กระบวนการสร้าง RuBP กลับคืน โดยใช้โมเลกุลของน้ำตาลบางส่วนที่ได้จากขั้นตอน reduction และ ATP จากปฏิกิริยาแสง



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบด้วย 3 phase คือ carboxylation reduction และ regeneration



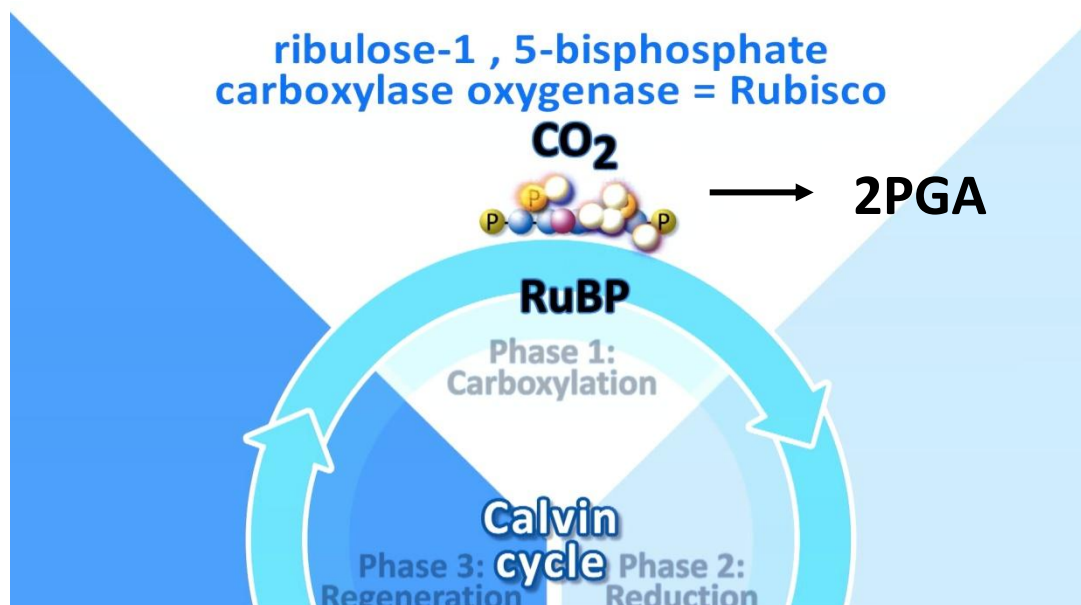
ขั้นตอนในวัฏจักรคัลวิน

รายละเอียดของวัฏจักรคัลวินมีดังต่อไปนี้

1. Carboxylation

คาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายอยู่ในสโตรมาของคลอโรพลาสต์จะถูกนำมารวมกับ Ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม โดยมีเอนไซม์ในสโตรมา คือ ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase (ไรบูโลส-1,5- บิสฟอสเฟต หรือ rubisco (รูบิสโก) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลซึ่งมีคาร์บอน 1 อะตอมเป็นองค์ประกอบ เข้าทำปฏิกิริยากับ RuBP 1 โมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม จะได้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 6 อะตอมที่ไม่เสถียร จึงแตกตัวเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม จำนวน 2 โมเลกุล คือ ฟอสโฟกลีเซอเรต (phosphoglycerate) หรือเรียกโดยย่อว่า PGA (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 Phase 1: carboxylation เป็นขั้นตอนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับ RuBP โดยมี rubisco เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ phosphoglycerate (PGA) 2 โมเลกุลเป็นผลิตภัณฑ์

2. Reduction

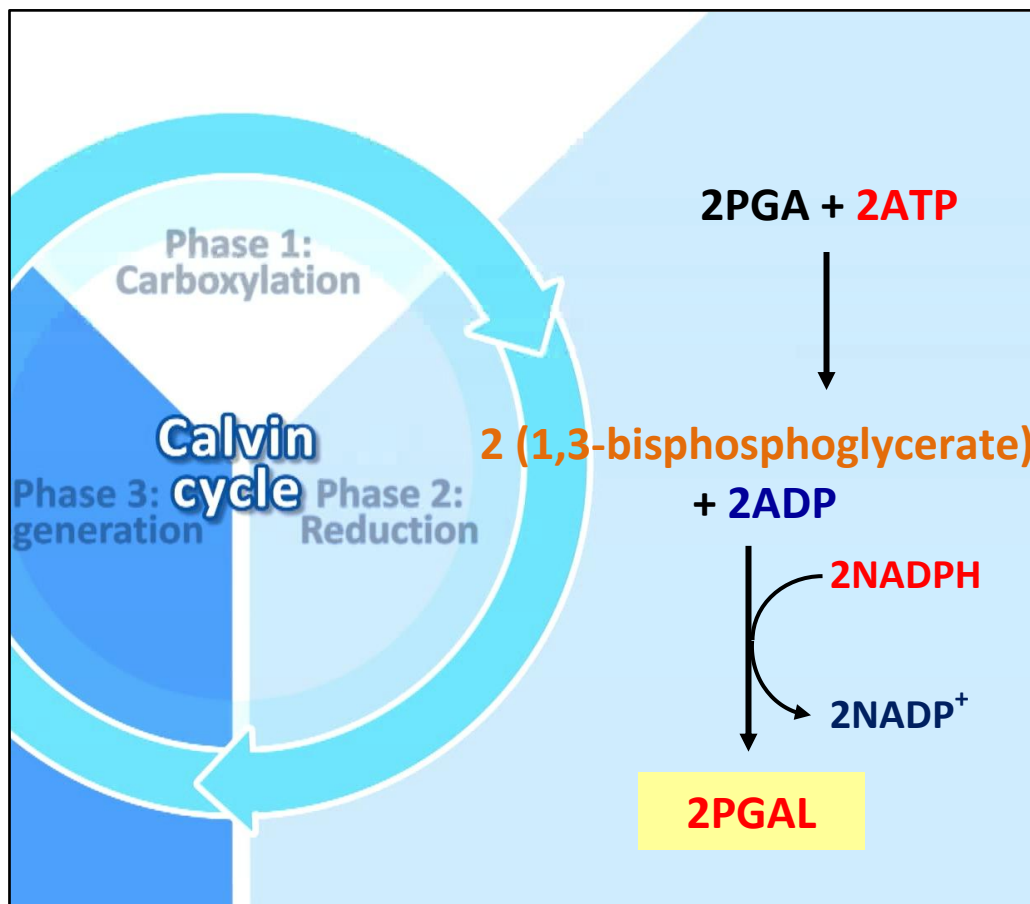
ขั้นตอนนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยา reduction ของ PGA เพื่อสร้างเป็นน้ำตาลในรูปของฟอสโฟกลีเซอรัลดีไฮด์ (phosphoglyceraldehyde) หรือ กลีเซอรัลดีไฮด์ -3-ฟอสเฟต (glyceraldehydes-3-phosphate) หรือเรียกโดยย่อว่า PGAL หรือ G-3-P ตามลำดับ

ในขั้นตอนแรก PGA จะเข้าทำปฏิกิริยากับ ATP ซึ่งได้จากปฏิกิริยาแสง ทำให้ได้รับพลังงานจากพันธะฟอสเฟตของ ATP ได้เป็น 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรต (1,3-bisphosphoglycerate) เมื่อ ATP ให้พันธะฟอสเฟตแก่ PGA ทำให้เกิด ADP ซึ่งจะถูกส่งกลับเข้าไปรับฟอสเฟตใหม่จากปฏิกิริยาแสง



จากนั้น 1,3-bisphosphoglycerate จะรับอิเล็กตรอนจาก NADPH เกิดปฏิกิริยา reduction ได้เป็น PGAL ซึ่งเป็นน้ำตาลที่เกิดขึ้นใหม่จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง PGAL ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม จึงเรียก PGAL ว่าเป็นน้ำตาล C3

เมื่อเริ่มต้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลและ RuBP 1 โมเลกุล จะได้ PGA 2 โมเลกุลเข้าสู่ขั้นตอน reduction ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา reduction จะได้ PGAL 2 โมเลกุล (รูปที่ 4)

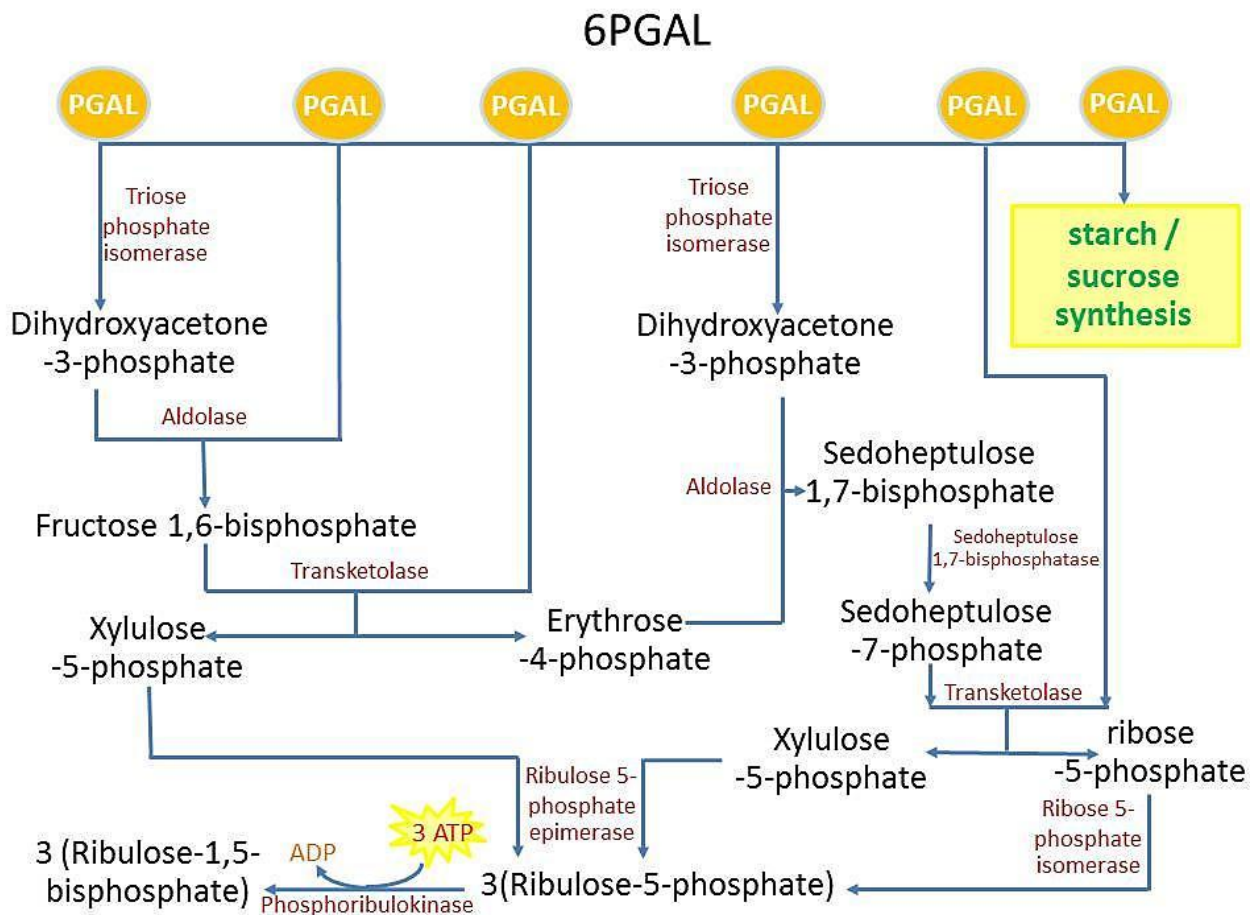


รูปที่ 4 Phase 2: Reduction เป็นกระบวนการเปลี่ยน PGA เป็นน้ำตาล phosphoglyceraldehyde (PGAL) โดยอาศัยสารพลังงานสูง ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง

3. Regeneration

ในขั้นตอนนี้ PGAL จะถูกเปลี่ยนกลับคืนเป็น RuBP ใหม่ โดยจะใช้ ATP 1 โมเลกุลต่อการสร้าง RuBP 1 โมเลกุล

ปฏิกิริยาใน regeneration phase นี้ ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายขั้นตอน ซึ่งในการสร้าง RuBP ขึ้นใหม่ได้นั้น จะต้องใช้ PGAL อย่างน้อย 5 โมเลกุล จึงจะสามารถสร้าง RuBP ขึ้นมาใหม่ได้ทั้งสิ้น 3 โมเลกุล (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 Phase 3: Regeneration เป็นกระบวนการสร้าง RuBP ใหม่อีกครั้งหนึ่งโดยมี PGAL เป็นสารตั้งต้น

ปฏิกิริยาใน regeneration phase เริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PGAL และ dihydroxyacetone phosphate (ไดไฮดรอกซีอะซีโตนฟอสเฟต) หรือ DHAP ซึ่งเป็น isomer ของ PGAL ได้เป็นสารที่มีคาร์บอน 6 อะตอม คือ fructose-1,6-bisphosphate (ฟรุกโทส-1,6-บิสฟอสเฟต) จากนั้นเอนไซม์ fructose-1,6-bisphosphatase (ฟรุกโทส-1,6-บิสฟอสฟาเทส) ตัดหมู่ฟอสเฟตออกจาก fructose-1,6-bisphosphate ได้เป็น fructose-6-phosphate (ฟรุกโทส-6-บิสฟอสเฟต) ซึ่งทำปฏิกิริยากับ PGAL อีกโมเลกุลหนึ่ง ได้เป็น erythrose-4-phosphate (อีริทโรส-4-ฟอสเฟต) และ xylulose-5-phosphate (ไซลูลอส-5-ฟอสเฟต) ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอน 4 และ 5 อะตอม ตามลำดับ สาร C4 คือ erythrose-4-phosphate ทำปฏิกิริยากับ DHAP ได้เป็น sedoheptulose-1,7-bisphosphate (ซีโดเฮปทูโลส-1,7-บิสฟอสเฟต) ซึ่งมีคาร์บอน 7 อะตอม (C7) หลังจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ phosphatase สาร C7 ทำปฏิกิริยากับ PGAL ได้เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 5 อะตอม 2 โมเลกุลคือ ribose-5-phosphate (ไรโบส-5-ฟอสเฟต) และ xylulose-5-phosphate (ไซลูลอส-5-ฟอสเฟต) จากนั้น xylulose-5-phosphate 2 โมเลกุล จะถูกเปลี่ยนเป็น ribose-5-phosphate ทำให้ได้ ribose-5-phosphate ทั้งหมด 3 โมเลกุลจาก PGAL 5 โมเลกุล ribose-5-phosphate ทั้ง 3 โมเลกุลนี้ จะถูกเปลี่ยนเป็น ribulose-1,5-



bisphosphate โดยปฏิกิริยาของ phosphoribulokinase (ฟอสโฟไรบูลไคเนส) และใช้พลังงานจาก ATP 3 โมเลกุล ได้เป็น RuBP 3 โมเลกุล
(หมายเหตุ รายละเอียดของข้อมูลในรูปที่ 5 ไม่อยู่ในเนื้อหาสำหรับมัธยมศึกษาตอนปลาย แต่ให้ไว้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้สอนเท่านั้น)

การสร้างน้ำตาลซูโครส 1 โมเลกุล ต้องมาจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 3 โมเลกุล
จากขั้นตอนในวัฏจักรคัลวินที่แสดงข้างต้นจะเห็นว่า การเกิดวัฏจักรคัลวินที่ครบสมบูรณ์ คือ ตั้งแต่การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ เข้ากับ RuBP จนได้ RuBP กลับคืนนั้นต้องเริ่มต้นจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 3 โมเลกุลเข้ากับ RuBP 3 โมเลกุลใน carboxylation phase ซึ่งจะได้เป็น PGA 6 โมเลกุล เข้าสู่กระบวนการใน reduction phase ได้เป็น PGAL 6 โมเลกุล จากนั้น PGAL 5 โมเลกุลเข้าสู่ปฏิกิริยาใน regeneration phase เพื่อเปลี่ยนกลับเป็น RuBP 3 โมเลกุลกลับคืน ซึ่งจะทำให้เหลือน้ำตาล PGAL ซึ่งเป็นน้ำตาล C3 1 โมเลกุล เพื่อใช้ในการสร้างน้ำตาล

ในการลำเลียงน้ำตาลออกจากเซลล์ที่มีกระบวนการสังเคราะห์ไปยังเซลล์อื่น ๆ ที่ต้องการสารอาหาร จะลำเลียงผ่านเนื้อเยื่อลำเลียงอาหารหรือโฟลเอ็ม (phloem) ซึ่งในการลำเลียงนั้นจะลำเลียงในรูปของน้ำตาลซูโครส ซึ่งเป็น non-reducing sugar ดังนั้น ในการสังเคราะห์น้ำตาลซูโครส 1 โมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 12 อะตอม จึงต้องการสารตั้งต้น PGAL 4 โมเลกุล โดย PGAL จะถูกลำเลียงออกจากคลอโรพลาสต์เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นน้ำตาลซูโครสในไซโทพลาสซึมของ mesophyll cell (เซลล์มีโซฟิลล์) ก่อนที่จะถูกลำเลียงไปยังโฟลเอ็ม

จากข้างต้นจะเห็นว่า ในการสังเคราะห์ PGAL 1 โมเลกุล ต้องใช้ คาร์บอนไดออกไซด์ 3 โมเลกุล ดังนั้น หากต้องการ PGAL 4 โมเลกุลในการสังเคราะห์น้ำตาลซูโครส จะได้จากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในวัฏจักรคัลวิน จำนวน 12 โมเลกุล

เอนไซม์หลายชนิดในวัฏจักรคัลวินต้องการแสงเป็นตัวกระตุ้นการทำงาน

แต่เดิมปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรคัลวินนี้ เรียกว่า dark reaction เพื่อให้ตรงข้ามกับปฏิกิริยาแสง (light reaction) แต่ในปัจจุบันพบว่า เอนไซม์หลายชนิดในวัฏจักรคัลวินต้องการแสงในการกระตุ้นให้เกิดการทำงานได้ เอนไซม์ดังกล่าว ได้แก่ rubisco, fructose-1,6-bisphosphatase, sedoheptulose-1,7-bisphosphatase, phosphoribulokinase และ NADP-glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase ดังนั้น จึงไม่ควรเรียกว่า dark reaction

พืช C₃ พืช C₄ และพืช CAM

จะเห็นว่าสารคงตัวชนิดแรกในวัฏจักรคัลวินที่เกิดขึ้นหลังจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์คือ PGA ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ตัวแรกที่เกิดขึ้นจากคาร์บอนอนินทรีย์ PGA นี้ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม เราจึงเรียกพืชที่มีการสร้างคาร์บอนอินทรีย์ตัวแรกเป็นสารที่มีคาร์บอน 3 อะตอม จากคาร์บอนอนินทรีย์ว่า พืช C₃



พืช C_3 เป็นพืชกลุ่มหลักบนโลก ตัวอย่างเช่น ข้าว มะม่วง จามจุรี ถั่วชนิดต่าง ๆ กุหลาบ มะลิ เป็นต้น นอกจากพืช C_3 แล้ว ยังมีพืชกลุ่มอื่นที่มีกลไกการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ที่นอกเหนือไปจากวัฏจักรคัลวิน ทำให้คาร์บอนอินทรีย์ตัวแรกที่เกิดขึ้นจากการตรึงคาร์บอนอินทรีย์ไม่ใช่สาร C_3 พืชกลุ่มอื่นได้แก่ พืช C_4 และ พืช CAM ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในบทต่อไป

ตัวอย่างพืชที่เป็นพืช C_4 เช่น ข้าวโพด อ้อย และบานไม่รู้โรย ส่วนพืช CAM ได้แก่ สับปะรด กระบองเพชร และกล้วยไม้ เป็นต้น



แนวทางในการจัดการเรียนรู้

สื่อประกอบการสอนเรื่อง ปฏิบัติการคาร์บอนนี้ จะช่วยผู้สอนสรุปภาพรวมของวัฏจักรคาร์บอน และผู้เรียนสามารถใช้ในการทบทวนความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ในการจัดการเรียนการสอนเรื่องปฏิบัติการคาร์บอน อาจทำได้ดังนี้

1. ผู้สอนสรุปภาพรวมเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงว่า คือกระบวนการที่พืชเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในสารอินทรีย์

2. **คำถาม:** พืชเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีได้อย่างไร

ตอบ : พืชเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีผ่านปฏิกิริยาแสง ซึ่งเกิดขึ้นที่เยื่อไทลาคอยด์ในคลอโรพลาสต์ โดยเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแสง พลังงานแสงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในรูปของ ATP และ NADPH

3. ในการทบทวนความรู้เรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและปฏิกิริยาแสงก่อนเข้าสู่บทเรียนเรื่องปฏิบัติการคาร์บอน อาจใช้ชุดคำถามต่อไปนี้

3.1 สมการเคมีในข้อใดแสดงถึงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

- ก. $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
ข. $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
ค. $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NADP}^+ \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{NADPH} + 2\text{H}^+$
ง. $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$

ตอบ ก

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นที่ใด

- ก. ไส้โทพลาสซึมของทุกเซลล์
ข. คลอโรพลาสต์ของทุกเซลล์
ค. ไส้โทพลาสซึมและคลอโรพลาสต์ของทุกเซลล์
ง. คลอโรพลาสต์ของมีโซฟิลล์ที่พัฒนาสมบูรณ์

ตอบ ง



3.3 กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสงของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นที่ใดเป็นหลัก

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

ตอบ ข

3.4 “ในปฏิกิริยาแสงมีการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี” คำว่าพลังงานเคมีในที่นี้คืออะไร

- ก. การเกิดออกซิเจน
- ข. การทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ
- ค. พลังงานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
- ง. พันธะเคมีในผลิตภัณฑ์ที่เกิดในปฏิกิริยาแสง

ตอบ ง

3.5 สารพลังงานสูงที่ได้จากปฏิกิริยาแสงคืออะไร

- ก. ATP
- ข. ATP และ NADH
- ค. NADPH
- ง. ATP และ NADPH

ตอบ ง

4. **คำถาม :** ผู้เรียนคิดว่าสารอินทรีย์พลังงานสูงที่เกิดขึ้น (ATP และ NADPH) สามารถเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชที่ไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น ราก ได้หรือไม่

ตอบ : ไม่ได้ เนื่องจากทั้ง ATP และ NADPH เป็นสารพลังงานสูงและไม่เสถียร จึงไม่สามารถถูกลำเลียงออกไปจากคลอโรพลาสต์ตลอดจนเคลื่อนที่ไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้โดยง่าย ดังนั้น พลังงานเคมีในสารพลังงานสูงนี้จึงถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในพันธะเคมีของสารอินทรีย์ชนิดอื่นเพื่อให้ลำเลียงออกไปได้

5. ผู้สอนอธิบายเพิ่มเติมว่า สารอินทรีย์มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังนั้นการสร้างสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงได้จากการนำคาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์เข้าเป็นส่วนหนึ่งในโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยผ่านปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ในปฏิกิริยานี้ จะมีการนำพลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสงมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานในพันธะเคมีที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น (รูปที่ 1)



6. ผู้สอนอธิบายวัฏจักรคัลวิน ดังนี้ :

ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ หรือวัฏจักรคัลวิน ประกอบด้วย 3 ระยะ (phase) คือ
Phase 1: Carboxylation คือ กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเป็นองค์ประกอบ คือ Ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP)

Phase 2: Reduction คือ กระบวนการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอน carboxylation ให้เป็นน้ำตาลโดยใช้พลังงานจาก ATP และ NADPH ซึ่งได้จากปฏิกิริยาแสง

Phase 3: Regeneration คือ กระบวนการสร้าง RuBP กลับคืน โดยใช้โมเลกุลของน้ำตาลบางส่วนที่ได้จาก reduction phase ซึ่งในขั้นตอนนี้ จำเป็นต้องใช้ ATP จากปฏิกิริยาแสง

1. Carboxylation

ขั้นตอนนี้ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม คือ ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) ซึ่งอยู่ในสโตรมาของคลอโรพลาสต์ โดยมีเอนไซม์รูบิสโก (Rubisco) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารตัวกลาง (intermediate) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอมที่ไม่มีความเสถียร จึงแตกออกเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม จำนวน 2 โมเลกุล คือ phosphoglycerate (PGA)

เอนไซม์รูบิสโกยืมมาจากชื่อเอนไซม์ ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase ซึ่งเป็นชื่อตามหลักการตั้งชื่อเอนไซม์ของ International Union of Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB) เอนไซม์ชนิดนี้เป็นเอนไซม์ในคลอโรพลาสต์ที่มีปริมาณมากที่สุด และอาจเป็นเอนไซม์ที่มีมากที่สุดในโลก

2. Reduction

ในขั้นตอนนี้ แต่ละโมเลกุลของ PGA จะได้รับหมู่ phosphate จาก ATP ได้เป็น 1,3-bisphosphoglycerate จากนั้น จะได้รับอิเล็กตรอนจาก NADPH ได้เป็น G-3-P หรือ PGAL จะเห็นได้ว่าทั้ง ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง จะนำมาใช้ในขั้นตอนนี้

3. Regeneration

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้าง RuBP กลับคืนเพื่อนำไปใช้ใน carboxylation ซึ่งในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาทางชีวเคมีหลายขั้นตอนโดยที่ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเติมหมู่ฟอสเฟตให้กับสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเป็นแกนของโมเลกุล ทำให้ได้เป็น RuBP ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะมีการใช้ ATP จากปฏิกิริยาแสง

7. จากนั้น ให้ผู้เรียนทบทวนจากสื่อการสอน

8. ผู้สอนสรุปให้ผู้เรียนเห็นว่าในการได้น้ำตาล C_3 1 โมเลกุลนั้นต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์กี่โมเลกุล

9. คำถาม: พืชสามารถนำน้ำตาล PGAL ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้อย่างไร

ตอบ: PGAL จะถูกลำเลียงออกจากคลอโรพลาสต์เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการหายใจภายในเซลล์นั้นเอง หรืออาจนำไปใช้ในการสังเคราะห์เป็นน้ำตาลซูโครสเพื่อลำเลียงไปยังเซลล์อื่นผ่านทางโฟลเอ็ม นอกจากนี้ เมื่อเซลล์ต่างๆ ได้รับสารอาหารเพียงพอสำหรับกระบวนการหายใจ และการนำไปเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์อื่นที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของพืชแล้ว PGAL ที่เกิดจากวัฏจักรคัลวินก็จะถูกเปลี่ยนเป็นแป้งเก็บไว้ในคลอโรพลาสต์ต่อไป เพื่อเอาไว้ใช้ในเวลาที่พืชไม่มีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น ในเวลากลางคืน เป็นต้น

10. คำถามทบทวนความรู้เรื่องปฏิกิริยาคาร์บอน

10.1 ปฏิบัติการคาร์บอนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดในคลอโรพลาสต์

- | | | | |
|----|--------------------|----|----------------|
| ก. | Outer membrane | ข. | Inner membrane |
| ค. | Thylakoid membrane | ง. | Stroma |

ตอบ ง

10.2 ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับปฏิกิริยาคาร์บอน

- ก. มีการสร้าง ATP ข. มีการสร้าง NADPH
ค. เป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน ง. ถูกทุกข้อ

ตอบ ค

10.3 ข้อใดคือปฏิกิริยาในขั้นตอน carboxylation

- ก. การใช้ ATP เพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์
- ข. การใช้ RuBP เพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์
- ค. การใช้ NADPH เพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์
- ง. การใช้ RuBP และ ATP เพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์

ตอบ ข

10.4 สารอินทรีย์ตัวแรกที่ถูกสร้างขึ้นในวัฏจักรคัลวินคืออะไร

- | | | | |
|----|------|----|-------|
| ก. | PGA | ข. | PGAL |
| ค. | RuBP | ง. | กลไกส |

ตอบ ก

10.5 น้ำตาลชนิดแรกที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงคืออะไร

- | | | | |
|---------|----------|----|------|
| ก. | PGA | ข. | PGAL |
| ค. กลไก | ง. จูโคร | | |

ตอบ ข

10.6 Reducing power ที่ใช้ในกระบวนการรีดักชันของวัฏจักรคลอรีน คือข้อใด

- | | | | |
|----|-------|-----|------|
| ၈. | ATP | ၉. | NADH |
| ၉. | NADPH | ၁၀. | FADH |

ตอบ ค

10.7 ไนวัฏจักรคลวินมีการใช้พลังงานจากสารพลังงานสูงที่ได้จากปฏิกิริยาแสงในขั้นตอนใด

- ก. Carboxylation และ Reduction
 ข. Reduction และ Regeneration
 ค. Carboxylation และ Regeneration
 ง. Carboxylation, Reduction และ Regeneration

ตอบ ข

10.8 ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับกระบวนการ regeneration ในปฏิกิริยาคาร์บอน

- ก. ในการสร้าง RuBP 3 โมเลกุล ต้องใช้ ATP จำนวน 3 โมเลกุลเป็นสารตั้งต้น
- ข. ในการสร้าง RuBP 3 โมเลกุล ต้องใช้ PGA จำนวน 3 โมเลกุลเป็นสารตั้งต้น
- ค. ในการสร้าง RuBP 3 โมเลกุล ต้องใช้ PGAL จำนวน 3 โมเลกุลเป็นสารตั้งต้น
- ง. ในการสร้าง RuBP 3 โมเลกุล ต้องใช้ NADPH จำนวน 3 โมเลกุลเป็นสารตั้งต้น

ตอบ ก

10.9 พืชนำน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงไปใช้อย่างไร

1. สร้างแบ้งเก็บไว้ในคลอโรพลาสต์
2. สร้างเป็นน้ำตาลกลูโคสเพื่อลำเลียงออกสู่เซลล์อื่น
3. เข้าสู่วัฏจักรการหายใจในไมโทคอนเดรีย

- ក. ១ និង ២ តួ ខ. ២ និង ៣ តួ
គ. ១ និង ៣ តួ ง. ១ ២ និង ៣ តួ

ตอบ ค

10.10 พืชชนิดใดมีวัฏจักรคัลวิน

- ก. พืช C₃
ข. พืช C₄
ค. พืช CAM
ง. ถูกทุกข้อ

ตอบ ง



ภาคผนวก

ก. คำอธิบายศัพท์

1,3-bisphosphoglycerate	ตัวกลางในวัฏจักรคัลวิน เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา phosphorylation ของ PGA โดยมีเอนไซม์ 3-phosphoglycerate kinase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมี PGA และ ATP เป็นสารตั้งต้น
ADP	ย่อมาจาก adenosine diphosphate เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก dephosphorylation ของ ATP
ATP	ย่อมาจาก adenosine triphosphate เป็นสารพลังงานสูงที่สร้างขึ้นในกระบวนการหายใจและกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจากปฏิกิริยา phosphorylation ของ ADP
fructose-1,6-bisphosphatase	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาในการสลาย fructose-1,6-bisphosphate เป็น fructose-6-phosphate ในขั้นตอน regeneration ในวัฏจักรคัลวิน
Glyceraldehyde-3-phosphate (G-3-P)	อีกชื่อหนึ่งของ phosphoglyceraldehyde (PGAL) เป็นน้ำตาลตัวแรกที่เกิดจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรคัลวิน ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม
NADP-glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการเกิด reduction ของ 1,3-bisphosphoglycerate ไปเป็น PGAL โดยอาศัย NADPH เป็นตัวให้อิเล็กตรอน
NADPH	ย่อมาจาก Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate NADPH เป็นสารพลังงานสูงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำหน้าที่เป็น reducing power คือ ตัวให้อิเล็กตรอนในวัฏจักรคัลวิน NADP ⁺ เป็นสารที่เกิดขึ้นเมื่อ NADPH ให้อิเล็กตรอนในวัฏจักรคัลวินแล้ว อยู่ในรูป oxidized form ซึ่งจะไปรับอิเล็กตรอนจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสง
Phosphoglyceraldehyde (PGAL)	อีกชื่อหนึ่งของ glyceraldehyde-3-phosphate เป็นน้ำตาลตัวแรกที่เกิดจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรคัลวิน ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม



Phosphoglycerate (PGA)	สารอินทรีย์ตัวแรกที่เกิดจากการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรคัลวิน
phosphoribulokinase	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาในการสร้าง RuBP จาก ribulose -5-phosphate
Ribulose-1,5- biphosphate (RuBP)	สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม เป็นตัวรับคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรคัลวิน
Rubisco	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์กับ RuBP หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งตามกฎของ International Union of Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB) ว่า Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase
sedoheptulose-1,7-bisphosphatase	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาในการสลาย sedoheptulose-1,7-bisphosphate เป็น sedoheptulose-7-phosphate ในขั้นตอน regeneration ในวัฏจักรคัลวิน
ซูโครส (sucrose)	น้ำตาลโมเลกุลคู่ ซึ่งประกอบด้วยกลูโคสและฟรุกโทส รู้จักทั่วไปในรูปแบบของน้ำตาลทราย
ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ fixation reaction)	ขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นที่สโตรมาของคลอโรพลาสต์มีบทบาทในการสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นน้ำตาลโดยมีการใช้พลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง
ปฏิกิริยาแสง (light reaction)	ขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นที่เยื่อไทลาคอยด์ ของคลอโรพลาสต์มีบทบาทในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีในรูปของ ATP และ NADPH
พืช C ₃	กลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม คือ PGAL
พืช C ₄	กลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม คือ Oxaloacetate ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเข้าสู่วัฏจักรคัลวิน



พืช CAM

ย่อมาจาก พืช crassulacean acid metabolism เป็นกลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม คือ Oxaloacetate มีการตรึงคาร์บอนในเวลากลางคืน ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเข้าสู่วัฏจักรคัลวินและมีประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ดีกว่าพืช C_3 และพืช C_4

โฟลเอ็ม (phloem)

เนื้อเยื่อลำเลียงอาหารของพืช

เยื่อไทลาคอยด์ (thylakoid membrane)

เยื่อภายในคลอโรพลาสต์ เป็นตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาแสง มีสารสีและโปรตีนเชิงซ้อนที่ทำหน้าที่ในปฏิกิริยาแสงเป็นองค์ประกอบ

วัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle)

ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช ค้นพบโดย M. Calvin, A. Benson, J.A. Bassham และคณะ ในปี 1950 บางครั้งเรียกว่า Calvin-Benson cycle ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ carboxylation, reduction และ regeneration

สโตรมา (stroma)

ของเหลวภายในคลอโรพลาสต์มีเอนไซม์หลายชนิดเป็นองค์ประกอบ ซึ่งรวมทั้งเอนไซม์ที่ทำงานในวัฏจักรคัลวิน



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. 5th edition. 2010. Sinauer Associates Inc. Publishers, USA.



รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
1	ชีววิทยาคืออะไร	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพจน์กุล
2	ชีวจริยธรรม	รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์
3	การวางแผนการทดลอง และการตรวจสอบสมมติฐาน	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
4	ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
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.พงษ์ หาดยุดธนากร
9	กรดนิวคลีอิก	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
10	การดำรงชีวิตของเซลล์	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
11	การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
12	การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะไกลในพืชและสัตว์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
13	การสื่อสารระยะไกลในสัตว์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
14	องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
15	ทางเดินอาหารและกระบวนการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง	ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา
16	การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก	ผศ.ดร.พัชนี 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.อรรพรรณ สัตยาลัย
35	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 2 วัฏจักรเซลล์ division phase mitosis	ผศ.ดร.อรรพรรณ สัตยาลัย
36	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 3 วัฏจักรเซลล์; division phase; meiosis	ผศ.ดร.อรรพรรณ สัตยาลัย
37	เซลล์พืช	ผศ.ดร.มานิต คิโดอยู่
38	เนื้อเยื่อพืช	ผศ.ดร.มานิต คิโดอยู่
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 ₄	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 อังกนิทน์
51	การวัดการเจริญเติบโตของพืช	อ.ดร.อัญชลี ใจดี
52	ออกซิน	ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ
53	การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตร	ผศ.พัชรา ลิ้มปะนะเวช
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 ไชคชัยชำนาญกิจ
60	โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome structure)	อ.ดร.เพลินพิศ ไชคชัยชำนาญกิจ
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 เด่นดวงบริพันธ์
67	หลักฐานการเกิดวิวัฒนาการ	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
68	ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วิน	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
69	วิวัฒนาการของเชื้อดื้อยา	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
70	วิวัฒนาการของมนุษย์	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
71	อาณาจักรมอเนอรา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์



ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
72	อาณาจักรโปรทิสตา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์
73	อาณาจักรฟังไจ	ผศ.ดร.จิตรตรา เพ็ญภูเขียว
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.วิเชฐฐ์ คนชื้อ
83	ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ในระบบนิเวศ	ผศ.ดร.วิเชฐฐ์ คนชื้อ
84	โซ่อาหารและใยอาหาร	ผศ.ดร.วิเชฐฐ์ คนชื้อ
85	วัฏจักรสาร	ผศ.ดร.วิเชฐฐ์ คนชื้อ
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