



คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

วิชาชีววิทยา

เรื่อง

กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภจิตรา ชัชวาลย์

พุทธศักราช 2554



กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ นันทนา อังกินันท์

รองศาสตราจารย์ สุมิตรา คงชื่นสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัทธรา ลิ้มปะนะเวช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์

นางปริญญา นุช กสินรัตน์

นางรพีนา บางยี่ขัน

สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ข้อมูล

ห้องปฏิบัติการกลาง ภาควิชาพฤกษศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



คำชี้แจง

สื่อนำเข้าสู่บทเรียน เรื่องกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM เป็นตอนหนึ่งของสื่อประกอบการสอน เรื่องการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งมีสื่อทั้งหมด 14 ตอน ได้แก่

1. พลังงานชีวิต
2. ปฏิกริยาแสง
3. สรุปปฏิกริยาแสง
4. ความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารสีชนิดต่าง ๆ
5. ปฏิกริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle
6. สรุปปฏิกริยาคาร์บอน (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 กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM นี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้สอนเข้าใจจุดประสงค์ของสื่อการสอนที่ผลิตขึ้น และเสนอแนวทางการใช้สื่อดังกล่าวเพื่อกระตุ้นการเรียนรู้ของผู้เรียนในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมถึงให้ความกระจ่างเกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ เพื่อให้การจัดการเรียนการสอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภจิตรา ชัชวาลย์ ผู้จัดทำคู่มือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ ผู้ตรวจคู่มือ



สารบัญ

	หน้า
จุดประสงค์	5
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	5
เนื้อหา	6
แนวทางในการจัดการเรียนรู้	13
ภาคผนวก	17
ก. คำอธิบายศัพท์	
ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม	
รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน	20



จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM
2. อธิบายความสัมพันธ์ของแสงกับกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

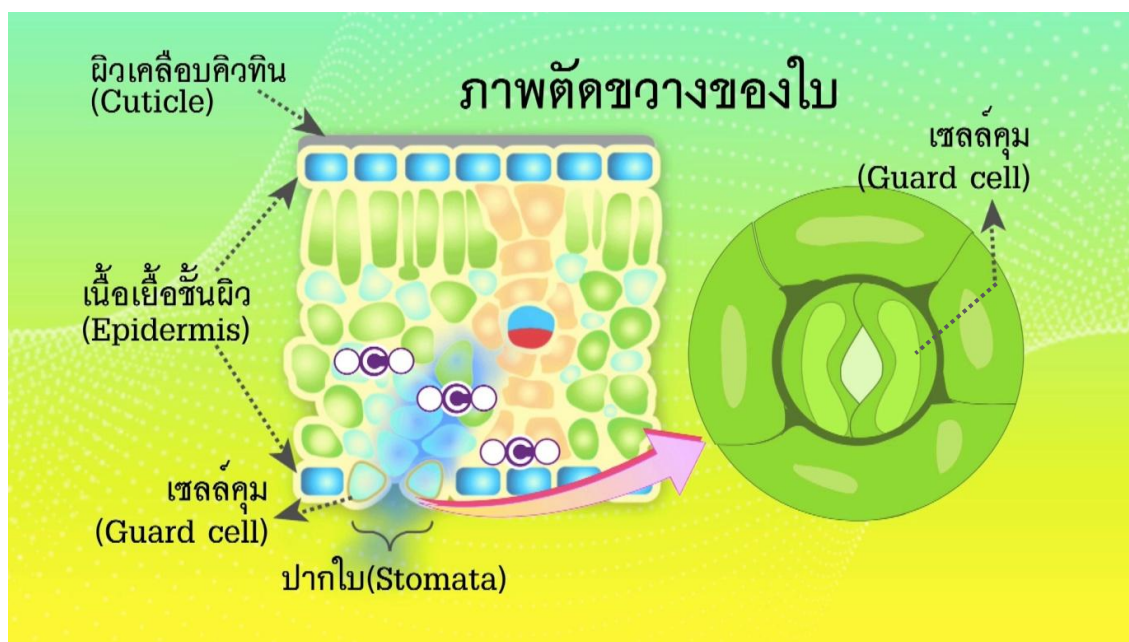
เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อประกอบการสอนเรื่องกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM แล้วสามารถ

1. อธิบายกระบวนการที่ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM
2. เชื่อมโยงความสัมพันธ์ของแสงกับกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM
3. ยกตัวอย่างพืช CAM บางชนิดในประเทศไทย



เนื้อหา

ในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชบก จำเป็นต้องมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ พืชจึงจำเป็นต้องมีช่องเปิดเพื่อรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื้อเยื่อใบของพืชมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงมากกว่า 90% ทำให้บริเวณโพรงอากาศเหนือช่องเปิดของปากใบ (stomatal cavity) มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศโดยทั่วไป เมื่อปากใบเปิดเพื่อตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใอน้ำที่อยู่บริเวณช่องว่างเหนือปากใบ จะแพร่ออกสู่บรรยากาศภายนอกซึ่งเป็นไปตามกฎของการแพร่ (รูปที่ 1) เรียกว่า การคายน้ำ หากยังมีความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่บริเวณโพรงอากาศเหนือช่องเปิดของปากใบและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกมากเท่าใด ก็จะทำให้อัตราการแพร่ของน้ำจากใบออกสู่ภายนอกสูงขึ้น แต่หากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่โพรงอากาศเหนือช่องเปิดของปากใบ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะน้อยลง ก็จะทำให้มีอัตราการคายน้ำน้อยกว่าขณะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำ (รูปที่ 2) นอกจากนี้ อุณหภูมิยังมีผลต่ออัตราการแพร่อีกด้วย กล่าวคือ โมเลกุลของสารจะมีอัตราการแพร่แปรผันตรงกับอุณหภูมิ คือ หากอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการแพร่ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น หากปากใบเปิดในขณะที่อุณหภูมิสูง พืชจะมีการคายน้ำสูง (รูปที่ 3)



รูปที่ 1 ในภาวะปกติ เมื่อปากใบเปิดเพื่อตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใอน้ำที่อยู่บริเวณโพรงอากาศเหนือปากใบ จะแพร่ออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งเรียกว่า การคายน้ำ



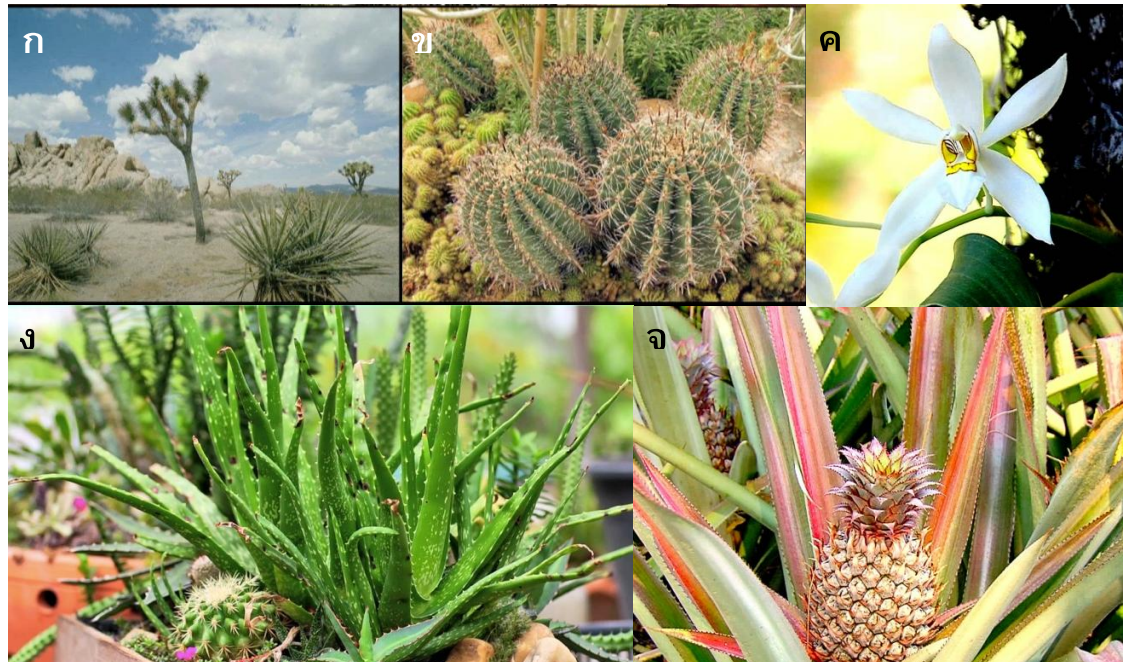
รูปที่ 2 อัตราการคายน้ำจะแปรผกผันกับความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ



รูปที่ 3 อัตราการคายน้ำจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ



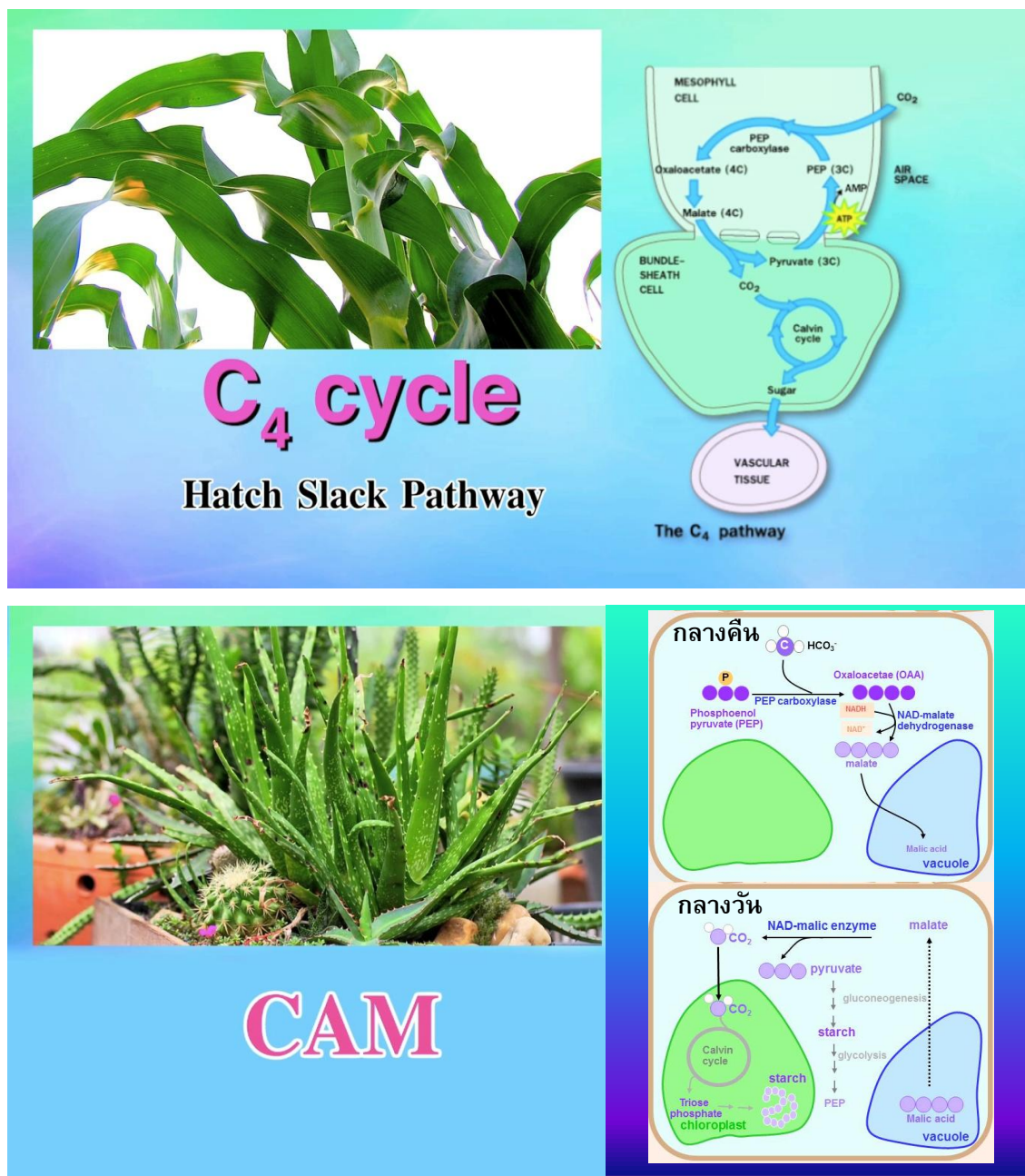
ด้วยเหตุนี้ พืชบางชนิดจึงมีการสูญเสียน้ำมากถึง 1000 กิโลกรัมต่อการสร้างสารอาหาร 1 กิโลกรัม หากบริเวณดังกล่าวมีน้ำอย่างเพียงพอ พืชก็จะสามารถดำรงชีวิตได้เป็นปกติ แต่หากพืชต้องเจริญเติบโตในที่ที่มีน้ำจำกัด เช่น ทะเลทราย หรือเป็นพืชอิงอาศัย (epiphyte) พืชจำเป็นต้องมีการปรับตัวให้เสียน้ำน้อยลง โดยการปรับกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีการสูญเสียน้ำให้น้อยลง ดังนั้น พืชที่ต้องเติบโตในที่ที่มีน้ำจำกัดมาก จึงมีการปรับตัวให้มีการเปิดปากใบในขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสูง ซึ่งคือช่วงเวลากลางคืน โดยจะปิดปากใบตอนกลางวันเพื่อลดการสูญเสียน้ำ และเปิดปากใบตอนกลางคืน กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืชกลุ่มนี้ จึงเริ่มต้นในเวลากลางคืนเพื่อนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน เราเรียกพืชกลุ่มนี้ว่า พืช Crassulacean Acid Metabolism หรือ CAM ซึ่งได้แก่ พืชอวบน้ำหลายชนิด เช่น กระบองเพชร ว่านหางจระเข้ สับปะรด และกล้วยไม้ เป็นต้น (รูปที่ 4) พืชบางชนิด เช่น สับปะรด กลไกการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงได้คือเมื่อเจริญเติบโตในภาวะแห้งแล้งจะมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์แบบ CAM แต่หากมีน้ำบริบูรณ์ดีจะมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์แบบพืช C_3 เรียกพืชที่มีกลไกแบบนี้ว่า facultative CAM



รูปที่ 4 ตัวอย่างพืช CAM ชนิดต่าง ๆ ก. พืชทะเลทราย ข. กระบองเพชร ค. กล้วยไม้
ง. ว่านหางจระเข้ จ. สับปะรด



กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM คล้ายกับพืช C_4 คือ มีวัฏจักรคาร์บอนที่นอกเหนือไปจากวัฏจักรคัลวินในการทำหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่วิธีที่ต่างกันที่ในพืช C_4 มีการตรึงคาร์บอน 2 ครั้ง คือใน mesophyll cell และ bundle sheath cell ในรูปของ HCO_3^- และคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ ส่วนในพืช CAM เกิดกระบวนการตรึงคาร์บอน 2 ครั้ง ในเวลาที่ต่างกัน คือตรึงคาร์บอนในรูปของ HCO_3^- ในเวลากลางคืน และตรึงคาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัฏจักรคัลวินในเวลากลางวัน อีกทั้งพืช CAM ไม่มีโครงสร้างแบบ Kranz anatomy อย่างในพืช C_4 (รูปที่ 5)

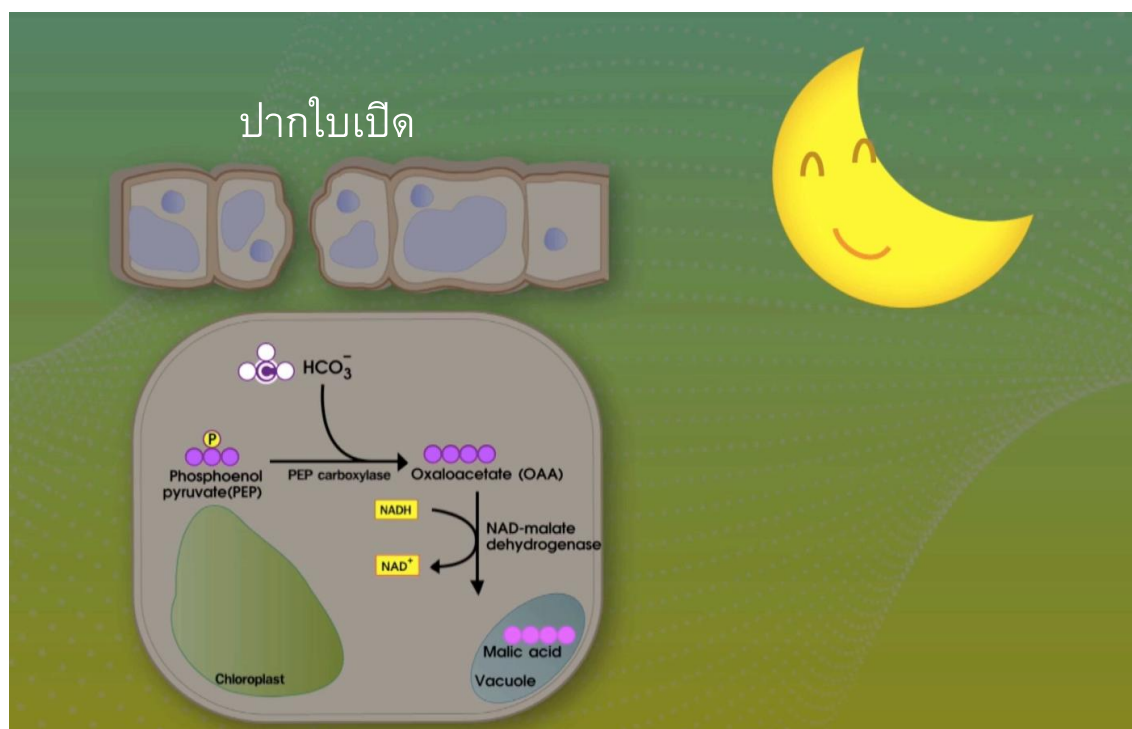


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช C_4 (บน) และในพืช CAM (ล่าง)



ในพืช C_4 มีการตรึงคาร์บอนอนินทรีย์ในรูปของ HCO_3^- ด้วย phosphoenolpyruvate ใน mesophyll cell และมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งในวัฏจักรคัลวินที่ bundle sheath cell ในขณะที่ปฏิกิริยาในทำนองเดียวกันก็พบในพืช CAM แต่เกิดการตรึงคาร์บอนอนินทรีย์ทั้งสองครั้งใน mesophyll cell เดียวกัน เพียงแต่ต่างเวลา คือ มีการตรึง HCO_3^- ด้วย phosphoenolpyruvate ในเวลากลางคืน และมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งในวัฏจักรคัลวินในเวลากลางวัน

พืช CAM เปิดปากใบในเวลากลางคืนเพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำในไซโทพลาสซึมจะได้คาร์บอนอนินทรีย์ในรูปของ HCO_3^- แล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับ phosphoenolpyruvate (PEP) โดยเอนไซม์ PEP carboxylase ได้เป็น oxaloacetate (OAA) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 4 อะตอม จากนั้น OAA จะถูกเปลี่ยนเป็น malate และเก็บเป็นกรดมาลิก (malic acid) ไว้ใน vacuole ของ mesophyll cell ทำให้เซลล์มีสภาพเป็นกรดในเวลากลางคืน (รูปที่ 6)

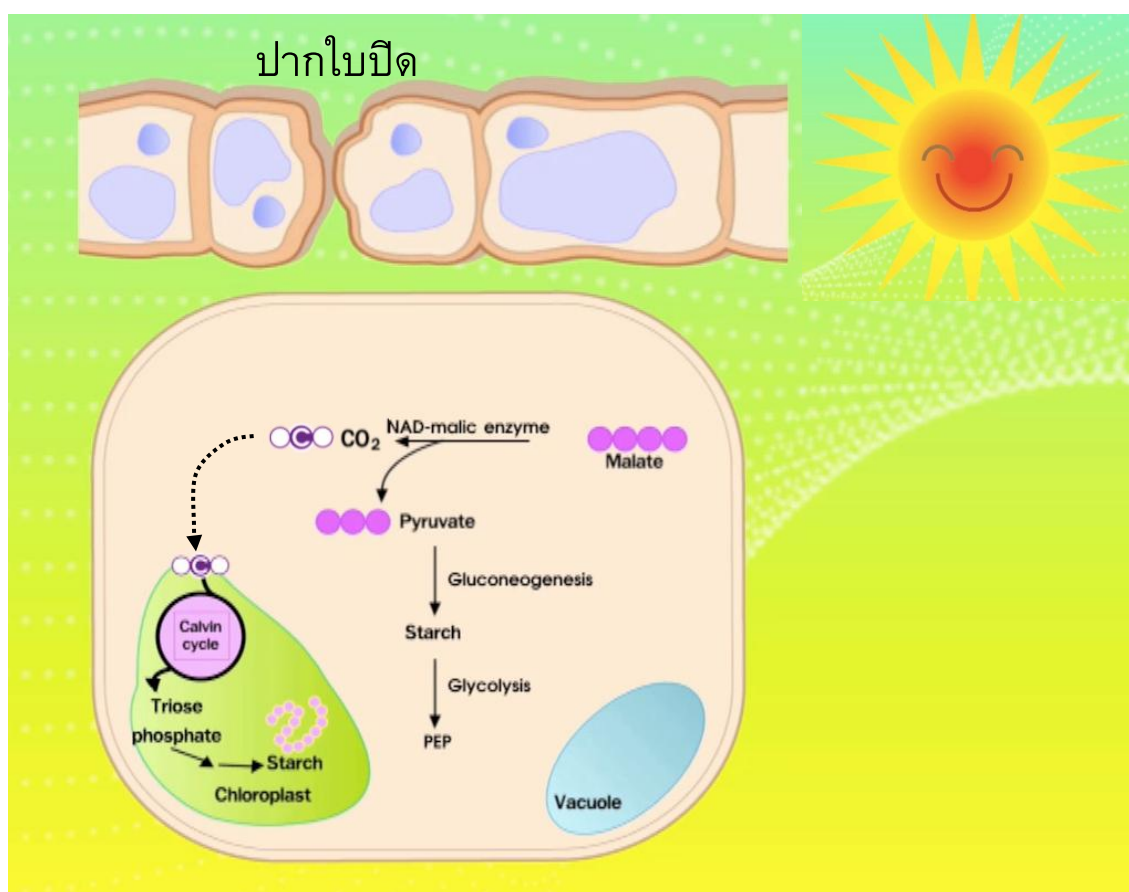


รูปที่ 6 ในเวลากลางคืน พืช CAM เปิดปากใบ มีการตรึงคาร์บอนด้วย phosphoenolpyruvate (PEP) โดยเอนไซม์ PEP carboxylase และเก็บสารประกอบที่มีคาร์บอน 4 อะตอมในรูปของ กรดมาลิก (malic acid) ไว้ใน vacuole



ต่อมาในเวลากลางวัน ปากใบปิด เมื่อมีแสงก็จะเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างอาหารสำหรับพืช ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ ปฏิิกิริยาแสงและปฏิกิริยาคาร์บอน ซึ่งคือวัฏจักรคัลวิน ในกระบวนการนี้มีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการสร้างน้ำตาลโดยอาศัยพลังงานที่ได้รับจากปฏิกิริยาแสง เมื่อปากใบปิดขณะที่มีแสง วัฏจักรคัลวินดำเนินไปได้โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสลายของกรดมาลิกใน vacuole ซึ่งเก็บไว้จากการตรึงคาร์บอนในรูปของ HCO_3^- ในเวลากลางคืน

กรดมาลิกจะถูกลำเลียงออกจาก vacuole และสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และ pyruvate ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่วัฏจักรคัลวิน ส่วน pyruvate จะถูกนำไปสร้างเป็นแป้งและสลายไปเป็น PEP ต่อไป (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ในเวลากลางวัน พืช CAM ปิดปากใบ แต่จะมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยอาศัยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสลายกรดมาลิกที่เก็บไว้ใน vacuole ส่วน pyruvate ที่ได้จากการสลายของกรดมาลิกจะถูกเปลี่ยนเป็น PEP โดยกระบวนการ gluconeogenesis และ glycolysis ตามลำดับ



การปรับตัวของพืช CAM ในการเปิดปากใบตอนกลางคืน และตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลากลางคืน ทำให้พืช CAM สูญเสียน้ำในรูปของการคายน้ำน้อยกว่าพืชกลุ่มอื่น กลไกเช่นนี้ทำให้พืช CAM มีประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงกว่าพืช C_3 และพืช C_4 การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีของ CAM นี้ เป็นวิวัฒนาการหนึ่งที่พืชมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพที่มีน้ำน้อยในธรรมชาติ เพื่อให้พืชสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพที่มีน้ำจำกัด



แนวทางในการจัดการเรียนรู้

สื่อประกอบการสอนเรื่อง กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM นี้ ผู้สอนสามารถใช้สื่อการสอนนี้เพื่อให้ผู้เรียนเห็นภาพรวมของขั้นตอนการตรึงคาร์บอนอนินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจากวัฏจักรคัลวิน ซึ่งเป็นผลให้พืชกลุ่มนี้มีความสามารถในการปรับตัวต่อภาวะที่มีน้ำจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการจัดการเรียนการสอนเรื่องกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM อาจทำได้ดังนี้

1. ทบทวนภาพรวมของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยใช้ตัวอย่างคำถามต่อไปนี้

1.1 **คำถาม** 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. $\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow \text{ATP}$

ตอบ ก

1.2 **คำถาม** ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีการใช้น้ำในขั้นตอนใดเป็นสำคัญ

ตอบ น้ำเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสง

1.3 **คำถาม** ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนใดเป็นสำคัญ

ตอบ ในปฏิกิริยาคาร์บอน หรือวัฏจักรคัลวิน

1.4 **คำถาม** พืชได้รับน้ำอย่างไร (กรณีของพืชบก)

ตอบ ได้จากการลำเลียงน้ำจากระบบราก โดยอาศัยแรงดึงดูดจากการคายน้ำเป็นแรงสำคัญในการลำเลียงน้ำ

1.5 **คำถาม** พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างไร

ตอบ โดยการเปิดปากใบเพื่อนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ mesophyll cell และนำไปใช้ในวัฏจักรคัลวิน



1.6 คำถาม การเปิดปากใบ นอกจากจะได้รับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วยังมี
ปรากฏการณ์ใดอีก

ตอบ การคายน้ำ (นำออกซิเจนเข้าเพื่อใช้ในกระบวนการหายใจ) และการคายน้ำ

1.7 คำถาม การคายน้ำเกิดขึ้นได้อย่างไร

ตอบ ภายในใบมีตัวไปด้วยน้ำทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในใบสูงมากกว่าความชื้น
สัมพัทธ์ของบรรยากาศภายนอก ดังนั้นโดยหลักของการแพร่ คือสารจะแพร่จากที่มี
ความเข้มข้นสูงไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า น้ำจึงแพร่จากภายในใบออกสู่ภายนอก

2. ผู้สอนเชื่อมโยงไปยังเรื่องการลำเลียงน้ำว่าเมื่อเกิดการคายน้ำก็จะทำให้เกิดแรงดึงจากการคายน้ำ
ในเนื้อเยื่อที่ลำเลียงน้ำ (xylem) ดังนั้น หากยังมีน้ำในดินเพียงพอ พืชจะไม่ขาดน้ำ และเกิด
กระบวนการต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตได้อย่างเป็นปกติ

3. คำถาม หากมีน้ำในดินไม่เพียงพอ พืชจะอย่างไร

ตอบ ผู้เรียนสามารถอภิปรายได้อย่างกว้างขวางถึงลักษณะการตอบสนองของพืชเมื่อมีน้ำไม่
เพียงพอ เช่น การปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ ซึ่งผู้สอนจะสามารถชี้ให้เห็นว่ามีผลทำให้ลดการ
สังเคราะห์ด้วยแสงด้วย
การทิ้งใบเพื่อลดการคายน้ำ ผู้สอนก็สามารถชี้ให้เห็นได้เช่นเดียวกันว่าจะมีผลต่อการลด
การสังเคราะห์ด้วยแสง
การสร้างคิวทิเคิลหนา เพื่อลดการสูญเสียน้ำ
ฯลฯ

4. ผู้สอน ยกตัวอย่างพืชที่มีการดำรงชีวิตอยู่ในที่ที่มีน้ำจำกัดได้ดี เช่น พืชในทะเลทราย ให้ผู้เรียน
สังเกตลักษณะของพืชกลุ่มดังกล่าว เช่น มีใบ / ลำต้นอวบน้ำ เปลี่ยนใบเป็นหนาม มีคิวทิเคิลหนา
นอกจากนี้ยังปรับกลไกการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์จากที่สูญเสียน้ำขณะเปิดปากใบเพื่อรับ
คาร์บอนไดออกไซด์ในเวลากลางวัน เป็นการเปิดปากใบในเวลากลางคืน ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ใน
บรรยากาศสูงกว่า และมีอุณหภูมิต่ำกว่าในเวลากลางวัน ทำให้มีการแพร่ของน้ำออกสู่ภายนอกใน
เวลากลางคืนในอัตราที่ต่ำกว่าในเวลากลางวัน

5. ผู้สอน อธิบายกลไกการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM ดังที่อธิบายไว้ในส่วนเนื้อหาข้างต้น

6. ผู้สอน ใช้สื่อการสอนนี้เพื่อสรุปบทบทวนบทเรียนอีกครั้ง



7. ทดสอบผลการเรียนรู้ด้วยแบบทดสอบต่อไปนี้

7.1 ข้อใดเป็นลักษณะของพืช CAM

- ก. ตันอวบน้ำ ไม่มีใบ
- ข. มีจำนวนปากใบต่อพื้นที่น้อย ใบอวบน้ำ
- ค. เปลี่ยนใบเป็นหนาม มีการหายใจในเวลากลางคืน
- ง. เปิดปากใบในเวลากลางคืน มีการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน

ตอบ ง

7.2 พืช CAM ตรึงคาร์บอนรูปใด ในเวลากลางคืน

- ก. CO_2
- ข. HCO_3^-
- ค. pyruvate
- ง. malate

ตอบ ข

7.3 ในพืช CAM เอนไซม์ที่ทำงานในการตรึงคาร์บอนในเวลากลางคืนคือเอนไซม์ชนิดใด

- ก. Rubisco
- ข. Pyruvate carboxylase
- ค. Phosphoenolpyruvate carboxylase
- ง. ก และ ข

ตอบ ค

7.4 ในพืช CAM เอนไซม์ที่ทำงานในการตรึงคาร์บอนในเวลากลางวันคือเอนไซม์ชนิดใด

- ก. Rubisco
- ข. Pyruvate carboxylase
- ค. Phosphoenolpyruvate carboxylase
- ง. ก และ ข

ตอบ ก

7.5 ในพืช CAM ผลผลิตจากปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนในเวลากลางคืนคือสารชนิดใด

- ก. malate
- ข. oxaloacetate
- ค. phosphoglycerate
- ง. phosphoenolpyruvate

ตอบ ข



7.6 ในพืช CAM คาร์บอนที่สะสมไว้เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน
อยู่ในรูปใด

- ก. malate
- ข. oxaloacetate
- ค. phosphoglycerate
- ง. phosphoenolpyruvate

ตอบ ก

7.7 พืช CAM สะสมคาร์บอนเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวันไว้ที่
ส่วนใด

- ก. cytoplasm
- ข. chloroplast
- ค. vacuole
- ง. plastid

ตอบ ค

7.8 ข้อใดเป็นพืช CAM

- ก. ข้าวโพด อ้อย
- ข. ข้าว มะละกอ
- ค. บานไม่รู้โรย ข้าวฟ่าง
- ง. ว่านหางจระเข้ กระบองเพชร

ตอบ ง



ภาคผนวก

ก. คำอธิบายศัพท์

พืช C_3	กลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม คือ PGAL
พืช C_4	กลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม คือ oxaloacetate ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเข้าสู่วัฏจักรคัลวิน
พืช Crassulacean Acid Metabolism (CAM)	กลุ่มพืชที่มีการสร้างสารอินทรีย์ตัวแรกจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม คือ oxaloacetate ในเวลากลางคืน ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเข้าสู่วัฏจักรคัลวินที่เกิดในเวลากลางวัน และมีประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ดีกว่าพืช C_3 และพืช C_4
พืช Facultative CAM	กลุ่มพืชที่มีกลไกการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไปมาได้ระหว่างการมีกลไกแบบพืช C_3 เมื่อมีน้ำเพียงพอ และการมีกลไกแบบพืช CAM ในภาวะที่มีน้ำจำกัด
Hatch Slack pathway	กระบวนการตรึง HCO_3^- ด้วย phosphoenolpyruvate ในพืช C_4 ซึ่งค้นพบโดย M.D.Hatch และ C.R.Slack
Kranz anatomy	โครงสร้างทางกายวิภาคของใบพืช C_4 ซึ่งเห็น bundle sheath cell ที่มีคลอโรพลาสต์อยู่ภายในเซลล์เรียงตัวล้อมรอบกลุ่มเนื้อเยื่อท่อลำเลียง (vascular bundle) อย่างชัดเจน
Malic acid / Malate	สารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม malate ในพืช C_4 บางชนิดเป็นตัวนำคาร์บอนเข้าสู่ bundle sheath cell การสลายของ malate ใน bundle sheath cell จะได้คาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่วัฏจักรคัลวินและ pyruvate กลับสู่ mesophyll cell นอกจากนี้ malate ยังเป็นสารตัวกลางในวัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) หรือ citric acid cycle ของกระบวนการหายใจระดับเซลล์ด้วย



Mesophyll cell	เซลล์ในเนื้อเยื่อใบพืชที่อยู่ระหว่าง upper epidermis และ lower epidermis เป็นเซลล์ที่มีคลอโรพลาสต์มีหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสง
Oxaloacetate (OAA)	สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 4 อะตอมเป็นองค์ประกอบ เป็นผลิตภัณฑ์แรกที่เกิดจากการตรึง HCO_3^- กับ phosphoenolpyruvate โดยเอนไซม์ PEP carboxylase นอกจากนี้ยังเป็นสารตัวกลางในวัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) หรือ citric acid cycle อีกด้วย
Phosphoenolpyruvate (PEP)	สารตัวกลางในปฏิกิริยาทางชีวเคมีหลายชนิด เช่น ในกระบวนการไกลโคไลซิส และ gluconeogenesis ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง PEP เป็นสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของ HCO_3^- โดยอาศัย PEP carboxylase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะพบมากใน mesophyll cell ของพืช C_4 และพืช CAM
Phosphoenolpyruvate carboxylase (PEP carboxylase)	เอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของ HCO_3^- เข้ากับ PEP ใน mesophyll cell ของพืช C_4 และพืช CAM
Ribulose 1,5-bisphosphate (RuBP)	สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอมเป็นตัวรับคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอน (วัฏจักรคัลวิน)
Rubisco	เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์กับ RuBP
คิวทิเคิล (cuticle)	ชั้นผิวนอกที่เคลือบผิวใบพืช มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีองค์ประกอบคือ คิวทิน (cutin) และ wax
ปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation)	ขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดขึ้นที่สโตรมาของคลอโรพลาสต์มีบทบาทในการสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นน้ำตาลโดยมีการใช้พลังงานจาก ATP และ NADPH ที่ได้จากปฏิกิริยาแสง
ปากใบ (stomata)	โครงสร้างของช่องเปิดที่ผิวนอกของพืชที่ควบคุมด้วยเซลล์คุม 2 เซลล์อยู่ที่เนื้อเยื่อชั้นผิว (epidermis) พืชบางชนิดอาจมี subsidiary cell ประกอบอยู่อีกชั้นหนึ่ง



วัฏจักรคัลวิน
(Calvin cycle)

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

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.
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.พงษ์ หาดยุดธนากร
4	ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
5	ส่วนประกอบและวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	อ.ดร.จิราธิ์ กิตนะ
6	การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาและประมาณขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	อ.ดร.จิราธิ์ กิตนะ
7	ปฏิกิริยา polymerization และ hydrolysis	อ.ดร.จุฑาพันธ์ุ พินสวัสดิ์
8	โปรตีน	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
9	กรดนิวคลีอิก	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
10	การดำรงชีวิตของเซลล์	ผศ.ดร.พงษ์ หาดยุดธนากร
11	การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ	ผศ.ดร.อรรณ สัตยาลัย
12	การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะไกลในพืชและสัตว์	ผศ.ดร.อรรณ สัตยาลัย
13	การสื่อสารระยะไกลในสัตว์	ผศ.ดร.อรรณ สัตยาลัย
14	องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์	ผศ.ดร.อรรณ สัตยาลัย
15	ทางเดินอาหารและกระบวนการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง	ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา
16	การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก	ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา
17	ภาพรวมของการสลายอาหารระดับเซลล์	อ.ดร.จุฑาพันธ์ุ พินสวัสดิ์
18	ลูกโซ่หายใจ	อ.ดร.จุฑาพันธ์ุ พินสวัสดิ์
19	oxidative phosphorylation	อ.ดร.จุฑาพันธ์ุ พินสวัสดิ์
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 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 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



ตอน ที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
72	อาณาจักรโปรทิสตา	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) และประวัติ การศึกษาประชากร	รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์
87	วิธีการหาค่าความหนาแน่นของประชากรโดยวิธีการสุ่ม ตัวอย่างแบบวางแปลง (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