หลักพืชศาสตร์

ผศ. ดร. วิไลวัลย์ แก้วตาทิพย์

ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร
คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
2557

หลักพืชศาสตร์

PLANT SCIENCE

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวัลย์ แก้วตาทิพย์

คำนำ

หนังสือหลักพืชศาสตร์นี้ผู้เขียนเรียบเรียงขึ้น เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนรายวิชาหลักพืชศาสตร์สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเกษตรศาสตร์หรือสาขาที่เกี่ยวข้อง เนื่องมาจากหนังสือที่พบแต่ละเล่มมีเนื้อหาไม่คลอบคลุมคำอธิบายรายละเอียดทั้งรายวิชา บางเล่มก็มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์อยู่บ้าง แต่เป็นเอกสารค่อนข้างเก่า เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จึงเป็นไปตามรายละเอียดประจำวิชาที่กำหนดไว้ในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2555) คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา รายละเอียดในหนังสือเล่มนี้ให้แง่คิดทฤษฎีทางวิชาการพร้อมทั้งตัวอย่างประกอบ

เนื้อหาในหนังสือแบ่งเป็น 10 บท บทที่ 1 มีรายละเอียดเกี่ยวกับความสำคัญและความสัมพันธ์ของพืชในมิติต่าง ๆ บทที่ 2 อธิบายถึงส่วนต่าง ๆ ของพืชและหน้าที่ของอวัยวะต่างๆ ของพืช บทที่ 3 กล่าวถึงเซลล์พืช การแบ่งเซลล์ของพืชและเนื้อเยื่อพืช ในบทที่ 4 ให้สาระสำคัญเกี่ยวกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในพืช เช่น การดูดน้ำ การดูดแร่ธาตุอาหาร การลำเลียงแร่ธาตุและสารอาหาร การคายน้ำ การสังเคราะห์แสงและการหายใจ บทที่ 5 ให้ความรู้เรื่องการเจริญเติบโตของพืช บทที่ 6 อธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ปัจจัยทางพันธุกรรมและปัจจัยทางฮอร์โมน บทที่ 7 การจัดแบ่งประเภทพืชตามลักษณะต่าง ๆ บทที่ 8 เป็นสาระเกี่ยวกับการขยายพันธุ์และปรับปรุงพันธุ์พืช บทที่ 9 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการปลูกพืชและบำรุงรักษาพืช และบทที่ 10 ให้รายละเอียดเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวพืช

ผู้เรียบเรียงหวังว่าหนังสือหลักพืชศาสตร์เล่มนี้จะมีประโยชน์ในการสอนและการเรียนวิชา “หลักพืชศาสตร์” หรือรายวิชาอื่น ๆ ที่มีสาระสัมพันธ์กัน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาเรียนรู้ทางด้านพืชระดับสูงต่อไป หรือนำความรู้จากรายวิชานี้ไปบูรณาการกับศาสตร์อื่น ๆ เพื่อพัฒนาความรู้และประสบการณ์นำไปสู่การปฏิบัติจริงทางการผลิตพืชสมัยใหม่ได้ หรือแม้แต่ผู้ที่ไม่ได้เรียนวิชานี้โดยตรงแต่มีความสนใจ สามารถทำการศึกษาหาความรู้ด้วยตนเองได้ไม่ยากจากหนังสือหลักพืชศาสตร์เล่มนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวัลย์ แก้วตาทิพย์
มีนาคม 2557

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	**1**
	แนวคิด	1
	1. ธรรมชาติของพืช	2
	2. บทบาทของพืช	2
	3. ความสัมพันธ์ของพืชกับมนุษย์	2
	4. ความสัมพันธ์ของวิชาหลักพืชศาสตร์กับสาขาวิชาอื่น ๆ	4
	5. สรุป	6
	คำถามวัดการเรียนรู้	6
2	**ส่วนต่าง ๆ ของพืช**	**7**
	แนวคิด	8
	1. ราก	9
	2. ลำต้น	12
	3. ใบ	17
	4. ดอก	19
	5. ผล	21
	6. สรุป	25
	คำถามวัดการเรียนรู้	25
3	**เซลล์เนื้อเยื่อพืช**	**26**
	แนวคิด	26
	1. เซลล์พืช	27
	2. การแบ่งเซลล์ของพืช	31
	3. เนื้อเยื่อพืช	32
	4. สรุป	35
	คำถามวัดการเรียนรู้	36
4	**กระบวนการเกิดขึ้นในพืช**	**37**
	แนวคิด	38
	1. การดูดน้ำ	38
	2. การดูดแร่ธาตุอาหาร	40
	3. การลำเลียงน้ำ	40
	4. การลำเลียงแร่ธาตุอาหาร	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

5. การลำเลียงอาหาร....42
6. การคายน้ำ....44
7. การสังเคราะห์แสง....47
8. การหายใจ....51
9. สรุป....58
คำถามวัดการเรียนรู้....59

5 การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช....60
แนวคิด....60
1. นิยามการเจริญเติบโตของพืช....61
2. นิยามการพัฒนาการของพืช....61
3. วงจรการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช....61
4. สรุป....65
คำถามวัดการเรียนรู้....66

6 ปัจจัยที่มีอิทธิต่อการเจริญเติบโตของพืช....67
แนวคิด....67
1. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม....68
2. ปัจจัยทางพันธุกรรม....73
3. ปัจจัยทางฮอร์โมนพืช....74
4. สรุป....76
คำถามวัดการเรียนรู้....77

7 การจำแนกประเภทของพืช....78
แนวคิด....79
1. การจำแนกตามลักษณะการปลูกและดูแลรักษา....80
2. การจำแนกทางการเกษตร....84
3. การจำแนกทางนิเวศวิทยาและการแพร่พันธุ์พืชตามลักษณะภูมิศาสตร์....85
4. การจำแนกตามการผลัดใบ....86
5. การจำแนกตามอุณหภูมิที่พืชต้องการ....86
6. การจำแนกตามอายุของพืช....87
7. จำแนกตามวัตถุประสงค์เฉพาะอย่าง....87

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	8. การจำแนกทางวิทยาศาสตร์หรือพฤกษศาสตร์	88
	9. การจำแนกตามโครงสร้างและทรงของลำต้น	91
	10. สรุป	91
	คำถามวัดการเรียนรู้	92
8	**การขยายและปรับปรุงพันธุ์พืช**	**93**
	แนวคิด	93
	1. การขยายพันธุ์พืช	93
	2. การปรับปรุงพันธุ์พืช	100
	3. สรุป	102
	คำถามวัดการเรียนรู้	103
9	**การปลูกและบำรุงรักษาพืช**	**104**
	แนวคิด	104
	1. วิธีการปลูกพืช	105
	2. ข้อพิจารณาในการเลือกวิธีการปลูก	109
	3. การบำรุงรักษาพืช	110
	4. สรุป	118
	คำถามวัดการเรียนรู้	118
10	**การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว**	**119**
	แนวคิด	120
	1. ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยว	120
	2. ความสำคัญของการเก็บเกี่ยว	121
	3. ดัชนีการเก็บเกี่ยว	122
	4. วิธีการเก็บเกี่ยว	124
	5. การจัดการเก็บเกี่ยว	126
	6. ช่วงเวลาของการเก็บเกี่ยว	127
	7. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยว	127
	8. สาเหตุของการสูญเสีย	129
	9. แหล่งของการสูญเสียผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว	130

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

10. การเก็บรักษาผลผลิต....130
11. วิธีการเก็บรักษาผลผลิต....131
12. ความเสียหายของผลผลิตอันเนื่องมาจากการเก็บรักษา....132
13. การจัดการกับผลผลิตที่ถูกคัดออก....133
14. สรุป....134
คำถามวัดการเรียนรู้....135
บรรณานุกรม....136

บทที่ 4
กระบวนการเกิดขึ้นในพืช

ประเด็นสาระ

แนวคิด

1. การดูดน้ำ
    - 1.1 วิธีการดูดน้ำ
    - 1.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดน้ำของพืช
    - 1.3 ผลกระทบต่อพืชเมื่อขาดน้ำ
    - 1.4 การปรับตัวต่อสภาพขาดน้ำ
2. การดูดแร่ธาตุอาหาร
    - 2.1 การแพร่
    - 2.2 การแลกเปลี่ยนอิออน
    - 2.3 กระบวนการแอกทีฟแอพซอพชั่นและการสะสมไอออน
3. การลำเลียงน้ำ
    - 3.1 กลไกการลำเลียงน้ำของพืช
    - 3.2 วิถีทางการลำเลียงน้ำทางรากพืช
4. การลำเลียงแร่ธาตุอาหาร
5. การลำเลียงอาหาร
6. การคายน้ำ
    - 6.1 บริเวณที่คายน้ำ
    - 6.2 กลไกการคายน้ำของพืช
    - 6.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการคายน้ำของพืช
    - 6.4 ผลกระทบของการคายน้ำ
    - 6.5 การวัดการคายน้ำของพืช
    - 6.6 การคายน้ำในรูปหยดน้ำ
7. การสังเคราะห์แสง
    - 7.1 ปฏิกิริยาเคมีของการสังเคราะห์แสง
    - 7.2 สิ่งจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์แสง

7.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสง

8. การหายใจ

8.1 กระบวนการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจน

8.2 กระบวนการสลายอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน

9. สรุป

คำถามวัดการเรียนรู้

แนวคิด

พืชมีกระบวนการทางสรีรวิทยาเกิดขึ้นภายในเซลล์หลายกระบวนการ ซึ่งมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืช แต่ละกระบวนการมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน มีความสำคัญเท่าเทียมกัน อาศัยซึ่งกันและกัน ทำงานร่วมกันเพื่อให้พืชนั้นสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในพืชได้แก่ การดูดน้ำ การดูดเกลือแร่ การลำเลียงน้ำ การลำเลียงเกลือแร่ การลำเลียงอาหาร การคายน้ำ การสังเคราะห์ด้วยแสง และการหายใจ

1. การดูดน้ำ (absorption of water)

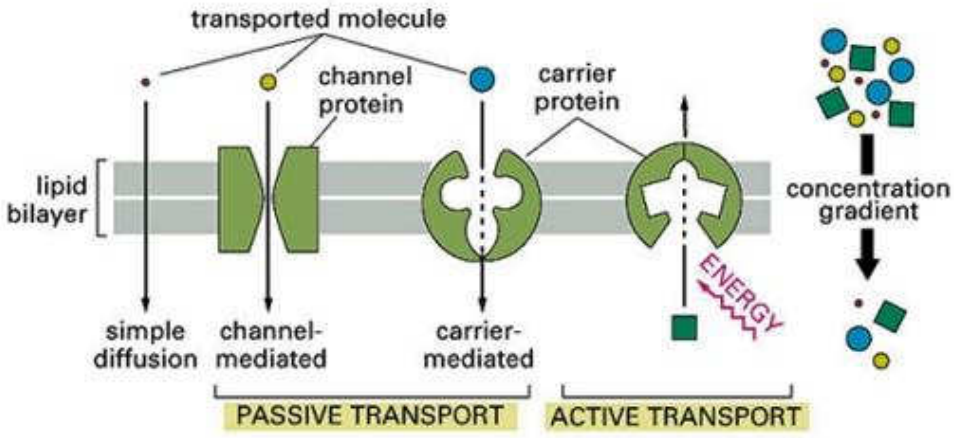
น้ำเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ทั้งหลายภายในเซลล์พืช น้ำเป็นตัวทำละลายที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ขึ้นภายในเซลล์อีกทั้งน้ำยังเป็นตัวกลางที่ทำให้สารเคลื่อนย้ายจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่งได้ เซลล์พืชสามารถปรับปริมาณน้ำภายในตัวเองให้เหมาะสมกับชนิดและหน้าที่ของตน เช่น เซลล์ที่มีชีวิตยังทำหน้าที่ตามปกติของพืชจะมีปริมาณน้ำในเซลล์ประมาณ 85-95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เซลล์พืชที่กำลังพักตัวเช่น เซลล์ในเมล็ดจะมีน้ำเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เซลล์ของพืชที่พักตัวในฤดูหนาวก็จะมีปริมาณน้ำน้อยเช่นเดียวกัน (เรณู, 2545) พืชมีเนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem) ทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุต่างๆ จากรากขึ้นสู่ส่วนต่างๆ ของพืช บริเวณที่มีการดูดน้ำมากที่สุดคือ บริเวณขนราก (root hair zone) โมเลกุลของน้ำเข้าสู่เซลล์พืชในชั้นคอร์เทกซ์ได้ 2 ทาง คือ ทางอะโพพลาสต์ (apoplast) เป็นการที่โมเลกุลของน้ำเคลื่อนผ่านเข้าทางส่วนที่ไม่มีชีวิตของเซลล์รากคือบริเวณผนังเซลล์และช่องระหว่างเซลล์ ส่วนอีกทางหนึ่งคือทางซิมพลาสต์ (symplast) เป็นการที่โมเลกุลของน้ำเคลื่อนเข้าสู่ภายในเซลล์พืชจากเซลล์ขนรากผ่านเข้าในเซลล์ของชั้นคอร์เทกซ์ โดยผ่านเข้าสู่โพรโทพลาสซึม แวคิวโอล ซึ่งน้ำเคลื่อนจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่งโดยผ่านทางพลาสโมเดสมาตา (plasmodesmata)

1.1 วิธีการดูดน้ำ การดูดน้ำของรากทำได้ 2 วิธี คือ วิธีดูดน้ำโดยที่พืชไม่ต้องใช้พลังงานและวิธีดูดน้ำที่พืชต้องใช้พลังงาน (Chavarria and Santos, 2012)

1.1.1 วิธีดูดน้ำโดยที่พืชไม่ต้องใช้พลังงาน (passive water absorption) เป็นวิธีที่โมเลกุลน้ำจะเคลื่อนผ่านเข้าสู่เซลล์พืชได้เองโดยที่เซลล์ไม่ต้องใช้แรงในการดึงโมเลกุลน้ำ เช่น โดยวิธีการแพร่ (diffusion) หรือโดยวิธีออสโมซิส (osmosis) เป็นวิธีที่พืชดูดน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ โดยเริ่มจากเซลล์ขนราก ซึ่งมีสารละลายอยู่มากในไซโตพลาสซึมจึงมีแรงดันออสโมซิส (osmotic

pressure) สูงกว่าน้ำในดิน น้ำจากดินจึงแพร่เข้าสู่เซลล์ได้ เมื่อน้ำเข้าสู่เซลล์ขนรากจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในเซลล์น้อยกว่าเซลล์ที่อยู่ถัดเข้าไป น้ำจากเซลล์ขนรากจึงแพร่เข้าสู่เซลล์ใกล้เคียงได้ และในทำนองเดียวกันนี้น้ำจะสามารถแพร่ต่อไปยังเซลล์ถัดไปได้เรื่อยๆ

1.1.2 วิธีดูดน้ำที่พืชต้องใช้พลังงาน (active water absorption) เป็นวิธีที่พืชต้องใช้พลังงาน ATP (adenosine triphosphate) หรือพลังงานซึ่งได้จากขบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ดึงน้ำจากบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าน้ำในเซลล์เข้าสู่เซลล์ได้ ซึ่งมักเกิดในบริเวณที่แห้งแล้ง น้ำในดินมีน้อย



ภาพที่ 4.1 การดูดน้ำของพืช
ที่มา: plantcellbiology.masters.grkraj.org

1.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดน้ำของพืช

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายในดินจะต้องเจือจางจึงจะทำให้การดูดน้ำเป็นไปด้วยดี และอัตราการดูดน้ำยังขึ้นกับปริมาณน้ำในดิน อุณหภูมิในดิน และการถ่ายเทอากาศในดิน เพราะเกี่ยวข้องกับการหายใจของรากรวมทั้งขึ้นกับโครงสร้างลักษณะของรากด้วย

1.3 ผลกระทบต่อพืชเมื่อขาดน้ำ

1.3.1 ทำให้ปากใบของพืชปิดลดการสังเคราะห์แสง

1.3.2 ประสิทธิภาพการพัฒนาของใบลดลง ใบแก่เร็วขึ้นหรือหลุดร่วงได้ง่าย

1.3.3 การสร้างและสะสมฮอร์โมน ABA, ethylene เพิ่มขึ้น แต่การสร้างและสะสมฮอร์โมน IAA, CK, GA และ การตอบสนองทางสัณฐานวิทยา (morphological response) ลดลง

1.3.4 มีใบน้อย ใบหนาขึ้น สัดส่วนยอดต่อรากลดลง

1.3.5 ใบขาดไนโตรเจนและคลอโรฟิลด์

1.3.6 ใบและต้นเหี่ยว

1.3.7 ใบบิดม้วน

1.4 การปรับตัวต่อสภาพขาดน้ำ

1.4.1 พัฒนาสภาพเร็วขึ้น (rapid phenological development) เช่น แก่หรือสุกเร็วขึ้น

1.4.2 การยืดระยะเวลาการพัฒนาการออกไป (plasticity)

1.4.3 การทนต่อสภาวะแห้งแล้งด้วยกระบวนการ osmoticadjustment คือ การสะสมตัวถูกละลาย (solute) ในเซลล์มากขึ้น เพื่อรักษาปริมาณน้ำในเซลล์

1.4.4 การลดการคายน้ำและการดูดน้ำเพิ่มขึ้นด้วยการมีขนหรือแว๊ก (wax) ที่ผิวใบ การม้วนใบ การลดพื้นที่ใบ การมีระบบรากที่ลึก

1.4.5 การลดฮอร์โมนและการมีเอนไซม์บางตัว เช่น โพลีน (proline)

2. การดูดธาตุอาหารของพืช (absorption of mineral plant nutrition)

พืชส่วนใหญ่ดูดธาตุอาหารในรูปของไอออนทั้งประจุบวกและลบ พืชอาจดูดไอออนชนิดต่างๆ ด้วยอัตราเร็วไม่เท่ากัน วิธีการดูดธาตุอาหารของพืชได้แก่ การแพร่ การแลกเปลี่ยนอิออน และกระบวนการแอกทีฟแอพซอพชั่นและการสะสมไอออน

2.1 การแพร่ (diffusion) ปกติในดินจะมีแร่ธาตุอาหารมากกว่าในเซลล์เสมอ ดังนั้นแร่ธาตุอาหารจากดินจึงแพร่เข้าสู่เซลล์ได้ เมื่อเซลล์หนึ่งรับแร่ธาตุอาหารเข้ามาทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าเซลล์ถัดไป จึงแพร่ผ่านต่อกันไปได้อย่างต่อเนื่อง

2.2 การแลกเปลี่ยนอิออน (ion exchange) เป็นวิธีดูดแร่ธาตุอาหารโดยมีการแลกเปลี่ยนไอออนกับผิวราก ที่รากจะมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในการหายใจของเซลล์ที่เข้ารวมกับน้ำเป็นกรดคาร์บอนิค (H_2CO_3) แล้วแตกตัวให้ H^+ ยึดเกาะกับผิวรากและเคลื่อนที่ในวงจำกัด บริเวณผิวรากจึงมีแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกกับประจุลบ และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกันได้ เช่น ในสารละลายที่มีโพแทสเซียมไอออน (K^+) มาก แล้วเคลื่อนที่เข้าไปอยู่บริเวณราก K^+ ก็มีโอกาสที่จะถูกจับไว้ที่ผิวรากได้เช่นเดียวกับ H^+ และโอกาสที่ H^+ และ K^+ จะหลุดออกจากรากก็มีเท่ากัน ถ้า H^+ หลุดออก K^+ ก็สามารถจะเข้าไปแทนที่ได้เช่นกัน ส่วนการแลกเปลี่ยนโดยการดูดประจุลบ เกิดจากการเข้าแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) หรือกรดคาร์บอนิก (HCO_3^-) ซึ่งมีอยู่ในรากเป็นส่วนใหญ่ การแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ pH ของน้ำในดินเปลี่ยนแปลงไปด้วย ถ้ามีการแลกเปลี่ยนประจุบวกมาก pH ของน้ำในดินจะเป็นกรดมากขึ้น

2.3 กระบวนการแอกทีฟแอพซอพชั่นและการสะสมไอออน (active absorption and ion accumulation) การดูดเกลือแร่โดยวิธี active absorption ส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณเนื้อเยื่อเจริญของราก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการหายใจสูง มีพลังงานมาก จึงดูดและสะสมเกลือแร่มาก

3. การลำเลียงน้ำ (conduction of water)

เมื่อรากพืชได้ดูดน้ำสู่เนื้อเยื่อไซเล็ม (xylem tissue) แล้ว จากนั้นไซเล็มก็จะทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำนั้นให้ขึ้นสู่ลำต้น ใบ และอวัยวะอื่นๆที่อยู่สูงขึ้นไปการลำเลียงน้ำจะมีทิศทาง

ขึ้นสู่เบื้องบนเท่านั้น โดยผ่านเข้าในเซลล์เวสเซลเมมเบอร์ (vessel member) หรือในพืชพวกสนจะเป็นเนื้อเยื่อเทรคีด (tracheid tissue) ส่วนพาเรงคิมา (parenchyma) และไฟเบอร์ (fiber) ก็อาจช่วยทำหน้าที่ละเลียงได้แต่ไม่มากนัก การลำเลียงน้ำทางไซเล็มอาจมีแรงต่าง ๆ มาช่วย เช่น แรงดันราก แรงดึงแคพิลลารี และแรงดึงจากการคายน้ำ

3.1 กลไกการลำเลียงน้ำของพืช การลำเลียงน้ำของพืชจากส่วนล่างสู่ส่วนบน คือ จากรากขึ้นสู่ที่สูงไปยังลำต้นและใบของพืช มีกลไกการลำเลียงหลายวิธีร่วมกัน ได้แก่

3.1.1 แรงดันราก (root pressure) คือ แรงดันให้น้ำเคลื่อนที่ต่อเนื่องกันจากรากเข้าสู่ไซเล็มจนถึงปลายยอดของพืช แรงดันนี้เป็นกระบวนการ active absorption แรงดันรากมีเพียง 2-5 บรรยากาศเท่านั้น และเกิดเฉพาะกับพืชบางชนิดในสภาพพื้นดินที่มีความชุ่มชื้นมาก ดังนั้นแรงดันรากเพียงอย่างเดียวจึงไม่น่าจะเพียงพอที่จะดันให้น้ำขึ้นไปถึงยอดที่มีความสูงมาก ๆ ได้ ต้องมีแรงดันอย่างอื่นมาช่วยดันให้น้ำขึ้นไปด้วย

3.1.2 แรงดึงแคพิลลารี (capillary action) คือ การเคลื่อนที่ของน้ำในหลอดขนาดเล็ก (capillary tube) ที่ถูกดันให้ขึ้นไปสูงกว่าระดับน้ำในบริเวณเดียวกัน ซึ่งเกิดจากแรงตึงผิวของโมเลกุลของน้ำกับผนังด้านข้างของหลอดที่มีแรงยึดเกาะกัน เรียกว่า แอดฮีซันคะพิลลารี แอคชัน (adhesion capillary action) ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในท่อเวสเซลที่ไหลต่อกันอย่างไม่ขาดสาย เป็นเพราะโมเลกุลของน้ำมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน คือ แรงโคฮีชัน (cohesion) และมีแรงแอดฮีชัน (adhesion) ยึดเกาะกับผิวของท่อเวสเซลล์ การที่น้ำจะลำเลียงขึ้นไปได้สูงมาก ๆ นั้น ท่อจะต้องมีขนาดเล็กมาก แต่ท่อน้ำของพืชยังมีขนาดเล็กไม่พอที่จะทำให้เกิดคะพิลลารี่แอคชัน นำน้ำไปถึงยอดพืชที่สูงมาก ๆ ได้

3.1.3 แรงดึงจากการคายน้ำ (transpiration pull) คือ แรงที่เกิดจากการคายน้ำของพืช ซึ่งเป็นวิธีลำเลียงน้ำได้ดีของพืชทุกชนิด ทุกขนาด ใบของพืชมีการคายน้ำตลอดเวลาทำให้เซลล์ของใบขาดน้ำจึงเกิดแรงดึงนำน้ำจากข้างล่างขึ้นมาทดแทนได้อย่างต่อเนื่อง

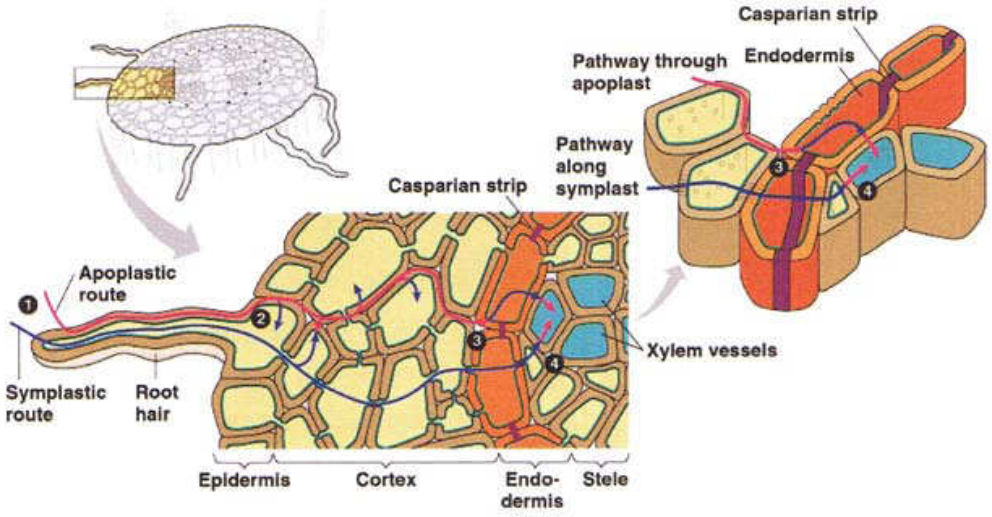
3.2 วิถีทางการลำเลียงน้ำทางรากพืช น้ำในดินที่สัมผัสกับผิวรากจะเข้าสู่ท่อน้ำในรากโดยผ่านเซลล์ชั้นต่าง ๆ คือ เอพิเดอร์มิส คอร์เทกซ์ เอนโดเดอร์มิส และท่อน้ำ ด้วย 2 วิถีทาง

3.2.1 วิถีอะโปพลาสต์ (apoplast pathway) น้ำจะเคลื่อนที่จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์ โดยทาง Membrane หรือทางช่องว่างระหว่างเซลล์ ซึ่งน้ำจะต้องเคลื่อนที่ข้ามผ่าน Membrane ในแต่ละเซลล์ 2 ครั้ง และขณะที่น้ำอยู่ในเซลล์ น้ำอาจจะเข้าและออกจากแวคิวโอลได้

3.2.2 วิถีซิมพลาสต์ (symplast pathway) น้ำเคลื่อนที่จากเซลล์หนึ่งไปอีกเซลล์ที่อยู่ข้างเดียว โดยผ่านทางรูผนังเซลล์ (plastmodesma) ช่องทางนี้เป็นทางติดต่อของไซโตพลาสซึม ดังนั้นน้ำจึงเคลื่อนที่ผ่านไซโตพลาสซึมจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง วิถีซิมพลาสต์นี้น้ำสามารถผ่านเซลล์เอพิเดอร์มิสเข้าสู่คอร์เทกซ์ เอนโดเดอร์มิส และไซเล็มได้

การลำเลียงน้ำโดยวิถีอะโปพลาสต์ จะมาสิ้นสุดที่เซลล์เอนโดเดอร์มิสเนื่องจากเซลล์ชั้นนี้มีแถบไขมันพวกซูเบอริน (suberin) เคลือบผนังเซลล์ที่เรียกว่า แถบแคสปาเรียน (casparian stripe) ซึ่งไขมันไม่ละลายในน้ำ ทำให้น้ำผ่าน Membrane ไม่ได้ ดังนั้นน้ำที่ลำเลียงมาโดยวิถีอะโปพลาสต์จะเข้าสู่เอนโดเดอร์มิสได้ด้วยวิถีซิมพลาสต์ หรือช่องว่างของแถบแคสปาเรียนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเกิดรากแขนง อย่างไรก็ตาม พบว่า สารซูเบอรินจะมีแต่เฉพาะใน

เอนโดเดอร์มิสของรากที่มีอายุมาก ซึ่งหยุดการเจริญเติบโตแล้ว และเป็นบริเวณที่ห่างจากปลายราก ซึ่งมีการดูดน้ำน้อยส่วนปลายรากที่อายุยังน้อยไม่พบซูเบอริน ดังนั้น น้ำจึงเคลื่อนที่ผ่านเซลล์บริเวณปลายรากในปริมาณที่มาก



ภาพที่ 4.2 วิถีทางการลำเลียงน้ำทางรากพืชทางอะโปพลาสต์และซิมพลาสต์
ที่มา: Johnson (1997)

4. การลำเลียงแร่ธาตุอาหาร (translocation of minerals)

พืชจะลำเลียงเกลือแร่ไปทางเนื้อเยื่อไซเล็ม โดยลำเลียงไปพร้อมกับน้ำ ซึ่งอาจใช้วิธีการแพร่ แรงดึงแคพิลลารี แรงดันราก รวมทั้งแรงดึงจากการคายน้ำ วิธีต่าง ๆ ทั้งหมดนี้คาดว่าพืชจะใช้ร่วมกันในการลำเลียงเกลือแร่ และยังพบว่ามีไอออนของเกลือแร่ในเนื้อเยื่อโฟลเอ็มด้วย โดยมีปริมาณสูงเท่า ๆ กับในเนื้อเยื่อไซเล็มซึ่งอาจเกิดขึ้นเพราะมีการแพร่เข้าไปก็ได้ เพราะเนื้อเยื่อทั้งสองนี้อยู่ติดกัน นอกจากนั้นในท่อไซเล็มนี้ยังพบการลำเลียงน้ำตาล กรดอะมิโนบางชนิด และฮอร์โมนไซโทไคนิน (cytokinin) อัตราการดูดซึมและลำเลียงเกลือแร่แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ธาตุบางชนิดดูดซึมเข้ามามาก บางชนิดดูดซึมเข้ามาน้อย คาดว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องต้องมีหลายปัจจัย เช่น การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ รวมทั้งกระบวนทางเคมีต่าง ๆ ในพืชจะเป็นผู้ตัดสินปริมาณและชนิดของเกลือแร่ที่พืชต้องการ

5. การลำเลียงอาหาร (translocation of organic compound)

พืชทำการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ใบได้น้ำตาลซูโครสและอาหารอื่น ๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่พืชสร้างได้ การลำเลียงโดยลำเลียงผ่านเนื้อเยื่อลำเลียงอาหารหรือโฟลเอ็ม แรงดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนอาหารนี้สูงมาก อีกทั้งยังสามารถขับดันให้การลำเลียงมีทิศทางทั้งขึ้นและลง รวมทั้งลำเลียงไปตามแนวรัศมีด้วย การทดลองที่แสดงว่าพืชลำเลียงอาหารไปตามท่อโฟลเอ็มอาจทำได้

โดยการควั่นและลอกเปลือกของลำต้นพืชใบเลี้ยงคู่ออก ทิ้งไว้ 2-3 สัปดาห์ จะสังเกตเห็นบริเวณรอยควั่นตอนบนโป่งออก เนื่องจากอาหารที่ลำเลียงลงมาจากยอดมาสะสมอยู่มาก (สกุล, ม.ป.ป.)

สมมติฐานที่อธิบายกลไกการลำเลียงสารอาหารของพืชที่ยอมรับกันทั่วไปในปัจจุบัน คือ Mass Flow Hypothesis ซึ่งอธิบายว่า สารอาหารถูกลำเลียงไปในท่อโฟลเอ็มเกิดจากการผลักดันโดยความแตกต่างของความดันภายในท่อ สมมติฐานนี้มีนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อสนับสนุน ดังเช่น M.H. Zimmerman ได้สังเกตการใช้ปากของเพลี้ยอ่อนเจาะเข้าไปในท่อโฟลเอ็มของพืช เพื่อดูดของเหลวจากท่อจนล้นออกมาทางก้น (Honen dew) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเหลวที่ไม่ผ่านลำตัวของเพลี้ยน่าจะเป็นสิ่งที่น่าเชื่อถือมากกว่า เขาจึงตัดส่วนของลำตัวเพลี้ยโดยการทำให้สลบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัดตัวเพลี้ยด้วยแสงเลเซอร์ ของเหลวที่ได้จากปากเพลี้ยพบว่า ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ดังนั้นถ้าให้ $14CO_2$ ทางใบกับพืชเพื่อทำการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งจะได้ซูโครสที่มี 14C เป็นองค์ประกอบ และเมื่อให้เพลี้ยอ่อนแทงปากในโฟลเอ็มตำแหน่งต่าง ๆ ก็จะหาอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำตาลในโฟลเอ็มได้ จากการทดลอง พบว่า น้ำตาลในโฟลเอ็มสามารถเคลื่อนที่ด้วยอัตราประมาณ 100 เซนติเมตรต่อ ชั่วโมง จากผลการทดลองนี้ทำให้คิดได้ว่า การเคลื่อนที่ของน้ำตาลในโฟลเอ็มคงไม่ใช่กระบวนการแพร่ธรรมดา ต้องมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วย (กนกวรรณ, 2551)

ในทฤษฎี Mass Flow ซึ่งเสนอโดย Ernst Munch ในปีค.ศ. 1930 อธิบายการไหลของของเหลวในเซลล์ลำเลียงอาหารว่ามีแรงผลักดันที่เกิดจากความแตกต่างของความดันระหว่างแหล่งสร้าง (source) กับแหล่งเก็บ (sink) ซึ่งความแตกต่างของความดันเกิดจากการลำเลียงอาหารเข้าสู่โฟลเอ็มที่แหล่งสร้าง และการลำเลียงอาหารออกจากโฟลเอ็มที่แหล่งเก็บ (sink cell) พืชจะใช้พลังงานในการลำเลียงอาหารเข้าสู่โฟลเอ็มที่แหล่งสร้าง ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในโฟลเอ็มเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำในเซลล์โฟลเอ็มจึงลดลง น้ำจากเซลล์ไซเล็มข้างเคียงจึงแพร่เข้าสู่เซลล์โฟลเอ็ม ทำให้เซลล์มีแรงดันเต่ง (turgor pressure หรือ T.P.) เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันการลำเลียงอาหารออกจากโฟลเอ็มไปที่เซลล์แหล่งเก็บ ทำให้ความเข้มข้นของน้ำในเซลล์โฟลเอ็มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นลดลง ทำให้น้ำแพร่ไปยังเซลล์ไซเล็มที่อยู่ข้างเคียง แรงดันเต่งในโฟลเอ็มจึงลดลง แรงดันเต่งที่แหล่งสร้างกับที่แหล่งเก็บจึงแตกต่างกันทำให้เกิดการแพร่ของสารจากเซลล์แหล่งสร้างมายังเซลล์แหล่งเก็บได้ ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงาน

แม้ว่าการลำเลียงอาหารจะใช้กลไกความแตกต่างของความดันเป็นแรงผลักดันให้สารละลายในโฟลเอ็มเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกลแบบไม่ใช้พลังงาน (passive) แต่พืชก็ยังต้องใช้พลังงาน (active) ในการนำสารละลายเข้าและออกจากโฟลเอ็มในปริมาณมากเพื่อสร้างความแตกต่างของความดันที่จะเป็นแรงผลักดันในการลำเลียงจากใบที่เป็นแหล่งสร้างไปยังรากซึ่งเป็นแหล่งเก็บ

6. การคายน้ำ (transpiration)

น้ำที่พืชดูดเข้าไปทางราก จะถูกลำเลียงผ่านลำต้นไปที่ใบเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น น้ำส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปในรูปของไอน้ำทางปากใบ เรียกว่า การคายน้ำ ซึ่งจะเกิดในเวลากลางวันที่พืชมีการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนในเวลากลางคืนเป็นเวลาที่ปากใบปิด พืชจะกำจัดน้ำออกทางท่อไฮดราโทด (hydrathode) ที่บริเวณปลายใบในรูปของหยดน้ำ เรียกว่า กัตเตชัน (guttation)

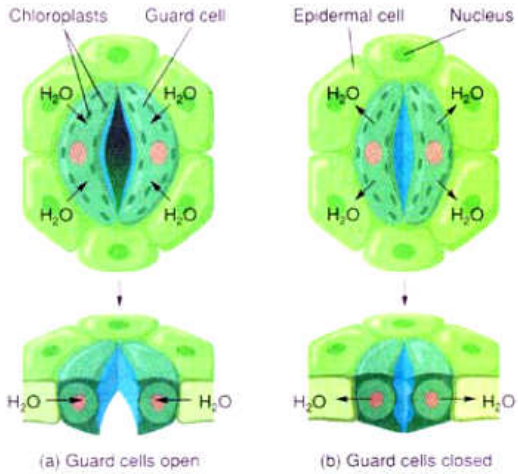
6.1 บริเวณที่คายน้ำ การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่เป็นการแพร่ของไอน้ำ ซึ่งเกิดได้หลายบริเวณ ได้แก่ ปากใบ ผิวใบ และรอยแตกของลำต้น

6.1.1 การคายน้ำทางปากใบ (stomatal transpiration) เกิดมากที่สุด

6.1.2 การคายน้ำทางผิวใบ (cuticular transpiration) ที่ผิวใบมีคิวติเคิล (cuticle) ฉาบอยู่ที่ผิวเซลล์เอพิเดอร์มิส บริเวณนี้คายน้ำได้น้อย เนื่องจากมีสารพวกไขมัน (wax) เคลือบอยู่ป้องกันการแพร่ของไอน้ำ

6.1.3 การคายน้ำทางรอยแตกของลำต้นที่เรียกว่า ตา (lenticular transpiration) เกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจาก lenticel มีน้อยและเป็นส่วนของ cork cell ด้วย

6.2 กลไกการคายน้ำของพืช การคายน้ำคือการที่ปากใบเปิดออกเพื่อแลกเปลี่ยนแก๊สสำคัญ เช่น O_2 และ CO_2 ซึ่งใช้สำหรับกระบวนการต่าง ๆ ในพืช การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ใบเพราะใบเป็นอวัยวะที่มีช่องปากใบมากที่สุด ปากใบประกอบด้วยเซลล์คุม 2 เซลล์ที่ประกบคู่กันโดยผนังเซลล์ตรงกลางสามารถแยกจากกันเป็นช่องเรียกว่า ช่องปากใบ (stoma) ปากใบจะเปิดเมื่อเซลล์คุมมีน้ำอยู่ในเซลล์เป็นปริมาณมาก ทำให้เซลล์คุมทั้งสองเต่งและดันตัวออกจากกัน ทำให้ช่องปากใบเปิดกว้างออกและจะปิดเมื่อเซลล์คุมเสียน้ำมากจนเซลล์เหี่ยวแฟบลงทำให้ปากใบปิด



ภาพที่ 4.3 การปิดเปิดของปากใบ: (a) เซลล์คุมเปิด และ (b) เซลล์คุมปิด
ที่มา: Johnson (1997)

ภาพที่ 4.4 การคายน้ำของพืช
ที่มา: mail.vcharkarn.com

6.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการคายน้ำของพืช การคายน้ำของพืชจะเกิดมากหรือน้อย เร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับสภาพต่าง ๆ ดังนี้

6.3.1 แสงสว่าง ในสภาพที่มีความเข้มของแสงมาก จะมีผลทำให้ปากใบเปิดกว้าง เนื่องจากเซลล์คุมมีการสังเคราะห์ด้วยแสงมากใบจึงคายน้ำมาก นอกจากนี้แสงสว่างยังมีผลทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศรอบใบสูง ทำให้น้ำรอบ ๆ ใบกลายเป็นไอมากขึ้น ใบจึงคายน้ำมาก

6.3.2 ความชื้นในบรรยากาศ ถ้าความชื้นหรือปริมาณไอน้ำที่อยู่รอบต้นไม้มีมาก ไอน้ำภายในใบพืชย่อมแพร่ออกมาได้ยาก แต่ถ้าอากาศแห้งไอน้ำในใบย่อมออกมาได้ง่ายและเร็ว

6.3.3 ลม ขณะที่มีลมพัดแรงจะพัดพาไอน้ำไปจากบริเวณรอบใบ ทำให้เกิดความแห้งที่รอบใบ ไอน้ำจากในใบจึงระเหยออกมาสะสมมาก แต่ถ้าลมพัดแรงมากจนเป็นพายุ ปากใบจะปิดการคายน้ำจะลดลง ถ้าลมสงบไอน้ำภายในกับภายนอกใบไม่แตกต่างกันมาก ใบจะคายน้ำได้ตลอดเวลา ในอัตราที่ต่ำกว่ามีลมพัด

6.3.4 อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงเช่นเวลาเที่ยงหรือบ่าย ทำให้น้ำในใบระเหยเป็นไอน้ำและมีโอกาสแพร่ออกจากใบได้ง่าย ดังนั้นในวันที่อากาศร้อนจัดต้นไม้จึงเหี่ยวมาก

6.3.5 ความเข้มของแสงในสภาพที่มีความเข้มของแสงมาก จะมีผลทำให้ปากใบเปิดกว้าง เนื่องจากเซลล์คุมมีการสังเคราะห์ด้วยแสงมากใบจึงคายน้ำมาก นอกจากนี้แสงสว่างยังมีผลทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศรอบใบสูง ทำให้น้ำรอบ ๆ ใบกลายเป็นไอมากขึ้น ใบจึงคายน้ำมาก

6.3.6 ปริมาณน้ำในดิน ถ้าน้ำในดินมีมาก พืชก็สามารถดูดขึ้นมาและคายออกไปได้ตลอดเวลาทำให้ปริมาณการคายนำสูง แต่ถ้าน้ำในดินน้อยการคายน้ำก็จะต่ำตามไปด้วย

6.3.7 ความกดดันของบรรยากาศ ถ้าความกดดันของบรรยากาศต่ำไอน้ำในใบจะแพร่ออกมาได้ง่ายกว่าในเวลาที่บรรยากาศมีความกดดันสูง

6.3.8 โครงสร้างของใบ พืชแต่ละชนิดมีลักษณะโครงสร้างของใบแตกต่างกัน ซึ่งมักจะเป็นการปรับตัวตามสภาพของแหล่งที่อยู่ด้วย เช่น พืชทะเลทราย (xerophyte) มีการปรับตัวโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของใบ เพื่อลดการคายน้ำ เช่น มีปากใบบุ๋มลึกเข้าไปในเนื้อใบ เพื่อทำให้เกิดแอ่งเล็ก ๆ ขังน้ำ เรียกว่า shunken stoma น้ำในแอ่งจะทำให้บรรยากาศรอบใบอิ่มตัวด้วยความชื้นและไอน้ำ ใบจึงคายน้ำได้ยาก เป็นการลดการคายน้ำ นอกจากนี้ยังมีการลดขนาดของใบ หรือดัดแปลงใบไปเป็นหนาม เพื่อลดปากใบให้น้อยลงหรือไม่มี ส่วนพืชที่อยู่ในที่ชุ่มชื้น (hydrophyte) มักมีปากใบเรียบหรือนูนขึ้น (raised stoma) และมีแผ่นใบขนาดใหญ่ ทำให้คายน้ำได้มาก พืชบกที่ขึ้นในที่มีความชื้นปานกลาง (mesophyte) มักมีแผ่นใบปานกลาง มีการคายน้ำแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนปากใบของพืช

6.4 ผลกระทบของการคายน้ำ การคายน้ำเป็นกระบวนการที่ให้โทษกับพืชมากกว่าจะเป็นประโยชน์และพืชอาจตายได้หากมีการคายน้ำมากเกินไป แต่การคายน้ำอาจเป็นประโยชน์ได้ เช่น ช่วยลดอุณหภูมิของใบ ช่วยในการดูดน้ำเกลือแร่ และช่วยในการลำเลียงน้ำและเกลือแร่ เพราะจะทำให้เกิดแรงดึงจากการคายน้ำ

6.5 การวัดการคายน้ำของพืช พืชแต่ละชนิดมีการคายน้ำที่แตกต่างกัน อัตราการคายน้ำจึงไม่เท่ากัน การคายน้ำของพืชคิดเป็นน้ำหนักหรือปริมาตรต่อหน่วยเวลา วิธีวัดทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้กันมาก คือ วัดด้วย โปโตมิเตอร์ (potometer method) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วย หลอดแก้วบรรจุน้ำมีกิ่งไม้เสียบกับจุกยางที่ปากหลอด จากหลอดแก้วมีแขนยื่นออกไป 2 ข้าง แขนด้านซ้ายติดกับกรวยที่มีก๊อกปิดเปิด สำหรับเติมน้ำเข้าหลอดแก้ว แขนด้านขวาเป็นหลอดแก้วที่มีรูขนาดเล็กมาก (capillary tube) มีมาตราส่วนแบ่งเป็นปริมาตรที่มีความละเอียด ปลายหลอดงอจุ่มอยู่ในแก้วบรรจุน้ำสี

การทดลองหาอัตราการคายน้ำของพืช ก่อนทำการทดลองนำถ้วยบรรจุน้ำออกจากปลาย capillary tube ก่อน เพื่อให้เกิดฟองอากาศเข้าสู่หลอด เมื่อใบพืชคายน้ำ ฟองอากาศจะเคลื่อนที่ใช้เป็นตัวชี้วัดบนมาตราส่วน เพื่อบอกปริมาตรของไอน้ำที่พืชคายออกไปทางใบ ต่อจากนี้จึงจุ่มปลายหลอด capillary ลงไปในถ้วยน้ำสี ที่หลอดแก้วใหญ่ จะมีต้นไม้ทั้งต้นหรือเฉพาะกิ่งเสียบแน่นทะลุแผ่นจุกยาง มีหลอดไฟฟ้าให้แสงสว่างอยู่ภายนอก เมื่อเตรียมเครื่องมือเสร็จเรียบร้อยแล้ว เริ่มจับเวลาที่ฟองอากาศ เคลื่อนที่ใน capillary อ่านปริมาตรของน้ำที่ถูกดูดเข้าสู่ลำต้นแล้วระเหยออกทางใบ วัดพื้นที่ของใบพืชทั้งหมด นำมาคำนวณหาอัตราการคายน้ำของพืชต่อพื้นที่ผิวใบ 1 ตารางหน่วยในเวลา 1 หน่วย

6.6 การคายน้ำในรูปหยดน้ำ (guttation) การคายน้ำของพืชที่ออกมาเป็นหยดน้ำส่วนใหญ่เกิดบริเวณปลายใบและขอบใบที่เป็นรอยหยักแหลม และมักเกิดเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายนอกไม่เอื้ออำนวยให้เกิดการคายน้ำในรูปของไอน้ำ เช่น อากาศมีความชื้นสูงอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ลมสงบ อุณหภูมิต่ำ และไม่มีแสงสว่าง ทำให้ปากใบไม่เปิด แต่รากมีการดูดน้ำตลอดเวลา น้ำที่ถูกดันขึ้นมาจะสิ้นสุดที่ปลายของท่อเทรคีด (tracheid) ปลายเส้นใบ ซึ่งจะติดต่อกับเซลล์พาเรนไคมาที่จัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ บางช่วงบางตอนมีรูที่อาจต่อเนื่องไปถึงปลายใบที่มีปากใบอยู่ด้วย ดังนั้นในเวลากลางคืนที่ปากใบปิดก็ยังมีรูเล็ก ๆ เปิดอยู่ เรียกว่า ไฮดราโทด (hydrathode) น้ำจะดันผ่านเซลล์พาเรนไคมามายังรูที่ปลายใบหรือขอบใบได้กลายเป็นหยดน้ำ

7. การสังเคราะห์แสง (photosynthesis)

7.1 ปฏิกิริยาเคมีของการสังเคราะห์แสง กระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นที่ใบของพืชเป็นส่วนใหญ่ ที่เซลล์ใบของพืชมีออร์แกเนลล์ที่เรียกว่า คลอโรพลาสต์ (chloroplast) เป็นแหล่งสำคัญที่ทำให้กระบวนการดำเนินไปได้ตลอด ซึ่งไม่มีโครงสร้างใดในเซลล์พืชที่จะทดแทนได้ นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาค้นคว้าจนพบความจริงว่า กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะดำเนินไปใน 3 ขั้น คือ 1) จับพลังงานจากแสงอาทิตย์ 2) ใช้พลังงานสร้างสารเก็บพลังงาน คือ ATP และ NADPH และ 3) ใช้ ATP เป็นพลังงานในการสร้างโมเลกุลของพืชจาก CO_2 ในอากาศ จากปฏิกิริยาเคมีของการสังเคราะห์ด้วยแสงสามารถสรุปได้ดังนี้

$$6CO_2 + 12H_2O + \text{พลังงานแสง} \xrightarrow{\text{คลอโรฟิลล์}} C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

สารหลักที่ใช้เป็นวัตถุดิบคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide: CO_2) และน้ำ (H_2O) พืชสามารถรับสารทั้งสองนี้เข้าไปได้ง่ายโดยไม่ต้องเสียพลังงานมาก สารทั้งสองนี้มีความคงตัวสูงและมีพลังงานต่ำ จึงสามารถรับพลังงานปริมาณสูงเข้าไปในตัวได้อีก เมื่อเกิดผลผลิตคือคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารที่มีพลังงานสูงแต่มีความคงตัวไม่ไวต่อปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน CO_2 , H_2O และคาร์โบไฮเดรตเป็นสารที่ไม่มีพิษ สามารถดูดซับหรือเก็บสะสมไว้ในเซลล์ได้มาก

7.2 สิ่งจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์แสง

กระบวนการสังเคราะห์แสงจำเป็นต้องอาศัย แสง คลอโรพลาสต์ สารสี น้ำ เกลือแร่ และคาร์บอนไดออกไซด์

7.2.1 แสง (light) ช่วงแสงที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสงมีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 380-760 นาโนเมตร (nanometer ย่อเป็น nm) ซึ่งเป็นแสงช่วงเดียวกับกับที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้

7.2.2 คลอโรพลาสต์ (chloroplast) คือ ออร์แกเนลล์ของพืชที่เป็นแหล่งเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โครงสร้างประกอบด้วยเยื่อ 2 ชั้น เยื่อชั้นนอกเรียบ เยื่อชั้นในยื่นเข้าไปข้างใน มีลักษณะเป็นถุงกลมแบนคล้ายเหรียญเรียกว่า ไทลาคอยด์ (thylakoid) ไทลาคอยด์จำนวนมากมีการจัดเรียงตัวโดยวางซ้อนกันเป็นตั้งเรียกว่า กรานุ่ม (granum) แต่ละคลอโรพลาสต์มี 40-60 กรานุ่ม แต่ละกรานุ่มเชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างที่เรียกว่า สโตรมา ลาเมลลา (stroma lamella) ซึ่งจะพบเฉพาะในพืชชั้นสูง รอบ ๆ เยื่อไทลาคอยด์เป็นสารกึ่งเหลว (semifluid) เรียกว่า สโตรมา (stroma) ประกอบด้วย เอนไซม์ DNA RNA และไรโบโซม ทำให้คลอโรพลาสต์สามารถสร้างโปรตีนของตัวเองได้ในบางกรณี และสามารถแบ่งตัว (division) ได้ ไทลาคอยด์เป็นที่อยู่ของสารสีพวกคลอโรฟิลและสารสีประกอบอื่น ๆ โดยที่ผิวของไทลาคอยด์มีการจัดกลุ่มสารสีชนิดเดียวกันเป็นร่างแห เรียกว่า ระบบแสง (photosystem) (สกุล, ม.ป.ป.)

7.2.3 สารสีหรือรงควัตถุ (pigments) สารที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ คลอโรฟีลล์ซึ่งเป็นสารสีที่อยู่ที่ผนังเยื่อชั้นในเรียกว่าไทลาคอยด์ของคลอโรพลาสต์ คลอโรฟีลล์มี 4 ชนิดคือ ชนิดเอ (a) บี (b) ซี (c) และ ดี (d) สำหรับคลอโรฟีลล์ a นั้นมีในสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ทุกชนิด ส่วนคลอโรฟีลล์ชนิดอื่น ๆ จะพบในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ กัน เช่น ในพืชชั้นสูงและสาหร่ายสีเขียวจะพบคลอโรฟีลล์ b ในสาหร่ายสีแดงจะมีคลอโรฟีลล์ d ส่วนสาหร่ายน้ำตาลจะมีคลอโรฟีลล์ c

สารสีหรือรงควัตถุอย่างคลอโรฟีลล์จะทำหน้าที่ดึงพลังงานจากแสง โดยใช้อิเล็กตรอน (electron = e^-) เป็นผู้นำพลังงานนั้นเข้าสู่กระบวนการทางเคมี คลอโรฟีลล์ a จะดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่นแสงสีแดง โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 660 nm และแสงสีน้ำเงินที่ ความยาวคลื่น 440 nm ได้ดีมาก

คลอโรพลาสต์นอกจากจะมีคลอโรฟีลล์ a แล้วยังมีสารอื่น ๆ อีกด้วย เช่น ในพืชชั้นสูงจะพบคลอโรฟีลล์ b และยังมีสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoid)ซึ่งมีสีส้ม สีเหลือง เพราะประกอบด้วยสารสี 2 กลุ่ม คือ แคโรทีน (carotene) มีส้มแดง และแซนโทฟีลล์ (xanthophyll) ซึ่งมีสีน้ำตาล สารกลุ่มแคโรทีนอยด์นี้จะช่วยดึงพลังงานจากแสงแล้วส่งต่อให้กับคลอโรฟีลล์ และยังช่วยป้องกันแสงที่เข้มเกินไปไม่ให้ทำลายคลอโรฟีลล์ เพราะคลอโรฟีลล์จะสลายตัวได้ง่ายในที่มีแสงจัดเกินไป

7.2.4 คาร์บอนไดออกไซด์ พืชได้รับ CO_2 จากบรรยากาศซึ่งประกอบด้วยแก๊สต่างๆ หลายชนิด คือ แก๊สไนโตรเจนประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ แก๊สออกซิเจนประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือปริมาณเล็กน้อย เป็นแก๊ส CO_2 แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สนีออน (Ne) แก๊สฮีเลียม (He) โดยเฉพาะ CO_2นั้นปริมาณเพียง 0.03 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น CO_2 จะเคลื่อนผ่านเข้าทางปากใบ ผ่านช่องระหว่าเซลล์ ผ่านผนังเซลล์เข้าสู่เซลล์พาลิเสดและเซลล์สปองจี เข้าสู่ไซโทพลาซึมและในที่สุดจะเข้าสู่คลอโรพลาสต์ โดยอยู่ในรูปของ CO_2 ที่ละลายไปกับน้ำ เป็นคาร์โบเนต (carbonate) หรือไบคาร์โบเนต (bicarbonate) ในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตและกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโลกนี้ทำให้คิดว่าน่าจะมีปริมาณของ CO_2 เกิดขึ้นมากมาย แต่พืชก็สามารถควบคุมปริมาณของ CO_2 ไว้ได้ มีการทดลองให้ CO_2 แก่พืชเป็นปริมาณมากเพื่อเร่งอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง แต่ปรากฏว่ากลับเป็นผลเสียต่อพืชคือพืชมีอาการเหี่ยวเฉาลง

การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของพืช C_3 การตรึง CO_2 ในวัฏจักรคัลวินเกิดสารอินทรีย์ที่อยู่ตัวชนิดแรก คือ PGA ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน 3 อะตอม กับ 1 หมู่ฟอสเฟต จึงเรียกการตรึง CO_2 โดยวิธีนี้ว่า วิถี C_3 (C_3- pathway) และเรียกพืชพวกนี้ว่า พืช C_3 (C_3- plant) ในปฏิกิริยาต้องใช้เอนไซม์ ribulose bisphosphate carboxylase/oxygenase (rubisco) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์นี้นอกจากเร่งปฏิกิริยาการตรึง CO_2 ด้วย RuBP แล้วยังสามารถเร่งปฏิกิริยาการตรึง O_2 ด้วย RuBP ได้ด้วย ทำให้การตรึง CO_2 ของพืช C_3 หลายชนิดลดลง เนื่องจากมี O_2 แข่งขันกับ CO_2 ในการเข้ารวมกับ RuBP อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชจึงลดลง พืช C_3 ได้แก่ ข้าวเจ้า ข้าวบาร์เลย์ ถั่วและพืชทั่วไป

พืชบางชนิดมีกลไกเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ในสภาพแวดล้อมได้ด้วย 2 กลไกสำคัญ ได้แก่ กลไกการตรึงคาร์บอนด้วยการสังเคราะห์ด้วยแสงแบบ C_4 (C_4 Photosynthetic Carbon Fixation) และ กลไก crassulacean acid metabolism pathway (CAM)

กลไกการตรึงคาร์บอนด้วยการสังเคราะห์ด้วยแสงแบบ C_4 (C_4 Photosynthetic Carbon Fixation) ซึ่งพบในพืชเขตร้อนหลายชนิด ได้แก่ อ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และพืชตระกูลหญ้า

ข้อแตกต่างระหว่างพืช C_3 และ C_4 คือ

1) พืช C_4 สามารถตรึง CO_2 ได้ดีกว่าพืช C_3 มาก โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงจะมี CO_2 ต่ำ พืช C_4 จะเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ในเซลล์บันเดิลชีทได้

2) พืช C_4 สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงในสภาพความเข้มแสงมาก ๆ ได้ในขณะที่พืช C_3 สังเคราะห์ด้วยแสงได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มแสงที่จำกัด

3) พืช C_4 สังเคราะห์ด้วยแสงที่อุณหภูมิพอเหมาะ (optimum) ค่อนข้างสูง คือ 30-40 °C ในขณะที่พืช C_3 อยู่ที่ระดับอุณหภูมิประมาณ 25 °C

4) ปริมาณ O_2 ที่เพิ่มขึ้น (3-20 %) ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงขอพืช C_4 ลดลง แต่มีผลในพืช C_3

5) ในสภาพที่มีแสงจ้าและอุณหภูมิสูงจะมีผลต่อการหายใจด้วยแสง (photorespiration) ในพืช C_3 ทำให้มีการสลายคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์แสง กรณีเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นในพืช C_4

กลไก crassulacean acid metabolism pathway (CAM) พบในพืชทะเลทรายตระกูล crassulaceae เช่น กุหลาบหินและพืชในสกุลอื่น ๆ เช่น กระบองเพชร สับปะรด วานิลา และอากาเว่ ฯลฯ พืชทะเลทรายมีการปรับตัวโดยการลดรูปของปากใบ เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำและปากใบจะปิดในเวลากลางวัน เปิดเวลากลางคืน CO_2 จะเข้าสู่ใบทางปากใบไปที่เซลล์มีโซฟิล มีการตรึง CO_2 ด้วย phosphoenolpyruvic acid (PEP) ได้ oxaloacetic acid (OAA) และเปลี่ยนไปเป็นกรดมาลิก (Malic Acid) ไปเก็บสะสมไว้ในแวคิวโอล เมื่อเริ่มมีแสงในเวลากลางวันปากใบจะปิดและมีการเคลื่อนย้ายกรดมาลิกออกจากแวคิวโอลเพื่อทำปฏิกิริยาปล่อย CO_2 ออกจากกรดมาลิก (decarboxylation) เข้าสู่กระบวนการตรึง CO_2 ในวัฏจักรคัลวินตามปกติ

กระบวนการ CAM - pathway พืชจะปิดปากใบในเวลากลางวัน ทำให้มีความเข้มข้นของ CO_2 สูงมาก อัตราการหายใจจึงลดลงต่ำมากและการตรึง CO_2 ด้วย PEP เกิดในเวลากลางคืน เนื่องจากในเวลากลางวันมีแสง กรดมาลิกที่ปล่อยออกจากแวคิวโอลจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่กระตุ้นการตรึง CO_2 ด้วย PEP ส่วนในเวลากลางคืนไม่มีแสง กรดมาลิกจะไม่ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่กระตุ้นการตรึง CO_2 ด้วย PEP จึงทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากการตรึง CO_2 ด้วย PEP ของพืชบริเวณแห้งแล้ง หรือทะเลทราย พบครั้งแรกในพืชตระกูล crassulaceae จึงเรียกพืชพวกนี้ว่า crassulacean acid metabolism plant หรือ พืช CAM

7.2.5 น้ำ พืชได้รับน้ำจากดิน โดยรากดูดซึมน้ำเข้ามา และลำเลียงส่งต่อจากรากสู่ลำต้นและใบตามลำดับ โดยผ่านทางเนื้อเยื่อไซเลม โมเลกุลของน้ำถูกส่งออกทางปลายสุดของเส้นใบ ทำให้เข้าสู่เซลล์มีโซฟีลล์ของใบเพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แสงต่อไป ซึ่งอาจมีน้ำบางส่วนเสียออกไปโดยการคายน้ำ

7.2.6 เกลือแร่ พืชดูดซึมเกลือแร่จากดินแล้วนำมาใช้ในการสร้างโมเลกุลของสารสำคัญ เช่น คลอโรฟีลล์ จากสูตรทั่วไปของคลอโรฟีลล์ a คือ C_{55} H_{72} O_5 N_4 Mg และคลอโรฟีลล์ b ซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น C_{55} H_{70} O_6 N_4 Mg จะเห็นว่ามีธาตุที่สำคัญคือ N และ Mg ซึ่งพืชได้รับจากเกลือแร่ในดิน และธาตุที่สำคัญอีกธาตุหนึ่งคือธาตุเหล็ก ถ้าไม่มีเหล็กพืชก็จะไม่สามารถสร้างคลอโรฟีลล์ได้ ส่วนธาตุทองแดงก็มีความสำคัญเพราะเป็นองค์ประกอบของพลาสโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่สำคัญชนิดหนึ่ง

7.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสง

7.3.1 แสงสว่าง (light) อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ช่วงคลื่นแสงและระยะเวลาการได้รับแสง เช่น ความเข้มของแสงน้อยเป็นปัจจัยจำกัดของการสังเคราะห์แสง การเพิ่มความเข้มของแสงจึงทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพืชได้รับแสงที่มีความเข้มมากเป็นเวลานานเกินไป จะทำให้การสังเคราะห์แสงหยุดลงได้ เนื่องจากคลอโรฟิลถูกกระตุ้นมากเกินไป และออกซิเจนที่เกิดขึ้นถูกใช้ไปในกระบวนการหายใจด้วยแสง (photorespiration) ซึ่งมีการสลายโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรต ทำให้สูญเสียคาร์บอน อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงไม่ตอบสนองต่อแสง

7.3.2 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไม่มีผลในช่วงเวลาที่มีแสงมาก แต่ในสภาวะที่มี CO_2 มากแต่แสงน้อย อัตราการสังเคราะห์แสงจะน้อย

7.3.3 อุณหภูมิ (temperature) พืชจะมีการสังเคราะห์แสงได้ดีที่อุณหภูมิพอเหมาะ (optimum temperature) คือ 30-35 °C ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป เช่น 60 °C เอนไซม์จะไม่ทำงาน เนื่องจากโปรตีนเสียสภาพ ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป เอนไซม์จะทำงานไม่ดีเท่าที่ควร การแพร่ของ CO_2 เข้าสู่ใบเกิดช้ามาก นอกจากนี้ยังมีผลทางอ้อม คือ อุณหภูมิสูงอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น อัตราการสังเคราะห์แสงจะลดลง เพราะมีการสลายโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตไปใช้ในการหายใจ

7.3.4 เกลือแร่ ธาตุไนโตรเจน และแมกนีเซียมของเกลือในดิน มีความสำคัญต่ออัตราการสังเคราะห์แสง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิล ถ้าขาดจะมีผลต่อการสร้างคลอโรฟิล ธาตุเหล็กแม้ไม่ใช่องค์ประกอบของคลอโรฟิลโดยตรงแต่ก็มีผลต่อการสร้างคลอโรฟิล ซึ่งขาดไม่ได้เช่นกัน

7.3.5 ธรรมชาติของใบพืช

1) ใบของพืชมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการรับแสง และแลกเปลี่ยนแก๊ส เริ่มตั้งแต่เซลล์ชั้นนอกสุด คือ เอพิเดอร์มิส จะปล่อยให้แสงส่องผ่านไปในใบได้ โดยเฉพาะใบพืชพื้นป่าเขตร้อน เอพิเดอร์มิสจะมีลักษณะคล้ายเลนส์นูน ซึ่งรวมแสงให้มีความเข้ม แสงที่ผ่านไปที่คลอโรฟิลจึงมีความเข้มมากกว่าแสงนอกใบ ชั้นมีโซฟิล มีเซลล์พาลิเสด ลักษณะเป็นแท่งตั้ง จะดูดแสงส่วนหนึ่งโดยใช้สารสีต่าง ๆ ในคลอโรพลาสต์ แสงส่วนที่เหลือจะผ่านเข้าสู่ช่องว่างในเซลล์สปันจี ซึ่งมี

รูปร่างหลายแบบ ในช่องว่างที่มีน้ำและอากาศจะช่วยให้แสงสะท้อนจากรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศไปหลายทิศทาง โอกาสการดูดแสงของเซลล์สปันจีมีเพิ่มขึ้น พืชที่อยู่บริเวณแสงมากจนอาจเป็นอันตราย จะมีโครงสร้างพิเศษ เพื่อป้องกันการได้รับแสงมาก เช่น มีขน มีชั้นไขมันเคลือบ ช่วยในการสะท้อนกลับของแสง เป็นต้น

2) ใบพืชควบคุมการรับแสงโดยการเคลื่อนที่ของคลอโรพลาสต์ในเซลล์และการเคลื่อนไหวของใบ พืชพวกถั่วและฝ้ายสามารถเคลื่อนใบตามแสงอาทิตย์ทำให้ได้รับแสงมาก โดยเฉพาะช่วงเวลาเช้าและเย็น ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศมีความชื้นและอุณหภูมิต่ำกว่าตอนเที่ยงวัน ในขณะที่พืชบางชนิดมีการเคลื่อนใบหลบหลีกแสงอาทิตย์ เพื่อลดการได้รับแสงมาก ซึ่งมักเป็นกับพืชบริเวณขาดน้ำ

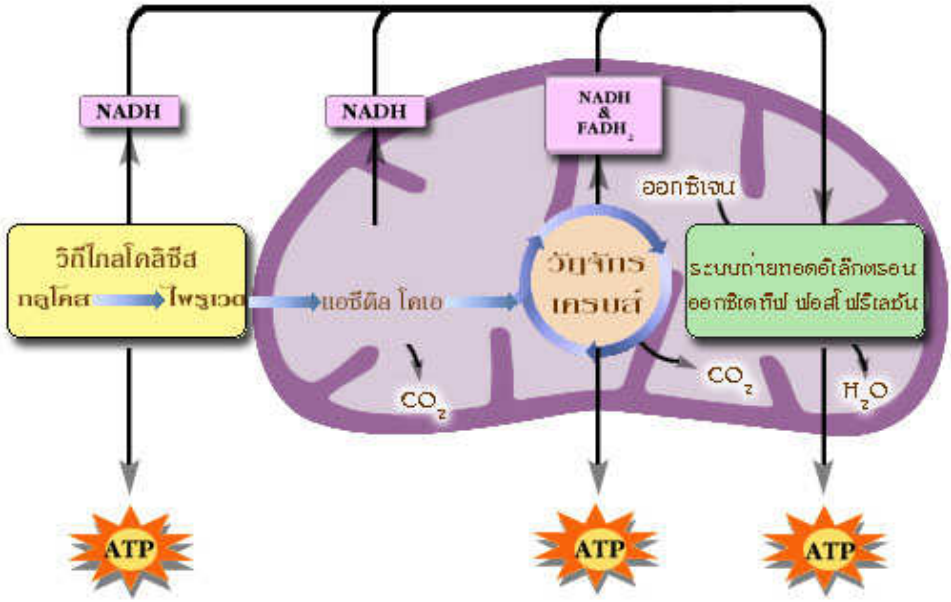
3) พืชมีการปรับตัวทั้งเซลล์ใบและลำต้น โดยพืชที่อยู่ในที่มีแสงน้อย มักมีใบหนาเพื่อเพิ่มชั้นเซลล์

4) การจัดโครงสร้างของเรือนพุ่ม โดยจัดเรียงตัวของใบ ลำต้น กิ่ง และก้านใบให้สามารถแข่งขันเพื่อรับแสง เช่น ใบมะละกอ มีก้านใบยาว และจัดเรียงตัวรอบลำต้น จึงทำให้ใบทุกใบได้รับแสงเต็มที่

8. การหายใจ (respiration)

กระบวนการหายใจคือ การสลายอาหารที่สร้างจากกระบวนสังเคราะห์แสง เพื่อนำพลังงานที่แฝงอยู่ในโมเลกุลของอาหารมาใช้ในการดำรงชีวิต การสลายสารอาหารถูกควบคุมโดยเอนไซม์อย่างมีระบบ ทำให้พลังงานค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาในรูปของ ATP (adenosine tri phosphate) โดยไม่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงเกินไป พืชหายใจโดยให้แก๊สออกซิเจนเช่นเดียวกับสัตว์สูงทั่วไป โดยดูดซึมแก๊สออกซิเจนเข้าทางปากใบหรือตามผิวของอวัยวะ เช่น ราก ฯลฯ แก๊สออกซิเจนจะผ่านเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในกระบวนการหายใจซึ่งเกิดขึ้นที่ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) กระบวนการหายใจเพื่อสลายอาหารในพืชเพื่อให้ได้พลังงานนั้นมี 2 แบบ คือ กระบวนการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจนและกระบวนการสลายอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (กนกวรรณ, 2551)

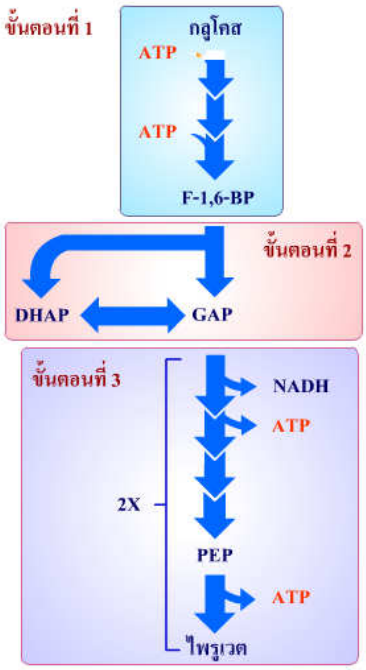
8.1 กระบวนการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) เป็นการสลายสารอาหารโดยเบื้องต้น โดยการสลายจากกลูโคสเป็นพลังงาน ATP กระบวนหายใจแบบใช้ O_2 ของพืชชั้นสูงมีความซับซ้อน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนที่สำคัญคือ การสลายกลูโคส วัฏจักรเครบส์ และการถ่ายทอดอิเล็กตรอน



ภาพที่ 4.5 กระบวนการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจน
ที่มา: www.bs.ac.th

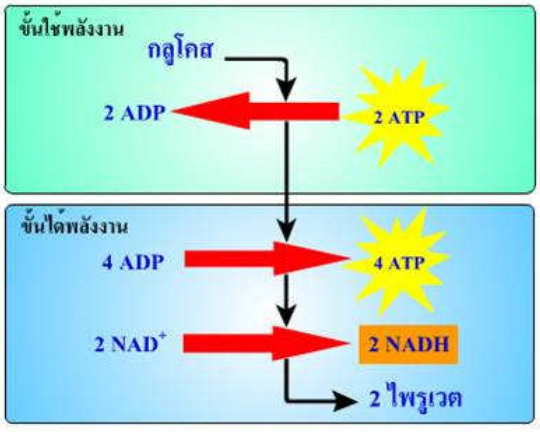
8.1.1 การสลายกลูโคส (glycolysis) หรือ วิถีไกลโคลิซีส หรือ วิถี Embden-Myerhof-Panas Pathway (EMP Pathway) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในไซโตซอล มีหลายขั้นตอนโดยในแต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์ต่างๆ มาเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเริ่มจากการที่กลูโคสถูกออกซิไดส์ สุดท้ายได้ไพรูเวทเอทีพีและเอ็นเอดีเอช (pyruvate ATP &) วิถีไกลโคลิซิสแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ (ภาพที่ 4.6) หากแบ่งตามการใช้และได้พลังงานแบ่งเป็น 2 ขั้น (ภาพที่ 4.7) และการแบ่งอย่างละเอียดมี 10 ขั้นตอน (ภาพที่ 4.8)

NADH = nicotinamide adenine dinucleotide
FADH = flavin adenine dinucleotide



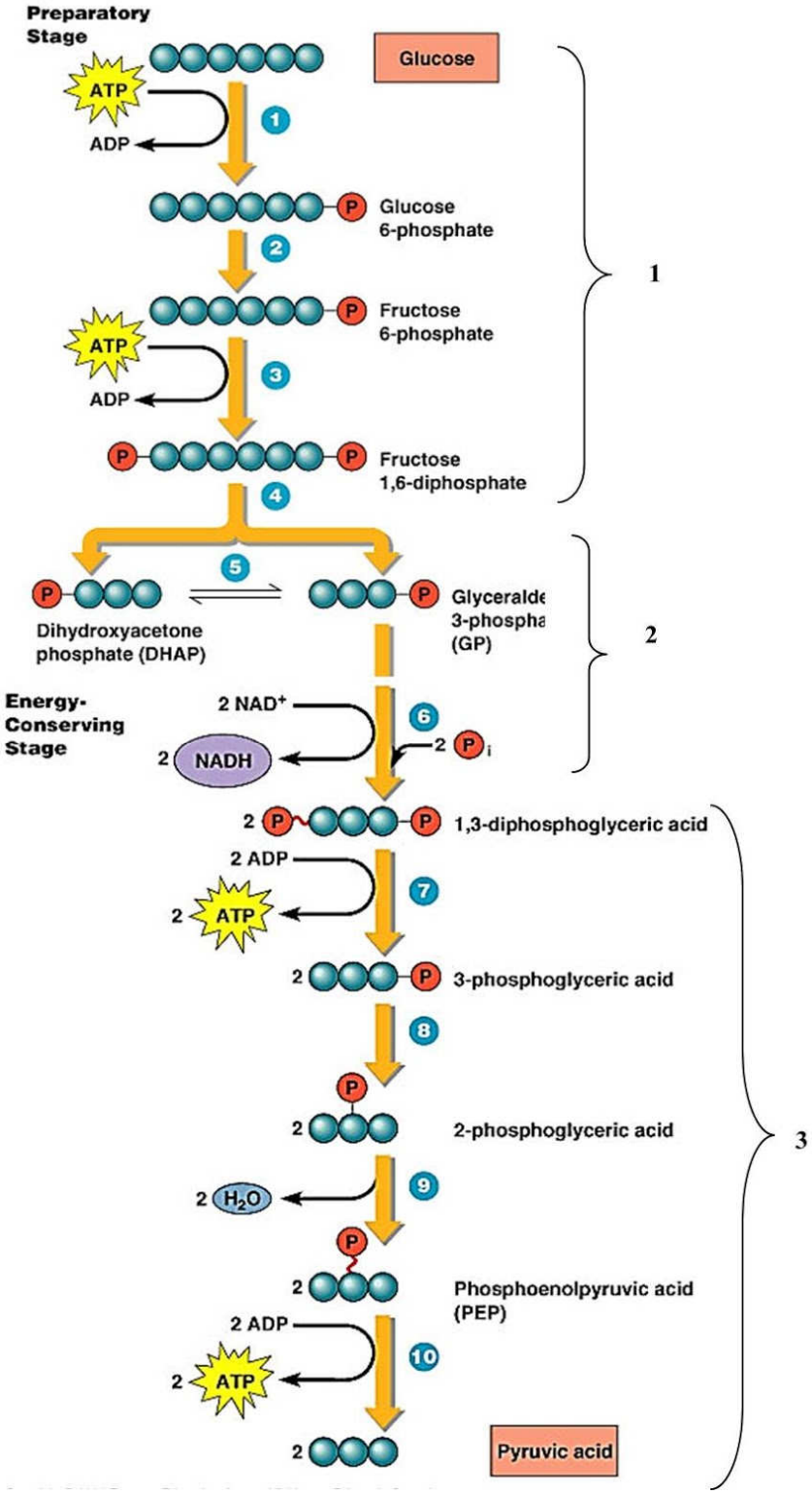
ภาพที่ 4.6 วิถีไกลโคลิซีส 3 ขั้นตอน
ที่มา: sites.google.com

ภาพที่ 4.6 วิถีไกลโคลิซีส 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ เริ่มจากขั้นตอนที่ 1 เติมพลังงาน ATP 2 โมเลกุลให้กับน้ำตาลกลูโคส ขั้นตอนที่ 2 เปลี่ยนน้ำตาลที่มี 6 คาร์บอน ให้เป็น น้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม หรือที่เรียกว่าไตรโอสฟอสเฟต (triose phosphate) จำนวน 2 ตัว (ในที่นี้คือ GAP และ DHAP) และขั้นตอนที่ 3 เป็นการออกซิเดชันของไตรโอสฟอสเฟตให้เป็นไพรูเวต และได้ ATP



ภาพที่ 4.7 พลังงานที่ใช้ไปและพลังงานที่ได้กลับมาจากวิถีไกลโคลิซีส
ที่มา: 1.bp.blogspot.com

DHAP = dihydroxyacetone phosphate
ATP = adenosine tri phosphate
ADP = Adenosine diphosphate
NAD+ = nicotinamide adenine dinucleotide phoshate



ภาพที่ 4.8 วิถีไกลโคลิซิสอย่างละเอียด
ที่มา: mamagrcthai2.blogspot.com

วิถีไกลโคลิซิสอย่างละเอียด 10 ขั้นตอน (www.bs.ac.th และ www.il.mahidol.ac.th) ดังแสดงในภาพที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กลูโคสเข้าไปในเซลล์ และถูกเติมหมู่ฟอสเฟต กลายเป็น กลูโคส-6-ฟอสเฟต (glucose-6-phosphate) โดยเอนไซม์เฮกโซไคเนส (hexokinase)

ขั้นตอนที่ 2 กลูโคส-6-ฟอสเฟต เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็น ฟรุคโตส-6-ฟอสเฟต (fructose-6-phosphate) โดยเอนไซม์ ฟอสโฟกูลโค ไอโซเมอเรส (phosphogluco isomerase)

ขั้นตอนที่ 3 ในขั้นตอนนี้เป็นการเติมหมู่ฟอสเฟตให้แก่ฟรุคโตส-6-ฟอสเฟต กลายไปเป็นฟรุคโตส-1,6-บิสฟอสเฟต (fructose-1,6-bisphosphate) ปฏิกิริยานี้เร่งโดยเอนไซม์ฟอสโฟฟรุคโต ไคเนส (phosphofructo kinase)

ขั้นตอนที่ 4 ฟรุคโตส-1,6-บิสฟอสเฟต (มี 6 คาร์บอนอะตอม) แตกออกเป็น 2 โมเลกุล ที่มี 3 คาร์บอนอะตอม คือกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต (glyceraldehyde-3-phosphate) และไดไฮดรอกซีอะซิโตนฟอสเฟต (dihydroxyacetone phosphate) โดยใช้เอนไซม์อัลโดเลส (aldolase) น้ำตาล 2 โมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้เป็น isomer ซึ่งกันและกัน

ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นไปพร้อมกับขั้นที่ 4 คือ ไดไฮดรอกซีอะซิโตนฟอสเฟตจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟตโดยใช้เอนไซม์ไตรโอสฟอสเฟตไอโซเมอเรส (triose phosphate isomerase) น้ำตาล 2 ตัวนี้ จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมาได้

ขั้นตอนที่ 6 กลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต เปลี่ยนไปเป็น 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรต (1,3-bisphosphoglycerate) โดยเอนไซม์กลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase) ในขั้นนี้จะได้ NADH 1 โมเลกุล

ขั้นตอนที่ 7 ขั้นตอนนี้ 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรต ซึ่งเป็นสารพลังงานสูงที่สามารถให้หมู่ฟอสเฟต (ที่จับอยู่กับหมู่คาร์บอนิล) แก่ตัวรับ คือ ADP โดยเอนไซม์ ฟอสโฟกลีเซอเรต ไคเนส (phosphoglycerate kinase) จะเร่งปฏิกิริยาการโยกย้ายหมู่ฟอสเฟตจาก 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรตไปให้ ADP ได้เป็น ATP และ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-phosphoglycerate)

ขั้นตอนที่ 8 เป็นการโยกย้ายตำแหน่งของหมู่ฟอสเฟตของ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต โดยย้ายจากตำแหน่งที่ 3 ไปเป็นตำแหน่งที่ 2 ได้เป็น 2-ฟอสโฟกลีเซอเรต (2-phosphoglycerate) ปฏิกิริยานี้เร่งโดยเอนไซม์ฟอสโฟกลีเซอเรต มิวเตส (phosphoglycerate mutase)

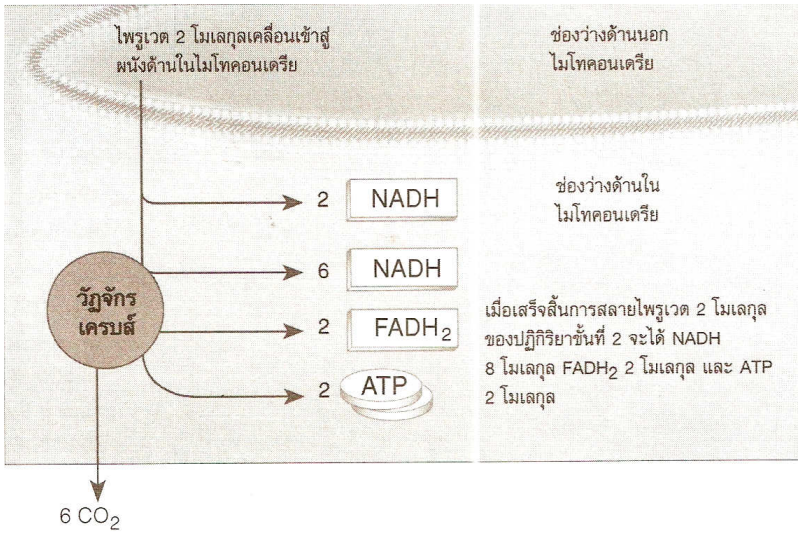
ขั้นตอนที่ 9 ในขั้นตอนนี้ 2-ฟอสโฟกลีเซอเรต จะเสีย H_2O ไป 1 โมเลกุล กลายเป็นฟอสโฟอีนอลไพรูเวต (phosphoenolpyruvate) ปฏิกิริยานี้เร่งโดยเอนไซม์อีนอลเลส (enolase)

ขั้นตอนที่ 10 เป็นขั้นสุดท้ายของวิถีไกลโคลิซีส เป็นการสร้าง ATP โดย ฟอสโฟอีนอลไพรูเวต จะให้หมู่ฟอสเฟตแก่ ADP ได้เป็น ATP แล้ว ตัวเองเปลี่ยนไปเป็นไพรูเวต ปฏิกิริยานี้เร่งโดยเอนไซม์ ไพรูเวต ไคเนส (pyruvate kinase)

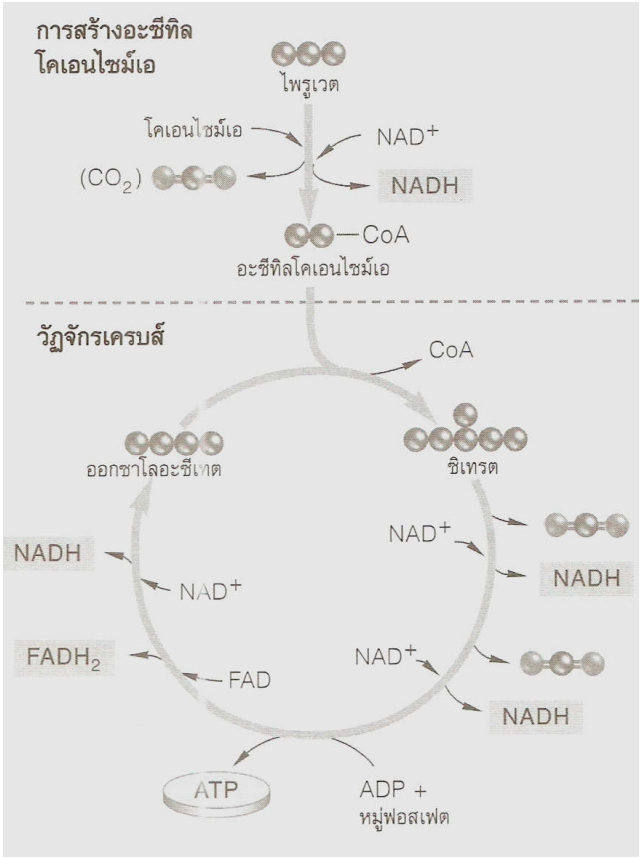
8.1.2 วัฏจักรเครบส์ (krebs cycle) หรือ วัฏจักรกรดซิทริก (citric acid cycle) หรือ วัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก (tricarboxylic acid cycle) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในไมโทคอนเดรีย โดยไพรูเวทที่ได้จากกระบวนการสลายกลูโคสเคลื่อนไปยังไมโทคอนเดรีย (mitochondria) อะซีทิลโคเอ็นไซม์แต่ละโมเลกุลจะเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ โดยการถ่ายทอดหมู่อะซีทิล (acetyl group) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 2 อะตอม ให้แก่ ออกซาโลอะซีเทต

(oxaloacetate) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 6 อะตอม คือ กรดกรดซิทริกหรือซิเทรต เมื่อเกิดปฏิกิริยาในวัฏจักรเครบส์ครบ 2 รอบ ก็จะทำให้ไพรูเวต 2 โมเลกุลสลายตัวอย่างสมบูรณ์ กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยมีการสร้าง ATP 2 โมเลกุลและมีการสร้าง NADH เพิ่มขึ้นอีก 6 โมเลกุล และ $FADH_2$ 2 Fโมเลกุล เมื่อรวมกับ NADH 2 โมเลกุลที่ได้จากปฏิกิริยาการสร้างอะซีทิลโคเอ็นไซด์เอ จึงได้โคเอ็นไซม์ที่เป็นแหล่งเก็บอิเลคตรอนพลังงานสูงและไฮโดรเจนอยู่ทั้งหมด 10 โมเลกุล ซึ่งจะนำไปสร้างพลังงานให้แก่เซลล์ต่อไป (กนกวรรณ, 2551 และ Starr, 2554)

ปฏิกิริยาในวัฏจักรเครบส์ 2 รอบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอีก 4 โมเลกุล ดังนั้นในขั้นตอนที่ 2 ของการหายใจแบบใช้ออกซิเจน คาร์บอน 6 อะตอมในไพรูเวต 2 โมเลกุล จึงถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6 โมเลกุล (ภาพที่ 4.9 และ 4.10) ดังนั้นเมื่อถึงขั้นนี้น้ำตาลกลูโคสได้สลายตัวอย่างสมบูรณ์ คาร์บอนทั้ง 6 อะตอมถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกาซคาร์บอนไดออกไซด์ (Starr, 2554)



ภาพที่ 4.9 จำนวน ATP และ โคเอ็นไซม์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่สองของการหายใจแบบใช้ออกซิเจน
ที่มา: Starr (2554)



ภาพที่ 4.10 ขั้นตอนที่สองของการหายใจแบบใช้ออกซิเจน: ปฏิกิริยาการสร้างอะซีทิลโคเอ็นไซด์เอและวัฏจักรเครบส์
ที่มา: Starr (2554)

8.1.3 การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transfer) กระบวนการนี้เกิดขึ้นในผนังชั้นในของไมโทคอนเดีย (mitochondria wall) หรือผนังคริสตี (cristae wall) โดยพืชเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนที่เซลล์ที่ได้จาก TCA cycle ในรูปของ NADH และ $FADH_2$ ไปเก็บพลังงานไว้ใน ATP โปรตีนที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดอิเล็กตรอนจัดเป็นโปรตีนเชิงซ้อน (protein complex) ต่าง ๆ ฝังอยู่บริเวณเยื่อหุ้มชั้นในของไมโตคอนเดรีย โดยโปรตีนเชิงซ้อนเหล่านี้จะทำหน้าที่ส่งต่ออิเล็กตรอนเป็นทอด ๆ และนำพลังงานส่วนต่างที่ลดลงในแต่ละชั้นมาใช้ในการนำโปรตรอนจากเมตริก (matrix) ของไมโตคอนเดรียเข้าสู่ช่องว่างระหว่างชั้นนอกและชั้นใน (intermembrane space) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าของโปรตอน (proton gradient) ระหว่าง matrix และ intermembrane space พลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาใช้ในการสร้าง ATP ด้วยวิธีนี้ เรียกว่า oxidative phosphorylation ซึ่งใช้หลักการของกลไก chemiosmotic mechanism ส่วนตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายคือ ออกซิเจน เมื่อรวมตัวกับโปรตรอนในเมตริก (matrix) จะได้น้ำ (H_2O)

8.2 กระบวนการสลายอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) กรณีที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะรับอิเล็กตรอนจากกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ทำให้สารนำอิเล็กตรอนคือ NADH และ $FADH_2$ ไม่สามารถถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปให้กับตัวรับอิเล็กตรอน จึงไม่เกิดศักย์ไฟฟ้าของโปรตอนและไม่สามารถสร้าง ATP ได้ ทำให้ขาด NAD^+ และ FAD^+ กระบวนการหายใจจึงถูกยับยั้ง ดังนั้นเซลล์จึงมีกระบวนการที่สามารถเปลี่ยน NADH ให้เป็น NAD^+ทำให้ glycolysis สามารถดำเนินต่อไปได้ และมีการสร้าง ATP ได้ กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการสลายอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือกระบวนการหมัก (fermentation) กระบวนการหมักอาจเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ การเปลี่ยนไพรูเวทให้เป็นกรดแลคติค (lactic acid) โดยการทำงานของเอ็นไซม์แลคเตต ดีไฮโดรจีเนส (lactate dehydrogenase) หรือการเปลี่ยนไพรูเวทให้เป็นเอทิลอัลกอฮอล์ (ethyl alcohol) และคาร์บอนไดออกไซม์ 1 โมเลกุล โดยการทำงานของเอ็นไซม์ pyruvate decarboxylase และ alcohol dehydrogenase ในสภาวะที่พืชประสบปัญหาออกซิเจนไม่เพียงพอ เช่น น้ำท่วม รากพืชอาจขาดออกซิเจน โดยทั่วไปจะเป็นการหมักที่เกิดการสร้างอัลกอฮอล์มากกว่าการหมักที่สร้างกรดแลกติก โดยคาดว่าอัลกอฮอล์มีความเป็นพิษต่อเซลล์พืชน้อยกว่ากรดแลคติค

9. สรุป

กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในพืชได้แก่ การดูดน้ำ การดูดแร่ธาตุอาหาร การลำเลียงน้ำ การลำเลียงแร่ธาตุอาหาร การลำเลียงอาหาร การคายน้ำ การสังเคราะห์แสงและการหายใจ ซึ่งพืชดูดน้ำจากรากขึ้นสู่ส่วนต่างๆ บริเวณที่มีการดูดน้ำมากที่สุดคือ บริเวณขนราก (root hair zone) โดยวิธีการดูดน้ำมีทั้งใช้พลังงานและไม่ใช้พลังงาน ส่วนการดูดธาตุอาหารส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไอออนทั้งประจุบวกและลบ และมีอัตราการดูดเร็วไม่เท่ากัน การลำเลียงน้ำจะมีทิศทางขึ้นสู่เบื้องบน โดยผ่านเข้าในเซลล์เวสเซลเมมเบอร์ การลำเลียงน้ำทางไซเล็มอาจมีแรงดันราก แรงดึงแคพิลลารี และแรงดึงจากการคายน้ำมาช่วย ส่วนการลำเลียงแร่ธาตุอาหารนั้นจะลำเลียงผ่านเนื้อเยื่อไซเล็มไปพร้อมกับน้ำ สำหรับการลำเลียงอาหารจะลำเลียงผ่านเนื้อเยื่อโพลเอ็มและใช้แรงดันในการขับเคลื่อนสูงมาก การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปในรูปของไอน้ำทางปากใบ การคายน้ำของพืชเกิดบริเวณ ปากใบ ผิวใบ และรอยแตกของลำต้น ส่วนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีกระบวนการ 3 ขั้น คือ จับพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้สร้างสารเก็บพลังงานและใช้ ATP เป็นพลังงานในการสร้างเนื้อเยื่อพืช กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ กระบวนการหายใจคือ การสลายอาหารที่สร้างจากกระบวนสังเคราะห์แสง เพื่อนำพลังงานที่แฝงอยู่ในโมเลกุลของอาหารมาใช้ในการดำรงชีวิต กระบวนการหายใจเพื่อสลายอาหารในพืชเพื่อให้ได้พลังงานนั้นมี 2 แบบ คือ กระบวนการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจนและกระบวนการสลายอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน

คำถามวัดการเรียนรู้

1. พืชมีวิธีการดูดน้ำอย่างไรบ้าง
2. การดูดแร่ธาตุอาหารของพืชเป็นอย่างไร
3. การลำเลียงน้ำทางไซเล็มจำเป็นต้องอาศัยแรงใดมาช่วยบ้าง จงอธิบาย
4. จงอธิบายการลำเลียงแร่ธาตุอาหารพืช
5. จงอธิบายวิถีไกลโคลิซิส (glycolysis) ตามความเข้าใจของท่าน
6. อัตราการคายน้ำของพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยใดบ้าง
7. จงอธิบายทฤษฎีและสรุปปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง
8. สิ่งที่จำเป็นในการสังเคราะห์แสงของพืชมีอะไรบ้าง
9. พืชชั้นสูงมีกระบวนการหายใจอย่างไร

บทที่

5

การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช

ประเด็นสาระ

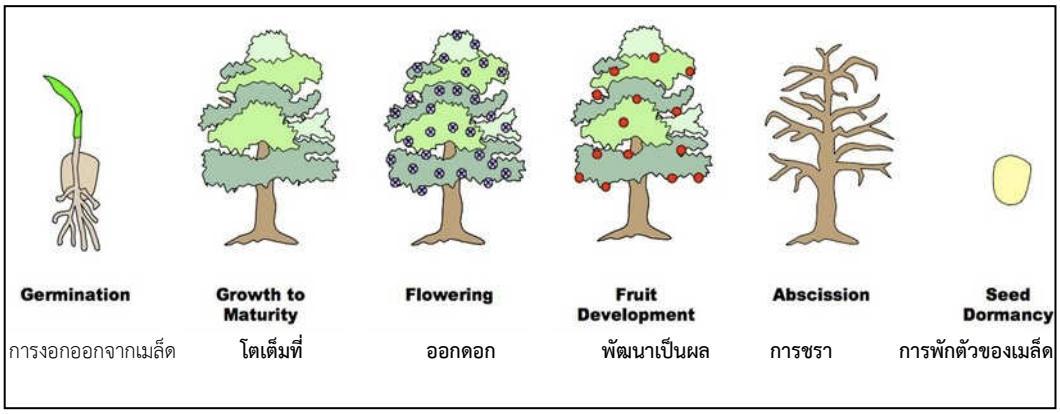
แนวคิด

1. นิยามการเจริญเติบโตของพืช
2. นิยามการพัฒนาการของพืช
3. วงจรการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช
   3.1 การเจริญเติบโตและพัฒนาการทางลำต้น
   3.2 การเติบโตและพัฒนาการทางการสืบพันธุ์
4. สรุป

คำถามวัดการเรียนรู้

แนวคิด

การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชเริ่มตั้งแต่การงอกออกจากเมล็ดและมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา สัณฐานวิทยาและชีวเคมีอย่างต่อเนื่องและเป็นลำดับ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นตั้งแต่ระดับเซลล์และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับเนื้อเยื่อ อวัยวะและส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืช เพื่อเกิดเป็นต้นอ่อน เมื่อพืชโตเต็มที่มีการออกดอก ติดผล สุกแก่ จากนั้นพืชชราลง จนถึงระยะที่ต้นพืชตาย การเปลี่ยนแปลงและพัฒนาการของพืชจะดำเนินไปเช่นนี้เป็นวัฏจักรหรือเรียกว่าวงจรชีวิตของพืช (life cycle)



ภาพที่ 5.1 การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช
ที่มา : http://www.vce.bioninja.com.au/_Media/plant_hormones_med.jpeg

1. นิยามการเจริญเติบโตของพืช (definition of plant growth)

การเจริญเติบโตของพืช หมายถึง การเพิ่มขนาดของอวัยวะและชิ้นส่วนพืชแต่ละส่วน หรือการแบ่งเซลล์ การเพิ่มจำนวนเซลล์และการขยายขนาดของเซลล์พืช ซึ่งการเจริญเติบโตของพืชโดยทั่วไปเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับกระบวนการสร้าง การเผาผลาญอาหาร และการใช้พลังงานของพืช (Tangpu, 2011)

2. นิยามการพัฒนาการของพืช (definition of plant development)

การพัฒนาการของพืช หมายถึง สิ่งที่เกิดขึ้นเป็นลำดับ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาหรือช่วงอายุของพืช ซึ่งรวมถึงการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนสภาพ คือมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนารูปร่าง โครงสร้างหรือส่วนประกอบของเซลล์จากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่เฉพาะที่แตกต่างกันออกไป (ลิลลี่และคณะ, 2552)

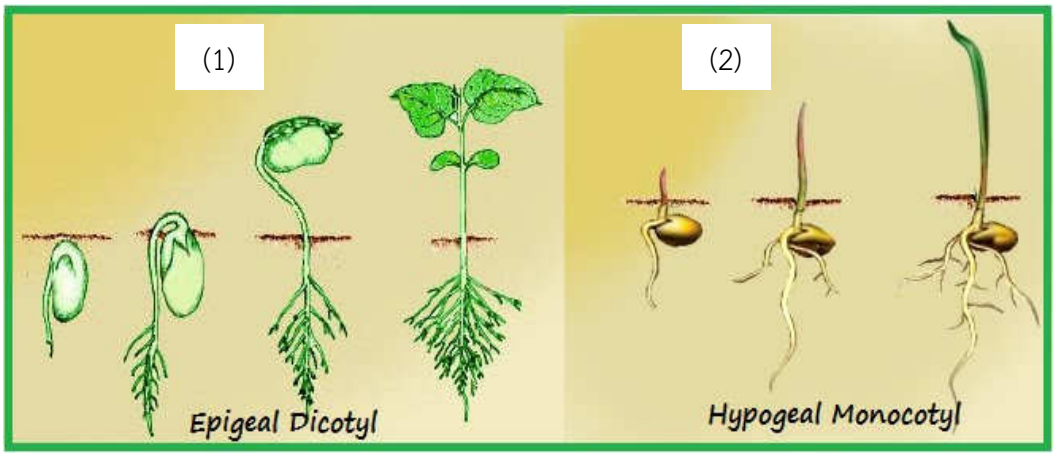
3. วงจรการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช (life cycle of plant growth and development)

การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชตลอดชีพจักร (life cycle) นั้น พืชต้องผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่พืชงอกจากเมล็ด ไปเป็นต้นกล้า (seedling) และพัฒนาการไปเป็นต้นพืช (plant) โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นหลังสิ้นสุดกระบวนการกำเนิดเอ็มบริโอ (embryo) และการสร้างเมล็ด ซึ่งจะแบ่งการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชออกเป็น 2 ช่วงคือ การเจริญเติบโตและพัฒนาการทางลำต้น และการเจริญเติบโตและพัฒนาการทางสืบพันธุ์

3.1 การเจริญเติบโตและพัฒนาการทางลำต้น (growth and development of the vegetative parts) พืชมีการเจริญเติบโตและพัฒนาการทางลำต้นอย่างต่อเนื่องตลอดอายุ โดยสร้างโครงสร้างใหม่ตลอดเวลา ลำต้นสร้างข้อและปล้องที่มีใบและตาข้างและพัฒนาเติบโตไปเป็นกิ่ง ส่วนรากมีการขยายตัวเพิ่มความยาว เกิดรากแขนงและรากขนอ่อน ต้นพืชมี

การเพิ่มขนาดโดยมีรูปแบบของโครงสร้างเพื่อการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น เรียกว่า phytomers (ลิลลี่และคณะ, 2552) กระบวนการสำคัญในขั้นการเจริญเติบโตในส่วนลำต้น ใบและราก คือ การแบ่งเซลล์ การขยายขนาดของเซลล์และช่วงต้นของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและหน้าที่ของกลุ่มเซลล์ (สังคม, 2547) การเจริญเติบโตและพัฒนาการในช่วงนี้ นับตั้งแต่พืชเริ่มงอกออกจากเมล็ดไปจนถึงเริ่มมีตาดอก โดยการเจริญเติบโตทางลำต้นระยะต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1.1 การงอกของเมล็ด (seed germination) เป็นการเริ่มต้นการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช เมื่อเมล็ดอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมคือ ได้รับความชื้นสูงถึงประมาณ 30-60% เพื่อทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดอ่อนตัวลงและน้ำสามารถผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ ปริมาณออกซิเจนมากกว่า 20 % หรือพืชบางชนิด เช่น ข้าว (*oryza sativa*) เมล็ดปรับตัวงอกในน้ำและมีอัตราการงอกดีในสภาพที่มีออกซิเจนต่ำกว่า 8 % สำหรับอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดคือ พืชบางชนิดจะมีอัตราการงอกลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง พืชบางชนิดจะมีอัตราการงอกลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พืชบางชนิดต้องการอุณหภูมิสลับ เช่น ถั่วเหลืองงอกได้ดีที่สุดเมื่ออุณหภูมิสลับ 30 $^{\circ}$C กับ 20 $^{\circ}$C เป็นเวลา 8 กับ 16 ชั่วโมง และเมล็ดพืชบางชนิดต้องการแสงในการงอกโดยทั่วไปเมื่อสภาพภายในเมล็ดพร้อมก็จะงอกทันทีที่มีน้ำ ออกซิเจนและอุณหภูมิที่เหมาะสม (ลิลลี่และคณะ, 2552) การงอกของต้นกล้ามี 2 แบบ คือ การงอกของเมล็ดแบบยกใบเลี้ยงโผล่พ้นวัสดุเพาะ (epigeal germination) พืชที่มีการงอกแบบนี้ เช่น ถั่วเขียว หัวหอมใหญ่ ทานตะวัน ฯลฯ และ การงอกแบบไม่ยกใบเลี้ยงโผล่พ้นวัสดุเพาะ (hypogeal germination) พืชที่มีการงอกแบบนี้ เช่น ข้าวโพด มะพร้าว ข้าว ฯลฯ



ภาพที่ 5.2 การงอกของเมล็ด (1) แบบยกใบเลี้ยงโผล่พ้นวัสดุเพาะของพืชใบเลี้ยงคู่ และ (2) แบบไม่ยกใบเลี้ยงโผล่พ้นวัสดุเพาะของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

ที่มา : http:// 1.bp.blogspot.com/_4IwHTsRufBg/S8jr1_cRQI/AAAAAAAAC8M/P6SzpUPNo0E/s1600/biji+monokotil+dan+dikotil.bmp

3.1.2 การพักตัวของเมล็ด (seed dormancy) เป็นสภาพที่เมล็ดไม่งอกแม้มีปัจจัยทางสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เหมาะสมในการงอก ซึ่งสาเหตุของการพักตัวเกิดจาก สภาพทางกายภาพและสภาพทางสรีระ

1) การพักตัวเนื่องจากสภาพทางกายภาพหรือโครงสร้าง(physical dormancy) เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพภายนอกของเมล็ดไม่เหมาะสม เช่น เปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat) หนาหรือแข็งเกินไป หรือเยื่อหุ้มเมล็ดเหนียวหรือเป็นมัน ทำให้น้ำและอากาศไม่อาจผ่านเข้าไปในเมล็ด การแก้ไขการพักตัว ทำได้โดยการทำลายเปลือกเมล็ด การทำบาดแผลให้กับเปลือกเมล็ด (scarification) ด้วยการฝนให้เปลือกบางลง การทุบเปลือกเมล็ดให้แตกออก การเจาะรู หรือตัดปลาย การแช่เมล็ดในกรดหรือในน้ำร้อน การใช้กรดกำมะถัน ฯลฯ

2) การพักตัวเนื่องจากสภาพทางสรีระ (physiological dormancy) เกิดขึ้นเนื่องจากภายในเมล็ดมีสารยับยั้งการงอกหรือมีสารยับยั้งการเจริญเติบโตอยู่มากเกินไป ซึ่งสารเหล่านี้จะไปขัดขวางขบวนการงอกของเมล็ด นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากเนื้อเยื่อของเมล็ด เช่น เอ็มบริโอเจริญเติบโตหรือพัฒนาไม่เต็มที่ การแก้ไขการพักตัวลักษณะนี้ทำได้โดย การปรับระดับของสารยับยั้งการงอก หรือสารยับยั้งการเจริญเติบโตให้ลดลง โดยการนำเมล็ดไปเก็บไว้ในที่เย็นหรืออุณหภูมิต่ำและชื้นระยะหนึ่ง แล้วนำเมล็ดไปเพาะในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ระดับของอุณหภูมิและระยะเวลาของการเก็บรักษาจะขึ้นกับชนิดของพืชเป็นหลัก

3.1.3 พัฒนาการของพืชในช่วงต้นหรือช่วงก่อนการสืบพันธุ์ (juvenility) เป็นช่วงระยะเวลาของการเจริญเติบโตของพืชหลังจากที่เมล็ดงอกและมีพัฒนาการของยอดเจริญจนกระทั่งออกดอก ต้นพืชวัยอ่อนจะมีการเจริญเติบโตทางลำต้นและกิ่งใบอย่างรวดเร็ว แต่ไม่สามารถออกดอกได้จนกว่าพืชนั้น จะมีอายุมากขึ้น (adult) ระยะเวลาของความอ่อนวัยของพืชนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช พืชบางชนิดพ้นระยะวัยอ่อนภายในฤดูเดียว พืชบางชนิดอาจใช้เวลาหลายฤดู ลักษณะทั่วไปของพืชที่ยังอ่อนวัย คือ

1) ลักษณะทางสัณฐาน พืชที่ยังอ่อนจะมีหนาม ใบเป็นแฉกหรือไม่เป็นแฉก ส่วนพืชที่พ้นระยะวัยอ่อนแล้วจะมีลักษณะตรงข้าม คือ ไม่มีหนาม ใบไม่เป็นแฉกหรือเป็นแฉก ฯลฯ

2) ลักษณะทางสรีระ พืชที่ยังอ่อนมักตอบสนองต่อแรงดึงดูดของโลก ไม่ออกดอก ไม่ผลัดใบ ส่วนพืชที่พ้นระยะวัยอ่อนแล้วจะมีลักษณะตรงข้าม คือ ไม่ตอบสนองต่อแรงดึงดูดของโลก ออกดอกและผลัดใบ ตามลำดับ ช่วงระยะวัยอ่อนของพืชขึ้นอยู่กับชนิดพืช พืชล้มลุกอาจมีระยะเวลาเพียง 1–3 เดือน ไม้ยืนต้นอาจมีระยะเวลานานถึง 4–10 ปี

3.1.4 การพักตัวของตา (bud dormancy) เป็นลักษณะที่ปรากฏในพืชบางชนิด โดยปกติ พืชจะมีการเจริญเติบโตจากส่วนตาไปเป็น กิ่ง ใบ หรือ ดอก แต่พืชบางชนิด ตาจะมีการพักตัว เนื่องจากสภาพภายในมีสารยับยั้งการแตกตาอยู่มาก และสภาพแวดล้อมภายนอกอาจยังไม่เหมาะสม การพักตัวของตาแบบนี้มักพบกับพืชผลัดใบที่มีถิ่นกำเนิดในเขตอบอุ่น โดยตาจะมีการพักตัวในฤดูหนาว ถ้าพืชไม่มีการพักตัวและแตกตาออกมา กิ่ง ใบ หรือดอกจะได้รับสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เช่น อุณหภูมิต่ำเกินไป หรือมีหิมะหรือมีน้ำค้างแข็ง ทำให้กิ่ง ใบ ดอกที่แตกออกมาจะได้รับอันตราย โดยปกติพืชเหล่านี้จะพ้นการพักตัวในฤดูใบไม้ผลิ หรือเมื่อสภาพอากาศอบอุ่นขึ้น

นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลข่มตายอด (apical dominant) เป็นปรากฏการณ์ที่ตายอด (terminal bud) ส่งอิทธิพลทำให้ตาข้าง (lateral bud) ซึ่งอยู่ถัดลงมาจากปลายยอดไม่สามารถแตกออกมา ซึ่งเชื่อว่าสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มออกซิน (auxin) ที่ถูกสร้างจากตายอดมีการเคลื่อนย้ายลงตามแรงดึงดูดของโลกทางท่อลำเลียงอาหาร เมื่อสารนี้เคลื่อนย้ายผ่าน ทำให้ตาข้างไม่สามารถแตกออกมา อย่างไรก็ตาม ตาข้างซึ่งอยู่ห่างจากตายอดค่อนข้างมากจะสามารถแตกออกมาได้ เนื่องจากตายอดไม่สามารถส่งอิทธิพลไปยับยั้งตาข้างเหล่านั้น การทำลายอิทธิพลของตายอด ทำได้โดยการตัดปลายยอดออก เป็นการทำลายแหล่งสร้างสารในกลุ่มออกซินหรือการโน้มให้ปลายยอดอยู่ต่ำกว่าตาข้าง ซึ่งจะทำให้สารในกลุ่มออกซินที่ตายอดสร้างขึ้นไม่สามารถเคลื่อนย้ายสวนทางกับแรงดึงดูดของโลก ตาข้างจะสามารถแตกออกมาได้ อย่างไรก็ตามเมื่อตาข้างที่แตกออกมาแล้วเจริญไปได้ระยะหนึ่ง ตาข้างที่อยู่สูงที่สุดจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตายอดและส่งอิทธิพลของตายอดข่มตาข้างอีก

3.2 การเจริญเติบโตและพัฒนาการทางการสืบพันธุ์ (growth and development of the reproductive parts) เป็นระยะที่พืชมีการสร้างตาดอก ออกดอก ติดผล และสร้างเมล็ด เพื่อเป็นการสืบทอดและดำรงเผ่าพันธุ์ต่อไป หรือพืชบางชนิดมีการขยายตัวและการแก่ของส่วนสะสมอาหาร เช่น ราก ลำต้น ฯลฯ ลักษณะที่แสดงว่าพืชเข้าสู่ระยะการเจริญทางการสืบพันธุ์ ได้แก่ เนื้อเยื่อแก่ตัว เส้นใยมีความหนามากขึ้น มีการสร้างเซลล์ใหม่น้อยมาก เกิดฮอร์โมนที่จำเป็นต่อพัฒนาการของการ เกิดตาดอก เกิดพัฒนาการของตาดอก เกิดพัฒนาการของส่วนสะสมอาหาร เกิดสารบางชนิด พวก water-retaining substances เช่น พวก hydrophilic colloids

3.2.1 การแก่ของพืช (maturity) เป็นระยะที่พืชพ้นจากระยะวัยอ่อน มีการเจริญเติบโตทางลำต้น กิ่งใบอย่างเต็มที่แล้ว พืชพร้อมจะสืบพันธุ์ได้ สามารถให้ดอก ติดผลและเมล็ดได้แล้ว

3.2.2 การออกดอกของพืช (flowering) เป็นขั้นแรกของการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction) เมื่อพืชพร้อมจะออกดอก จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อเจริญ (vegetative meristematic tissue) ซึ่งเดิมเป็นจุดกำเนิดของกิ่งใบ ไปเป็นจุดกำเนิดของดอก (reproductive meristematic tissue) เนื้อเยื่อในส่วนนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นตาดอก แล้วจะมีการพัฒนาการต่อไป จนกระทั่งพืชออกดอก

3.2.3 การชราของพืช (senescence) เป็นขั้นที่พืชเข้าสู่วัยที่ใกล้จะสิ้นสุดชีพจักร การชราของพืชอาจเกิดขึ้นกับพืชทั้งต้น (complete senescence) หรืออาจชราเพียงบางส่วนของพืช (partial senescence) เช่น ใบ ลำต้น ผล ดอก การชราของพืชแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ

1) การชราทั้งต้น (overall senescence) เป็นการชราที่เกิดขึ้นกับทุก ๆ ส่วนของพืช ทั้งส่วนที่อยู่เหนือดินและใต้ดิน เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ฯลฯ

2) การชราเฉพาะส่วนเหนือดิน (top senescence) เป็นการชราที่เกิดเฉพาะกับส่วนที่อยู่เหนือดินที่มีอายุฤดูเดียว แต่ส่วนที่อยู่ใต้ดิน เช่น ราก หัว ฯลฯ ยังคงมีชีวิตอยู่

และสามารถงอกส่วนเหนือดิน (ลำต้น) ใหม่ได้อีก เมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสม เช่น พืชพวก ขิง ข่า ว่านสี่ทิศ ว่านแสงอาทิตย์ ฯลฯ

3) การชราพร้อมกันของใบพืช (deciduous senescence) การชราชนิดนี้จะเกิดกับใบพืชเท่านั้น ส่วนอื่น ๆ ยังคงมีชีวิตอยู่ การชราลักษณะนี้จะเกิดกับพืชทุก ๆ ใบพร้อมกัน อาจมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงหรือสีเหลืองพร้อม ๆ กันในช่วงต้นฤดูใบไม้ร่วง และใบพืชจะร่วงพร้อม ๆ กันหมดทั้งต้นในฤดูใบไม้ร่วง พบในพืชผลัดใบ ทั้งพืชที่มีถิ่นกำเนิดในเขตอบอุ่นและพืชที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนบางชนิด เช่น แคฝรั่ง องุ่น น้อยหน่า หูกวาง กาลพฤกษ์ ยางพารา ฯลฯ

4) การชราของใบพืช (progressive senescence) เป็นการชราของใบพืชเฉพาะใบที่มีอายุมากหรือได้รับอันตราย หรือถูกโรคแมลงเข้าทำลาย การชราแบบนี้ ใบพืชจะทยอยร่วงตลอดทั้งปีเกิดในพืชประเภทไม่ผลัดใบ

สาเหตุของการชรา อาจเกิดจากการที่อาหารถูกเคลื่อนย้ายออกจากส่วนต่าง ๆ ของต้นพืช ไปยังส่วนดอก ผล เมล็ด ทำให้อาหารสะสมในลำต้นพืชมีไม่เพียงพอ วิธีการแก้การชรา ทำโดยการปลิดดอกและปลิดผลออกบ้าง เพราะดอกและผลเป็นแหล่งใช้อาหารของพืช หรือใช้การตัดแต่ง (pruning) เพื่อลดกิ่งที่แก่เกินไปหรือกิ่งที่ไม่สามารถให้ผลผลิตแล้ว ซึ่งมีการใช้อาหารมากกว่าสร้างอาหาร เพื่อให้อาหารที่มีอยู่ในต้นพืช สามารถกระจายไปเลี้ยงดูส่วนอื่น ๆ ได้มากขึ้น

3.2.4 การตายของพืช (death) เป็นขั้นตอนที่พืชสิ้นสุดชีพจักรลง อายุของพืชแต่ละชนิด จะแตกต่างกันตามประเภทของพืชนั้น ๆ ว่าเป็นพืชฤดูเดียว (annual plant) พืชสองฤดู (biennial plant) หรือพืชหลายฤดู (perennial plant) หรือเป็นพืชที่ออกดอกครั้งเดียวแล้วตาย (monocarpic plant) หรือสามารถออกดอกได้หลายครั้ง (polycarpic plant) การตายของพืชเกิดขึ้นเนื่องจาก อวัยวะหรือเนื้อเยื่อพืชหมดความสามารถในการดำเนินขบวนการเพื่อการดำรงชีพ เช่น การสังเคราะห์และเคลื่อนย้ายสารอาหาร การสร้างสารประกอบต่าง ๆ การหายใจ ฯลฯ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่พืชนั้นเจริญอยู่ เช่น โรค แมลง วัชพืช น้ำและความชื้น ฯลฯ ก็มีส่วนสำคัญที่สามารถเร่งให้พืชตายเร็วขึ้น

4. สรุป

ความแตกต่างของการเจริญเติบโตของพืชกับการพัฒนาการของพืชสามารถกล่าวได้คือ การพัฒนาการของพืชเป็นการเปลี่ยนแปลงตามลำดับขั้น ของรูปร่างและโครงสร้างพืชเพื่อไปทำหน้าที่เฉพาะ แต่การเจริญเติบโตเป็นเพียงการเพิ่มขนาดและน้ำหนักที่เกิดจากการแบ่งเซลล์และขยายขนาดของเซลล์พืช สำหรับวงจรการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช เริ่มจากการงอกจากเมล็ดของต้นอ่อนพืช ระยะต่อมาเป็นพืชช่วงวัยอ่อนหรือก่อนการสืบพันธุ์ซึ่งมีการเจริญเติบโตทางลำต้นและกิ่งก้านอย่างรวดเร็ว จากนั้นเป็นพืชช่วงโตเต็มที่หรือระยะพืชแก่ ซึ่งจะสร้างตาดอก ออกดอก ติดผลและสร้างเมล็ด ถัดจากระยะพืชแก่จะเป็นระยะชราซึ่งเป็นระยะที่พืชใกล้จะสิ้นสุดชีพจักร และระยะสุดท้ายเป็นระยะการตายของพืช ซึ่งอายุตลอดวงจรชีวิตของพืชจะขึ้นอยู่กับประเภทของพืชว่าเป็นพืชกี่ฤดูกาล

คำถามวัดการเรียนรู้

1. การเจริญเติบโตของพืชกับพัฒนาการของพืชแตกต่างกันอย่างไร
2. ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่สำคัญที่มีผลต่อการงอกของเมล็ดได้แก่ปัจจัยใดบ้าง
3. การพักตัวของเมล็ดเกิดขึ้นจากสาเหตุใด
4. อิทธิพลข่มตายอด (apical dominant) มีผลต่อพืชอย่างไร
5. อธิบายสภาพของพืชช่วงการเจริญเติบโตและพัฒนาการทางการสืบพันธุ์
6. จงอธิบายวงจรการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช