Concept 11-4

1. ตารางเปรียบเทียบ

<table>
<tr><th colspan="2">ราก</th><th colspan="2">ลำต้น</th></tr>
<tr><td colspan="2">ชั้น cortex กว้าง</td><td colspan="2">ชั้น cortex แคบ</td></tr>
<tr><td colspan="2">ไม่ค่อยพบ collenchyma</td><td colspan="2">พบ collenchyma</td></tr>
<tr><td colspan="2">พบ endodermis และ pericycle
ชัดเจนในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว</td><td colspan="2">ไม่พบ pericycle
ไม่ค่อยพบ endodermis</td></tr>
<tr><td colspan="2">เจริญในแนวเดียวกับแรงดึงดูดของโลก</td><td colspan="2">เจริญในแนวตรงข้ามกับแรงดึงดูดของโลก</td></tr>
<tr><th colspan="2">ราก, ลำต้นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว</th><th colspan="2">ราก, ลำต้นพืชใบเลี้ยงคู่</th></tr>
<tr><td colspan="2">ไม่พบ cambium ระหว่างเนื้อเยื่อ phloem และ xylem</td><td colspan="2">ระหว่างเนื้อเยื่อ phloem และ xylem มีเนื้อเยื่อ cambium คั่นอยู่</td></tr>
<tr><th colspan="2">ราก</th><th colspan="2">ลำต้น</th></tr>
<tr><th>ใบเลี้ยงเดี่ยว</th><th>ใบเลี้ยงคู่</th><th>ใบเลี้ยงเดี่ยว</th><th>ใบเลี้ยงคู่</th></tr>
<tr><td>xylem เรียงตัวเป็นหลาย ๆ แฉก</td><td>xylem เรียงตัวเป็นแฉก หรือรัศมีแยกออกไป (ไม่เกิน 5 ส่วนใหญ่ 4)</td><td>vascular bundle อยู่กันอย่างกระจัดกระจายทั่วไปในลำต้น พบอยู่หนาแน่นบริเวณใกล้กับ epidermis</td><td>vascular bundle เรียงเป็นกลุ่ม ๆ โดยรอบลำต้น อย่างเป็นระเบียบ</td></tr>
<tr><td colspan="2">phloem เป็นกลุ่ม แทรกอยู่ระหว่างแฉกของ xylem</td><td>vascular bundle อยู่คนละรัศมี</td><td>vascular อยู่รัศมีเดียวกัน</td></tr>
<tr><td colspan="2">เป็นระเบียบ</td><td>ไม่เป็นระเบียบ</td><td>เป็นระเบียบ</td></tr>
</table>

1. vessel member มีประสิทธิภาพในการลำเลียงน้ำสูงสุด แต่พบเฉพาะในพืชดอกเท่านั้น
2. tracheid ใช้ลำเลียงน้ำ พบในพืชที่มีท่อลำเลียงทุกกลุ่ม
3. เซลล์ใดใน xylem และ phloem ที่ไม่ทำหน้าที่ลำเลียงสาร แต่ให้ความแข็งแรง ⟹ fiber
4. cascular ray เกิดจาก parenchyma ใช้ลำเลียงน้ำ และอาหารในแนวรัศมี
5. เซลล์ที่มีชีวิตใน xylem คือ parenchyma
6. เซลล์ที่ไม่มีชีวิตใน phloem คือ fiber
7. เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลำเลียงอาหารคือ sieve tube membrane พบในพืชดอกเท่านั้น ส่วนพืชไร้ดอก จะมี sieve cell แทน
8. epidermis เจริญเปลี่ยนแปลงเป็น ⟹ ขนราก (root hair) เซลล์คุม (guard cell) ขน (trichome) ต่อม (gland)
9. ลำดับชั้นเนื้อเยื่อ จากนอกเข้าไป ⟹ epidermis ⟶ cortex (parenchyma, collenchyma, sclerenchyma (fiber, stone cell)) ⟶ endodermis ⟶ pericycle ⟶ vascular bundle ⟶ pith
10. เซลล์มีชีวิต มีนิวเคลียส ⟹ companian cell, parenchyma, collenchyma

    เซลล์มีชีวิต ไม่มีนิวเคลียส ⟹ sieve tube membrane

เซลล์ไม่มีชีวิต ไม่มีนิวเคลียส ⟹ vessel membrane, shlerenchyma (fiber, stone cell), tracheid)

11. vessel เป็นเซลล์ที่มีลักษณะเป็นเซลล์หลายเซลล์ ที่ผนังตอนปลายเปิดต่อกัน ผนังเซลล์หนา
12. น้ำจะถูกดูดได้ดีที่สุดบริเวณขนราก
13. เกลือแร่ ถูกดูดได้ดีที่สุด ที่บริเวณที่เป็นเยื่อเจริญ
14. พืชบกขนาดเล็กที่ไม่มีท่อลำเลียง (bryophyta ⟹ มอส, ลิเวอร์เวิร์ต, ฮอร์นเวิร์ต) จะเจริญได้ดีในบริเวณที่มีความชื้นค่อนข้างสูงและมีร่มเงา
    - ปริมาณน้ำ และความชุ่มชื้น เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งในการจำกัดจำนวนประชากรของพืชพวกนี้
15. มีผู้ประมาณว่า ข้าวโพดแต่ละต้น กว่าจะเจริญเติบโตจนเก็บฝักได้ ต้องใช้น้ำถึง 200 dm^3 ⟹ แสดงว่า นอกจากจะต้องการน้ำเพื่อให้เซลล์ได้รับอย่างเพียงพอแล้ว พืชยังต้องสูญเสียน้ำปริมาณมากมายให้แก่บรรยากาศด้วย
16. รากเป็นส่วนของพืชที่อยู่ใกล้ชิดน้ำและแร่ธาตุมากที่สุด
17. โครงสร้างของปลายราก

    17.1. เซลล์ต่าง ๆ ของปลายรากรวมทั้งเซลล์ขนรากจะมีแวคิวโอลอยู่เกือบเต็มเซลล์

    17.2. จำนวนแวคิวโอลขึ้นอยู่กับอายุของเซลล์ เซลล์ที่ยังอ่อนอยู่ จะมีแวคิวโอลหลายอัน เมื่อเซลล์มีอายุมากขึ้น จะบรรจุน้ำมากขึ้น ทำให้ขนาดของแวคิวโอลใหญ่ขึ้น แวคิวโอลเล็ก ๆ จะมารวมกัน บางครั้งเหลืออันเดียว

    17.3. เมื่อนำปลายรากตัดตามยาว จะแบ่งรากออกเป็น 4 บริเวณ ดังนี้

บริเวณหมวกราก (root cap)	• อยู่ปลายสุดของราก • มีกลุ่มเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายหมวกหุ้มอยู่ • เวลาที่รากเจริญลงสู่ใต้ดิน หมวกรากจะป้องกันเซลล์ที่อยู่ถัดขึ้นมา มิให้ได้รับอันตราย • สารจำพวกเมือกจากหมวกราก จะทำให้ปลายรากเคลื่อนที่ลงสู่ดินได้ดีขึ้น • เซลล์บริเวณหมวกราก ถูกทำลายได้ง่าย และมีอายุสั้น จะหลุดตายไปเรื่อย ๆ เซลล์ชั้นถัดไปจะสร้างขึ้นมาทดแทนใหม่เรื่อย ๆ
บริเวณเนื้อเยื่อเจริญแบ่งเซลล์ (zone of cell division, the meristematic region)	• มีการแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวนเซลล์อยู่ตลอดเวลา บางเซลล์กลายไปเป็นเซลล์ในบริเวณหมวกราก • เซลล์อัดกันแน่น • รูปร่างเกือบกลม หรือ เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม • มองเห็นนิวเคลียสได้ชัดเจน • ปริมาณการดูดน้ำ/พื้นที่ผิวสัมผัส มากที่สุด (active transport) เนื่องจากมีการทำกิจกรรมสูง หายใจสูง ได้ ATP มาก
บริเวณเซลล์ยืดขยายตามความยาว (zone of cell enlargement)	• อยู่เหนือบริเวณเนื้อเยื่อเจริญแบ่งเซลล์ขึ้นมา • เซลล์มีอายุมากขึ้น ไม่ค่อยมีการแบ่งเซลล์ แต่เซลล์จะมีการเติบโตโดยเฉพาะการเพิ่มความยาวให้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้รากยาวขึ้นมาก

บริเวณเซลล์เจริญเต็มที่, บริเวณขนราก (maturation zone, zone of root hair)	• เนื้อเยื่อมีการเจริญเติบโตเปลี่ยนแปลงเป็น vascular bundle ที่ประกอบด้วย
	  • xylem ลำเลียงน้ำและเกลือแร่
	  • phloem ลำเลียงอาหารที่สร้างขึ้น
	• เนื้อเยื่อผิว (epidermis) ที่อยู่ชั้นนอกสุดของบริเวณนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลง โดย ผนังเซลล์ของแต่ละเซลล์จะยืดยาวออก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำและเกลือแร่ เรียกโครงสร้างนี้ว่า ขนราก (root hair)
	• ถัดจากบริเวณนี้ขึ้นไป จะไม่มีขนรากเลย เนื่องจากขนรากจะมีอายุไม่เกิน 7-8 วัน ในขณะที่มันกำลังจะตาย ก็จะเกิดขนรากขึ้นมาใหม่ในบริเวณของขนรากที่อยู่ต่ำลงไป
	• พืชทั่วไปดูดน้ำและเกลือแร่เข้าสู่รากทางขนราก และ เนื้อเยื่อผิว แต่บริเวณที่ดูดน้ำได้มากที่สุด คือ บริเวณขนราก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด

1. กระบวนการดูดน้ำของราก ⟹ เริ่มจากน้ำจากสลล.ในดินเข้าสู่ขนรากหรือเซลล์ของ epidermis ผ่านชั้นต่าง ๆ ของราก จนกระทั่งถึง xylem ในราก ซึ่งถือว่า เป็นการสิ้นสุดของกระบวนการดูดน้ำของราก

active water absorbtion	***passive water absorbtion***
การดูดน้ำที่เกิดจากกิจกรรมของเซลล์ที่บริเวณรากโดยตรง	การดูดน้ำของราก โดย การที่น้ำเคลื่อนที่เข้าสู่ราก มิได้มากจากกิจกรรมของเซลล์ราก แต่เนื่องมาจากส่วนอื่น ๆ ของพืช เซลล์ของราก เป็นเพียงทางผ่าน และเป็นด่านกีดขวางทางเดินของน้ำเท่านั้น พืชดูดน้ำโดยวิธีนี้ได้อย่างรวดเร็ว และเป็นปริมาณมากกว่าวิธีอื่น ๆ ทั้งหมด
ออสโมซิส • เกิดขึ้นตลอดเวลา เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ สลล. ในดิน และในราก • โดยปกติ ความเข้มข้นของสารละลายในดินรอบ ๆ ราก จะมีความเข้มข้นน้อยกว่า (น้ำมาก) สารละลายที่อยู่ภายในเซลล์ที่บริเวณผิวราก (น้ำน้อย) เป็นผลให้มีการแพร่ของน้ำจากดินเข้าสู่รากได้ตลอดเวลา ⟹ จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้น้ำจากดินเข้าสู่ราก หรือ ออกจากรากสู่ดิน คือ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสลล.ในดินกับในราก • ในบางกรณี การใส่ปุ๋ยเคมีให้กับพืชแต่ละครั้งเป็นปริมาณมาก ๆ จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของสลล.ในดินสูงกว่าภายในราก ซึ่งมีผลเสียต่อการดูดน้ำของพืช เพราะเหตุว่า รากพืชจะมีการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ ซึ่งเรียกว่าเกิด plasmolysis กรณีนี้ อาจทำให้พืชขาดน้ำ และตายในที่สุด	• ปริมาณการดูดน้ำ และระยะเวลาในการดูดน้ำ จะขึ้นอยู่กับการคายน้ำของพืช เพราะว่า ถ้ามีการคายน้ำมาก การดูดน้ำแบบ passive จะมากไปด้วย • เมื่อเกิดการคายน้ำออกทางปากใบ จะทำให้เกิดแรงดึงจากการคายน้ำ (transpiration pull) แรงดึงนี้ สามารถดึงน้ำจากท่อลำเลียงในใบ ซึ่งต่อเนื่องกับท่อลำเลียงในลำต้น กิ่งก้าน และราก ให้เคลื่อนที่ต่อเนื่องกันมาเป็นสายโดยไม่ขาดระยะ ด้วยวิธีการเช่นนี้ น้ำในดิน จึงถูกแรงดึงจากการคายน้ำดึงเข้าสู่รากได้อย่างรวดเร็ว และเกิดได้ตลอดเวลาตราบเท่าที่ยังมีการคายน้ำอยู่

1. น้ำจากดินเข้าสู่เซลล์ต่าง ๆ ในรากได้อย่างไร ⟹ เมื่อน้ำเข้าสู่เซลล์ขนราก ความเข้มข้นของสลล.ภายใน

เซลล์ขนรากหรือ OP จะต่ำกว่าเซลล์ข้างเคียง จึงเกิดการออสโมซิสน้ำเข้าเซลล์ข้างเคียง เกิดเช่นนี้เป็นทอด ๆ ไป

2. ทฤษฎีการลำเลียงน้ำของพืช

root pressure (แรงดันราก)	• เกิดขึ้นเนื่องจากรากดูดน้ำเข้ามาสะสมและแออัดอยู่ใน xylem ทำให้เกิดแรงดันของน้ำภายในราก ซึ่งจะดันให้น้ำและสารละลายที่ปะปนอยู่เคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนบนของพืชได้
	• เกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อมีน้ำอุดมสมบูรณ์ และพืชอยู่ในสภาวะที่คายน้ำไม่สะดวก
	• การทดลองเกี่ยวกับแรงดันราก ทำได้โดยตัดต้นมะเขือเทศ ต้นดาวเรือง หรือ ต้นพืชอื่นขนาดเดียวกัน ซึ่งปลูกในที่ที่มีน้ำชุ่ม หรือ ปลูกในกระถางที่รดน้ำชุ่มก็ได้ ตัดลำต้นออกให้เหลือโคนต้นสูงจากพื้นดินประมาณ 4-5 cm คอยสังเกตบริเวณรอยตัดของลำต้นส่วนที่ติดกับราก จะมีน้ำใส ๆ เรียกว่า sap ถูกผลักดันให้ไหลออกมาจากปลายของตอที่เหลืออยู่ ซึ่งวัดขนาดของแรงดันรากได้โดยการต่อปลายตอเข้ากับเครื่องวัดความดันของของเหลวที่เรียกว่า manometer หรือถ้าต่อท่อยางเข้ากับส่วนของลำต้นแล้วต่อหลอดแก้วเล็ก ๆ จากท่อยาง ก็จะสามารถวัดระยะทางที่ของเหลวถูกดันขึ้นมาได้ และสามารถคำนวณแรงดันรากได้
	• ขนาดของแรงดันราก สามารถทำให้น้ำถูกดันขึ้นไปในท่อลำเลียงได้ไม่เกิน 20 m วิธีนี้จึงไม่ใช่วิธีสำคัญ
	• นักสรีรวิทยาพืช บางท่านให้แนวคิดว่า
	  • แรงดันราก เป็นตัวการสำคัญในการลำเลียงน้ำของพืชบางชนิดและบางเวลาเท่านั้น
	  • แรงดันรากมีความสำคัญในการไล่อากาศออกจากทางเดินของน้ำ และ ทำให้น้ำที่ขาดตอนออกจากกันเชื่อมต่อกันใหม่

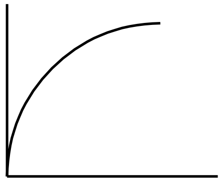
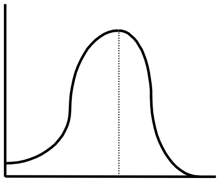
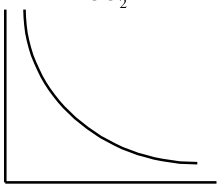
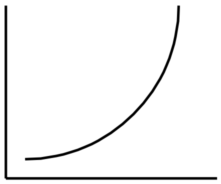
transpiration pull (แรงดึงจากการคายน้ำ)	• เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำที่พืชดูดเข้ามาในเซลล์ของราก และน้ำในท่อ xylem ของราก ลำต้น กิ่ง และใบ ทั้งหมด จะอยู่ติดต่อกันเป็นสายอย่างไม่ขาดตอนด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำที่เรียกว่า cohesion เมื่อพืชคายน้ำออกทางปากใบ จะมีแรงดึงน้ำให้เคลื่อนที่ส่งต่อเนื่องกันเป็นทอด ๆ • แรงดึงจากการคายน้ำมีมากเท่าไร ก็จะทพให้รากดูดน้ำได้มากขึ้นเท่านั้น พืชจึงลำเลียงน้ำขึ้นไปสู่ลำต้นและใบที่อยู่สูง ๆ เช่น ในระดับความสูงตั้วแต่ 120 m ได้ • นักชีววิทยาพืช ส่วนมาก เชื่อว่า <u>แรงดึงจากการคายน้ำเป็นกรรมวิธีสำคัญที่สุดในพืชที่มีความสูงมาก ๆ</u> • Josef Bohm ได้ทดลองเกี่ยวกับกลไกการลำเลียงน้ำ โดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำ (น้ำระเหยดึงปรอทขึ้นมา ได้ถึง 100 cm) • แม้พืชไม่มีราก ก็สามารถลำเลียงน้ำได้
capillary action	• เป็นการลำเลียงน้ำที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผนังด้านข้างภายในเนื้อเยื่อ xylem โดยเฉพาะ tracheid และ vessel แรงดึงดูด เรียกว่า adhesion • ไม่ทำให้น้ำขึ้นไปสูงมากนัก เนื่องจากแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย

1. การคายน้ำของพืช

การคายน้ำในรูปของไอน้ำ (transpiration)	• การคายน้ำทางปากใบ (stomatal transpiration) • เป็นการคายน้ำซึ่งเกิดขึ้นมากถึง 90 % • ปากใบพบมากตามผิวใบ โดยเฉพาะผิวใบด้านล่าง (lower epidermis) • กลไกการปิดเปิดของปากใบ • บริเวณเนื้อเยื่อผิวใบด้านล่าง จะพบว่า เซลล์ epidermis บางคู่ จะเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างไป เพื่อควบคุมการปิด-เปิดของปากใบโดยเฉพาะ เรียกเซลล์คู่นี้ว่า เซลล์คุม (guard cell) มีรูปร่างคล้ายเมล็ดถั่ว มีผนังเซลล์ด้านในตรงตำแหน่งประกบกันหนากว่าด้านนอก • เมื่อน้ำจากด้านในเซลล์ข้างเคียงแพร่เข้าสู่เซลล์คุม ทำให้เซลล์คุมมีแรงดันเต่งมากขึ้น จึงดันให้ผนังเซลล์ด้านนอกโป่งออกไป และมีผลทำให้ผนังเซลล์ด้านในที่หนา ถูกดึงให้โค้งตามไปด้วย จึงเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างผนังเซลล์ด้านในของเซลล์คุม เรียกว่า ปากใบ (stoma) • ถ้าเซลล์คุมยิ่งมีแรงดันเต่งมากขึ้นเท่าใด ยิ่งทำให้ปากใบเปิดกว้างมากยิ่งขึ้น • ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำแพร่ออกจากเซลล์คุม แรงดันเต่งจะลดลง ทำให้ผนังเซลล์ของเซลล์คุมหดตัว ทำให้ปากใบแคบลง และถ้ายิ่งสูญเสียน้ำมาก ปากใบอาจถึงกับปิดสนิทได้ • สรุป การเปิดของ stomata เกิดจาก guard cell ของ stomata เกิด turgor pressure ขึ้นเนื่องจากการสังเคราะห์แสง (น้ำแพร่เข้าไปใน guard cell) • การคายน้ำทางผิวใบ (cuticular transpiration) • บริเวณผิวใบ มีสารคล้ายขี้ผึ้ง เรียกว่า cutin เคลือบอยู่ ทำให้พืชคายน้ำออกทางผิวใบน้อย ซึ่งเกิดได้ไม่เกิน 10 % • การคายน้ำทางเลนติเซลล์ (lenticular transpiration) • เป็นการคายน้ำออกทางโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายรอยแตกที่ผิวของลำต้น หรือ กิ่ง เรียกว่า เลนติเซล • เกิดขึ้นน้อยมาก
การคายน้ำในรูปหยดน้ำ (guttation)	• เป็นการคายน้ำในรูปหยดน้ำเล็ก ๆ ทางรูเปิดเล็ก ๆ ตามปลายเส้นใบที่เรียกว่า hydathode • เกิดขึ้นเมื่ออากาศมีความชื้นมาก และ T ต่ำ ๆ ลมสงบ • ขบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก แรงดันราก root pressure นั่นเอง

1. ปัจจัยที่ควบคุมการคายน้ำของพืช

แสงสว่าง	พืชจะคายน้ำในขณะมีแสงสว่างได้มากกว่าในที่มืด เพราะแสงเป็นปัจจัยที่ทำให้ปากใบปิด
อุณหภูมิ	ในสภาพแวดล้อมที่มี T สูงไม่เกิน 35 ˚C พืชจะคายน้ำได้ดี • จากการทดลอง พบว่า ที่ T 30 ˚C พืชจะคายน้ำได้เร็วเป็น 3 เท่า ของที่ T 20 ˚C • โดยทั่วไป พืชจะดูดน้ำได้ดีที่ T ระหว่าง 20-30 ˚C • ถ้า T เกิน 35 ˚C จะทำให้ปากใบปิด ทำให้การคายน้ำหยุด (การดูดน้ำแบบ passive หยุดด้วย)
ความชื้นในอากาศ	ถ้าความชื้นในอากาศสูง พืชจะคายน้ำน้อย แต่ถ้าอากาศแห้งจะมีอัตราการคายน้ำสูง

<table>
<tr><td>ลม</td><td colspan="4">ลมจะช่วยพัดพาเอาไอน้ำที่พืชคายออกมาไปสู่ที่อื่น ทำให้ไอน้ำบริเวณรอบ ๆ พืชไม่อิ่มตัว พืชจึงคายน้ำได้</td></tr>
<tr><td>น้ำในดินน้ำในดิน</td><td colspan="4">ถ้าน้ำในดินน้อย รากจะดูดน้ำได้น้อย ทำให้ใบได้รับน้ำไม่เพียงพอ แรงดันเต่งภายในเซลล์คุมลดลง ปากใบจะปิด อัตราการคายน้ำจะลดลง</td></tr>
<tr><td>กราฟปัจจัยต่าง ๆ
แกนตั้ง แทน อัตราการคายน้ำ
แกนนอน แทน ปัจจัยต่าง ๆ</td><td>ปริมาณความร้อนที่ดูดกลืน
</td><td>T
</td><td>ความชื้นในอากาศ, ปริมาณ CO_2
</td><td>ความเร็วลม
</td></tr>
</table>

1. ในปัจจุบัน เชื่อว่า การคายน้ำเป็นโทษมากกว่าเป็นประโยชน์ (ไม่พบความสำคัญ) อย่างไรก็ตาม พืช จะขาดขบวนการนี้ไม่ได้ เพราะขบวนการนี้ จะเชื่อมโยงให้ขบวนการอื่น ๆ เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การลำเลียงน้ำและเกลือแร่ โดนอาศัยแรงดึงที่เกิดจากการคายน้ำ และขบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช
2. กิจกรรม 11.6 ศึกษาการคายน้ำของพืช โดยใช้เครื่องมือ potometer อย่างง่าย

<table>
<tr><td>วิธีทำ</td><td>• นำหลอดคะปิลลารีหรือหลอดแก้วรูเล็กที่มีความยาว 40 cm และมีปลายโค้งงอ เสียบปลายข้างหนึ่งเข้าไปในท่อพลาสติกแล้วแช่ลงในอ่างน้ำให้น้ำเข้าจนเต็มหลอดคะปิลลารี
• นำกิ่งไม้ที่แช่ในน้ำมาตัดโคนออกเล็กน้อย การตัดนี้จะต้องทำใต้ผิวน้ำ เพื่อมิให้ฟองอากาศเกิดขึ้นในกิ่งไม้
• เสียบกิ่งไม้กับท่อพลาสติกขณะที่อยู่ในน้ำ กิ่งไม้นี้ จะต้องกระชับพอดีกับท่อพลาสติก เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปได้ ควรทาบริเวณรอยต่อนี้ด้วยวาสลินเพื่อกันการรั่ว
• ยกหลอดคะปิลลารีขึ้นจากน้ำ ใช้กระดาษซับหรือกระดาษเยื่อซับน้ำจากปลายหลอดออกเล็กน้อย เพื่อให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น แล้วจุ่มปลายลงในอ่างน้ำหรือบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำสี
• หนีบหลอดคะปิลลารีให้ติดกับไม้บรรทัด
• ตั้งเครื่องมือไว้ในห้องปฏิบัติการ วัดระยะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ไป โดยวัดจากจุดเริ่มต้นทุก ๆ 3 นาที ประมาณ 18 นาที</td></tr>
<tr><td>สรุปผลการทดลอง</td><td>• โพโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือแสดงให้เห็นว่าพืชมีการลำเลียงน้ำเกิดขึ้น โดยสังเกตจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในหลอดแก้ว
• จำนวนใบกับความเข้มของแสงมีผลต่อการคายน้ำ
    • พืชที่มีจำนวนใบมาก จะคายน้ำได้มากกว่า
    • ความเข้มแสงมาก การคายน้ำเกิดขึ้นมากกว่า
• สิ่งที่พิสูจน์ว่าการคายน้ำมีความสัมพันธ์กับการลำเลียงน้ำ คือ เมื่อมีการคายน้ำทางใบ จะเกิดการลำเลียงน้ำเข้าไปแทนที่ จะเห็นจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ จะเคลื่อนที่เข้าไปหากิ่งไม้</td></tr>
</table>

1. การดูดแร่ธาตุของพืช
   1.1. พืชต้องการเกลือแร่ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้สร้างสารประกอบที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของพืช แร่ธาตุเหล่านั้นละลายปะปนอยู่ในดิน

1.2. รากสามารถดูดแร่ธาตุเข้าไปได้ ทั้ง ๆ ที่ความเข้มข้นของแร่ธาตุในดินมีน้อยกว่าความเข้มข้นของแร่ธาตุในราก

1.3. เกลือแร่ที่ถูกดูดเข้าสู่รากพืช จะต้องอยู่ในรูปของ ion ซึ่งอาจอยู่ในรูปอิออนอิสระในสลล.ดิน หรือ ion ที่ถูกดูดไว้ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว

2. การดูดอิออนแบบ active

2.1. เป็นการดูดอิออนโดยใช้พลังงานจากเซลล์ของราก (active transport) และต้องอาศัยตัวพา เพื่อนำอิออนจากภายนอกเข้าไปภายในเซลล์

2.2. เป็นกระบวนการแพร่ที่ต้องอาศัยพลังงานจขากการหายใจมาช่วยด้วย ดังนั้น ถ้าพืชขึ้นอยู่ในดินที่มีสภาพโปร่ง อากาศถ่ายเทสะดวก รากพืชจะได้รับ O_2 เป็นจำนวนมาก ทำให้พืชดูดแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ดี

2.3. ทำให้เกิดการสะสมเกลือแร่ขึ้นภายในราก

2.4. <u>น่าจะเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดในการที่รากใช้ดูดเกลือแร่ให้ได้มากที่สุด</u>

3. ปัจจัยที่ควบคุมการดูดอิออนแบบ passive

O_2	เป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างพลังงานจากกระบวนการหายใจ พลังงานที่เกิดขึ้น จะถูกนำมาใช้ในการดูดเกลือแร่แบบ active เพราะดินที่โปร่งร่วนซุยมีการถ่ายเทอากาศสะดวก
T ของอากาศ	ถ้าสูงพอประมาณ จะทำให้อัตราการสร้างพลังงานสูงด้วย
อาหารพวกแป้งและน้ำตาล	เป็นสารอาหารที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสลายเพื่อให้พลังงานภายในเซลล์ ถ้าอาหารขาดแคลนจะมีผลโดยตรงต่อการสร้างพลังงาน
ความเข้มข้นของเกลือแร่ในสลล.ในดิน	ถ้ามีความเข้มข้นสูงพอเหมาะ จะมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มอัตราการดูดเกลือแร่เข้าสู่ราก

1. การลำเลียงแร่ธาตุของพืช

1.1. แร่ธาตุที่พืชดูดเข้าไป จะถูกลำเลียงขึ้นสู่ลำต้น โดยทาง xylem ซึ่งใช้วิธีเดียวกับการลำเลียงน้ำ

1.2. แรงดึงที่เกิดจากการคายน้ำ ทำให้เกิดการลำเลียงแร่ธาตุ ไปตามท่อ xylem พร้อมกับน้ำขึ้นสู่ลำต้นและใบ ในระดับสูง ๆ ได้มากกว่าวิธีอื่น ๆ

2. การสังเคราะห์ด้วยแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ใบ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ น้ำตาล พืชจะเปลี่ยนน้ำตาลที่เหลือใช้เก็บไว้ในรูปของแป้ง แต่ปรากฏว่า มีน้ำตาล แป้ง และสารประกอบอื่น ๆ ที่ได้จากน้ำตาลอยู่ในส่วนอื่น ๆ มากกว่าที่ใบ เช่น หัวมันเทศ ซึ่งเป็นรากที่มีแป้งสะสมอยู่มาก ทั้ง ๆ ที่ราก ไม่มีการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นได้ แสดงว่า ต้องมีการลำเลียงน้ำตาลจากใบไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช รวมทั้งรากด้วย

3. อาหารที่พืชสร้างขึ้น ได้แก่ น้ำตาล หรือ สารประกอบชนิดอื่น ๆ ที่ถูกเปลี่ยนไป จะถูกลำเลียงไปตามเนื้อเยื่อ phloem โดยเฉพาะ เพื่อนำไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ที่กำลังเจริญ เช่น ยอดอ่อน หรือ ปลายราก หรือ อาจนำไปเก็บสะสมไว้ที่บริเวณสะสมอาหาร เช่น ราก ลำต้น หรือ หัว เป็นต้น

4. เนื้อเยื่อ phloem ที่ทำหน้าที่ลำเลียง มีคุณลักษณะต่าง ๆจาก เนื้อเยื่อ xylem ดังนี้

phloem	xylem
sieve tube membrane ของ phloem ต้องเป็นเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ การลำเลียงจึงจะเกิดขึ้นได้ ถ้าเซลล์ตาย การลำเลียงจะหยุดทันที	เซลล์ที่ทำหน้าที่ลำเลียงไม่มีชีวิต
อัตราการลำเลียงใน phloem เกิดได้ช้ากว่าการลำเลีบงน้ำและเกลือแร่ใน xylem มาก ซึ่งมักไม่เกิน $\frac{1}{10}$ ของการลำเลียงใน xylem	อัตราการลำเลียงเร็ว
ทิศทางการลำเลียงใน phloem เกิดขึ้นได้ทั้งแนวขึ้น และ ลง ในเวลาเดียวกัน	การลำเลียงใน xylem มักมีแต่การลำเลียงในแนวขึ้นเพียงทิศทางเดียว

1. วิธีหนึ่งในการศึกษาการลำเลียงน้ำตาลในพืช ทำได้โดยการใช้สารกัมมันตรังสีซึ่งได้แก่ ^{14}C ที่เป็นองค์ประกอบของ $^{14}CO_2$ เพื่อความสะดวก ในทางปฏิบัติ จะเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสลล. แล้วต่อมาคาร์บอนไดออกไซด์จะระเหยเป็นก๊าซ พืชจึงดูดเข้าไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ภายหลังที่พืชได้รับ CO_2 ที่มี ^{14}C แล้ว จึงนำเอาเนื้อเยื่อต่าง ๆ มาทำให้แห้งโดยการแช่แข็ง (freeze-dried) และหั่นเป็นชิ้นบาง ๆ นำไปวางบนแผ่นฟิล์มถ่ายรูปในห้องมืด โดยวิธีนี้ จะสามารถตรวจสอบได้ว่า น้ำตาลถูกลำเลียงไปยังเนื้อเยื่อชนิดใด พบว่า
   - 1.1. น้ำตาลในใบพืชส่วนล่างของลำต้น จะลำเลียงสู่ส่วนล่างของลำต้น
   - 1.2. น้ำตาลในใบพืชที่อยู่ปลายกิ่งจะลำเลียงไปยังยอด
   - 1.3. ถ้าตัดใบพืชที่อยู่ข้างบนออก น้ำตาลจากใบจะลำเลียงทั้งขึ้นสู่ยอดและลงมาตามลำดับ
2. ซิมเมอร์แมน (M.H.Zimmerman) แห่งมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด พบว่า เพลี้ยอ่อน สามารถใช้งวงแทงเข้าไปในท่อโฟลเอม ซิมเมอร์แมนก็วางยาสลบเพลี้ยแล้วตัดหัวออก ของเหลวจากโฟลเอมยังคงไหลออกมาทางงวงที่ฝังอยู่ เมื่อเอาของเหลวที่ไหลออกจากงวงไปวิเคราะห์พบว่า ส่วนใหญ่เป็นซูโครส
3. ถ้าให้ซูโครสที่มี ^{14}C เป็งองค์ประกอบ แล้วให้เพลี้ยอ่อนแทงงวงเข้าไปทีทท่อโฟลเอมตำแหน่งต่าง ๆ สามารถหาอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำตาลในโฟลเอมได้ พบว่า น้ำตาลในโฟลเอมเคลื่อนที่มีความเร็วประมาณ 100 cm/hr
4. เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสารในโฟลเอมเร็วมาก จึงทำให้น่าสงสัยว่า การเคลื่อนที่ของน้ำตาลในโฟลเอมคงจะไม่ใช่กระบวนการแพร่ธรรมดา
5. กลไกการลำเลียงอาหารทาง phloem
   - 5.1. สมมติฐานที่ 1 $\Longrightarrow$ protplasmic streaming hypothesis $\Longrightarrow$ มีผู้ไม่เห็นด้วยกับสมมติฐานข้อนี้
   - 5.2. สมมติฐานที่ 2 $\Longrightarrow$ Münch's pressure flow hypothesis $\Longrightarrow$ การไหลที่เกิดจากแรงดัน
     - มึนช์ ได้เสนอสมมติฐานอธิบายกลไกการลำเลียงอาหารทางโฟลเอมว่า เป็นผลของแรงดันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำตาล
     - เซลล์ของใบ (เซลล์ต้นทาง) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีการสังเคราะห์น้ำตาล ทำให้น้ำตาลมีความเข้มข้นมาก โมเลกุลของน้ำตาลจะถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์ข้างเคียง ทำให้เซลล์ข้างเคียงมีความเข้มข้นสูงอย่างรวดเร็ว จากเซลล์ข้างเคียงจะมีการลำเลียงเช่นเดียวกันไปยังเซลล์

ต่าง ๆ จนถึง phloem เกิดแรงดันโมเลกุลของน้ำตาลเคลื่อนไปตามท่อ phloem ไปยังเนื้อเยื่อที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลน้อยกว่า

- ตราบใดที่ยังมีความเข้มข้นของน้ำตาลแตกต่างกัน การเคลื่อนที่ของซูโครสก็จะดำเนินต่อไป
- (บางเล่มอธิบายว่า เซลล์ของใบ มี OP สูง น้ำจึงแพร่เข้าสู่เซลล์ของใบ ทำให้มีแรงดันเต่งสูงขึ้น ผลักให้อาหารเกิดการไหลเวียนไปตาม phloem จนถึงเซลล์ปลายทางที่มีแรงดันต่ำกว่า เมื่อสารอาหารไปถึงเซลล์ปลายทาง จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่นที่ไม่ละลายน้ำ (เช่น แป้ง) ทำให้เซลล์มี OP ต่ำ และมีแรงดันเต่งต่ำด้วย จึงเกิดการลำเลียงอาหารได้ตลอดเวลา)

6. สรุป เซลล์พืชที่ไม่สามารถสร้างอาหารได้เอง จะได้รับอาหารจากแหล่งผลิตโดยวิธีใด $\Rightarrow$ translocation โดยอาศัยแรงดันเต่ง
7. แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อเท็จจริงบางอย่างที่ไม่สามารถอธิบายตามสมมติฐานของมึนซ์ได้ เช่น
   - 7.1. การเคลื่อนที่ของซูโครส มีอัตราเร็วเกินกว่าที่จะอธิบายได้ด้วยการแพร่
   - 7.2. ใน phloem สามารถลำเลียงน้ำตาลสวนทางได้ในเวลาเดียวกัน
   - 7.3. รูของฝากั้นบนและล่างของ phloem มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1 mm หรือน้อยกว่า และถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของโปรตีนได้ง่าย
   - 7.4. ในท่อ phloem มีสายเล็ก ๆ ของ cytoplasm ติดต่อกันโดยตลอด และเชื่อว่าสายใยนี้ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารด้วย
8. ในเรื่องกลไกที่ใช้ในการลำเลียงของ phloem ยังหาข้อยุติไม่ได้ นักวิทยาศาสตร์มีความเห็นบางส่วนขัดแย้งกัน คงจะต้องมีการศึกษาค้นคว้ากันต่อไป