

**บทที่ 6**

**TRANSPORT OF WATER IN PLANTS**

# TRANSPORT OF WATER IN PLANTS

## I. INTRODUCTION

เราได้พิจารณาเรื่องการคายน้ำและการดูดน้ำของรากมาแล้ว ต่อไปเราจะพิจารณาเรื่องการเคลื่อนที่ของน้ำจากขนราก (root hair) ไปยังส่วนต่าง ๆ ของลำต้น หลังจากที่มีน้ำผ่านเข้าไปในขนรากแล้ว น้ำจะเคลื่อนที่ผ่าน cortex เข้าสู่ stele ของราก และขึ้นไปยังส่วนต่าง ๆ ของลำต้นและคายออกทางใบ การเคลื่อนที่ของน้ำภายในต้นพืชแบ่งออกได้เป็นสองตอน คือน้ำจากขนรากเคลื่อนที่ผ่านเข้า stele การเคลื่อนที่แบบนี้มีชื่อว่า radial movement และหลังจากนั้นน้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ยอดโดยผ่าน xylem ของราก ลำต้น และใบ เราเรียกการเคลื่อนที่ของน้ำตอนที่สองนี้ว่า upward movement (or ascent of sap)

## II. RADIAL MOVEMENT OF WATER

การเคลื่อนที่ของน้ำจากขนรากผ่าน cortex เข้าจนถึง stele เกิดขึ้นได้สองทางคือน้ำจากขนรากจะเคลื่อนที่ผ่านไปตาม เซลล์ของ cortex จากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่ง จนกระทั่งถึง stele อีกทางหนึ่งน้ำจะออกจากขนรากผ่าน cortex ไปตาม intercellular space จนกระทั่งถึง stele

แม้ว่าในตอน แรก ๆ นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้อธิบายว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากขนรากผ่าน เข้าไปถึง stele เกิดขึ้นเนื่องจาก osmotic pressure แต่ในปัจจุบันนักสรีรวิทยาหลายท่านมีความเชื่อมั่นว่า การเคลื่อนที่ของน้ำดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก water potential gradient และน้ำที่ผ่าน intercellular space มีปริมาณมากกว่าน้ำที่ผ่านไปตาม เซลล์ ทั้งนี้เพราะว่าการเคลื่อนที่ของน้ำผ่าน เซลล์ที่ติดกัน เกิดขึ้นในอัตราที่ช้ามาก และไม่พอกับอัตราการคายน้ำของใบ แคน้ำที่เคลื่อนที่ไปตาม intercellular space ที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านเข้าไปใน stele พอกับอัตราการคายน้ำในสภาพปกติ

## III. UPWARD MOVEMENT OF WATER

หลังจากที่เราพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำจากขนรากเข้าไปสู่ stele แล้ว

ตอนนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของน้ำจาก stele ของรากขึ้นสู่ยอดและใบ นัก-  
 สรรวิทยาได้ให้ความสนใจมานานหลายปี และเริ่มมีการศึกษาเรื่องนี้อย่างจริงจังตั้งแต่ศตวรรษ  
 ที่ 18 ทฤษฎีที่จะใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำจากรากขึ้นสู่ยอดมีอยู่หลายทฤษฎี แต่ทฤษฎีที่จัด  
 ว่าเหมาะสมจะต้องอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำจากรากขึ้นสู่ยอดได้อย่างชัดเจน นั่นคือสามารถ  
 อธิบายว่า น้ำจะเคลื่อนขึ้นไปในที่สูง ๆ (ตามความสูงของต้นไม้) ได้อย่างไร โดยปกติ  
 ต้นพืชจะมีความสูงต่ำกว่า 30 เมตร แต่พืชบางต้นมีความสูงถึง 120 เมตร การที่น้ำจะ  
 เคลื่อนที่จากรากขึ้นลำต้นที่มีความสูงต่ำกว่า 30 เมตร จะต้องใช้พลังงานมากอยู่แล้ว ตั้ง  
 นั้น การเคลื่อนที่ของน้ำในต้นพืชที่สูงกว่า 120 เมตร จะต้องใช้พลังงานสูงมากขึ้น เป็นเท่า  
 ทวีคูณ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำบางทฤษฎีได้รับความสนใจจากนักสรรวิทยา  
 น้อยมาก เพราะ เป็นที่ทราบกันดีว่าทฤษฎีเหล่านั้นไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำได้ทั้ง  
 หหมด อาทิเช่น ทฤษฎี Capillary force ตามปกติ น้ำสามารถขึ้นไปในหลอดเล็ก ๆ ได้  
 ด้วยแรง capillary force ซึ่งเป็นแรงดึงมากกว่าแรงดัน หลอดแก้วยี่งมีขนาดเล็กเท่า  
 ไร น้ำก็ยิ่งขึ้นไปได้สูงมากขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดของท่อลำเลียงน้ำ (vessel) ภายในต้น  
 พืชพบว่าขนาดของท่อลำเลียงน้ำของพืชโดยทั่วไปจะทำให้ระดับน้ำขึ้นได้สูงเพียง 2-3 เซนติ-  
 เมตรเท่านั้น แม้ว่า tracheid จะมีขนาดเล็กกว่า vessel ก็ตามก็ไม่สามารถทำให้น้ำ  
 ขึ้นไปในหลอดของ tracheid ได้ไม่เกิน 6 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีที่ไม่มี  
 ความเหมาะสมที่จะนำไปใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำอื่น ๆ อีก รวมทั้งทฤษฎี air  
 pressure และ vital theory ทฤษฎีต่าง ๆ เหล่านี้ไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่  
 ของน้ำได้ทั้งหมด แต่อาจเป็นส่วนประกอบที่ทำให้ น้ำผ่านไปสู่ยอดได้เท่านั้น

ในปัจจุบัณฑทฤษฎีที่พอจะ อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำได้อย่างมีเหตุผลผลพอกที่จะ เป็น  
 ที่ยอมรับได้นั้นมีเพียง 2 ทฤษฎีเท่านั้นคือ root pressure และ Cohesion-tension  
 theory.

### 3.1 Root Pressure

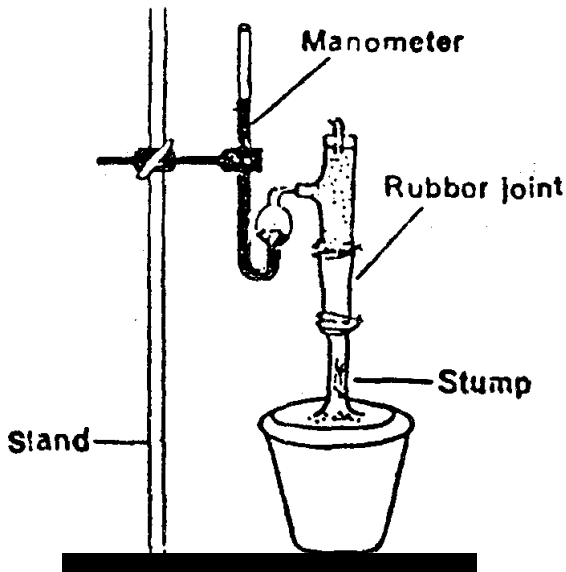
Root pressure เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจาก รากพืชดูดน้ำแบบ active absorption แต่ Levitt ได้ให้ความหมาย root pressure ไว้ว่าเป็นแรง hydrostatic ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก water potential gradient แรงดันที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิด guttation ที่ต้นพืชและทำให้สารละลายใน xylem ไหลออกมาหลังจากที่เราตัดลำต้นพืช เมื่อเราตัดลำต้นพืชที่โคนต้นแล้วเอาหลอดแก้วสวมลงไปบนต้นตอจะพบว่า สารละลายในต้นตอถูกดันขึ้นมาในหลอดแก้วปริมาณสารละลายที่ออกมาจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและขนาดของระบบราก

เป็นที่ทราบดีว่า root pressure เป็นแรงดันที่ทำให้น้ำผ่านขึ้นไปในของลำต้นได้แต่จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นไม่พอเพียงที่จะอธิบายสิ่งเหล่านี้ได้คือ

1. Root pressure ในรากพืชที่มีค่ามากกว่า 2 bar นั้นหาได้ยากตามปกติจะมีค่าต่ำกว่า 2 bar ถ้าว่ากันตามทฤษฎี แรงดันดังกล่าวสามารถทำให้น้ำขึ้นไปได้สูงไม่เกิน 10 เมตร จะเห็นได้ว่า root pressure ไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนของน้ำในต้นพืชที่สูง ๆ ได้

2. อัตราการคายน้ำของพืชตามปกติประมาณ 1,000 เซนติเมตรต่อหนึ่งชั่วโมง และอัตราสูงสุดที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันประมาณ 4,500 เซนติเมตรต่อหนึ่งชั่วโมง แต่ root pressure ทำให้น้ำเคลื่อนที่ด้วยอัตราเพียง 1 ถึง 10 เซนติเมตรต่อหนึ่งชั่วโมงเท่านั้น ในเวลาที่พืชคายน้ำตามปกติ root pressure ไม่สามารถส่งน้ำให้ทันกับน้ำที่คายน้ำออกทางใบ ถ้าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในต้นพืชเกิดขึ้นด้วยแรง root pressure เพียงอย่างเดียว

3. โดยปกติ root pressure จะเพิ่มขึ้นขณะที่พืชเกิดการคายน้ำในอัตราค่า ความชื้นในดินสูงหรือสภาพ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ในขณะที่พืชคายน้ำในอัตราสูง เราไม่สามารถวัดขนาดของ root pressure ได้ (เกิดขึ้นมาก) ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่า root pressure มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำภายในต้นพืชอย่างมาก



รูปที่ 1 แสดงการเกิด root pressure ของพืชที่ปลูกในกระถาง

#### 4. น้ำในxylem

จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึง (negative pressure) มากกว่าแรงดัน (positive pressure) ในขณะที่พืชคายน้ำ root pressure เป็นแรงดันชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในต้นพืช

#### 5. ในพืชบางชนิด

ไม่เคยพบว่ามีแรง root pressure อาทิเช่น พืชจำพวก gymnosperm เราอาจสรุปได้ว่า root pressure เป็นแรงส่วนหนึ่งที่ทำให้น้ำไหลขึ้นสู่ยอดพืช แต่ไม่ใช่เป็นแรงที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำได้ทั้งหมด

### 3.2 Cohesion-tension theory

ทฤษฎีนี้มีชื่อเรียกได้หลายชื่อ ซึ่งได้แก่ transpiration pull, transpiration stream transpiration-cohesion-tension mechanism หรือ shoot tension ก็ได้

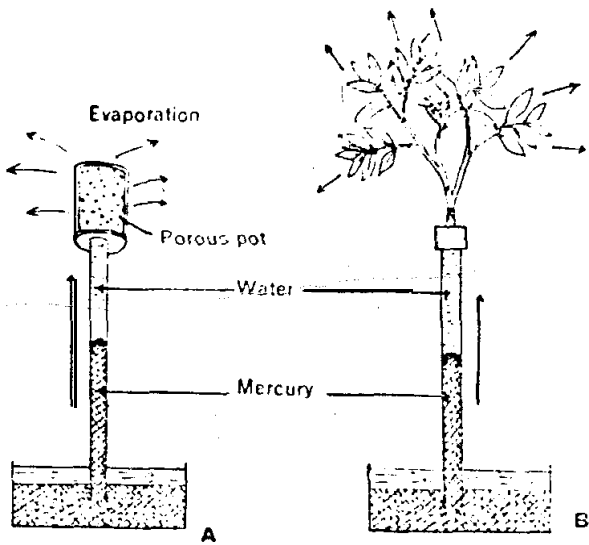
เนื่องจากน้ำสร้าง hydrogen bond ขึ้นระหว่างโมเลกุล น้ำจึงมีแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุลสูงมาก ประกอบกับขณะที่ พืชคายน้ำจะ เกิดแรงดึงระหว่างโมเลกุลของไอน้ำที่ระเหยออกจากใบ กับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายใน xylem ของพืช ทำให้น้ำเคลื่อนที่จากข้างล่างขึ้นไปข้างบนลำต้นพืช และระเหยออกทางใบในที่สุด ขณะที่พืชคายน้ำออกทางใบ

ทำให้เกิดแรงดึง (negative pressure) ขึ้นภายใน, xylem ได้มีการคำนวณขนาดของแรงดึงสูงสุดที่เกิดโดยที่ไม่ทำให้สายน้ำขาดจากกัน ผลปรากฏว่าแรงดึงดังกล่าวมีขนาดถึง  $-1275 \text{ bar}$  (จากทฤษฎี) ต่อมาได้มีการพิสูจน์ว่าแรงดึงขนาด  $-1275 \text{ bar}$  ไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ในที่สุดได้มีการคำนวณออกมาว่า น้ำสามารถทนต่อแรงดึงได้ถึง  $-30 \text{ bar}$  โดยที่น้ำจะเคลื่อนที่ใน xylem ไปตามแรงดึงนั้นโดยที่น้ำไม่ขาดสาย ถ้าแรงดึงเกินกว่านี้ (คิดลบมากกว่า  $30 \text{ bar}$ ) จะทำให้น้ำใน xylem ขาดออกจากกัน แรงดึงขนาดประมาณ  $-30 \text{ bars}$  ก็พอที่จะทำให้เคลื่อนที่ไปในที่สูงสุดของต้นไม้ที่สูงกว่า 120 เมตร ได้อย่างสะดวก

ได้มีการศึกษาหาความสัมพันธ์ขนาดของท่อ vessel กับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในท่อ พบว่าเมื่อท่อ vessel มีขนาดลดลงจะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจะเพิ่มขึ้น

เราสามารถจัดเครื่องมือแสดงการเกิดของ cohesion ของน้ำได้โดยใช้หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก ๆ 2 หลอด จุ่มปลายข้างหนึ่งของหลอดแก้วทั้งสองลงในอ่างปรอท หลังจุ่มหลอดแก้วลงไปในอ่างปรอทแล้ว จะพบว่าปรอทในอ่างจะเคลื่อนที่ขึ้นมาในหลอดแก้วสูงจากระดับปรอทในอ่าง 760 มิลลิเมตร เติมน้ำให้เต็มหลอดแก้วทั้งสอง นำฟองน้ำที่อึดด้วยน้ำวางไว้บนปลายหลอดแก้วหลอดที่หนึ่ง ส่วนปลายของหลอดที่สองดูดด้วยจุกยางที่เจาะรูน้ำกึ่งไม้สัดเสียบลงในรูของจุกยางให้กึ่งไม้อยู่ในระดับน้ำในหลอด ถ้าภายในหลอดแก้วที่เหนือปรอทไม่มีอากาศอยู่เลย เราจะสังเกตเห็นปรอทในหลอดแก้วทั้งสองสูงขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าจัดเครื่องมือการทดลองให้ถูกต้องจะพบว่าปรอทอาจเคลื่อนที่สูงขึ้นจากระดับปรอทในอ่างถึง 1 เมตร หรือมากกว่า สิ่งที่ควรพิจารณาในเรื่องการจัดการทดลองคือ ต้องใช้ผ้าที่ไม่มีอากาศอยู่เลย หรือมีน้อยที่สุด ต้องหนีกรอยต่อต่าง ๆ มิให้อากาศเข้าได้ ต้องใช้ภาชนะที่คัดในน้ำและต้องใช้หลอดแก้วที่สะอาด

ผลการทดลองนี้ นอกจากจะแสดงให้เห็นว่า น้ำมีแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุลแล้ว ยังแสดงให้เห็นว่าอากาศที่น้ำจะเหยียดออกจากฟองน้ำหรือการที่พืชคายน้ำทำให้เกิดแรงดึง



รูปที่ 2 แสดงการเกิด cohesive force

(A) จากการระเหยน้ำ, และ

(B) จากการคายน้ำของพืช

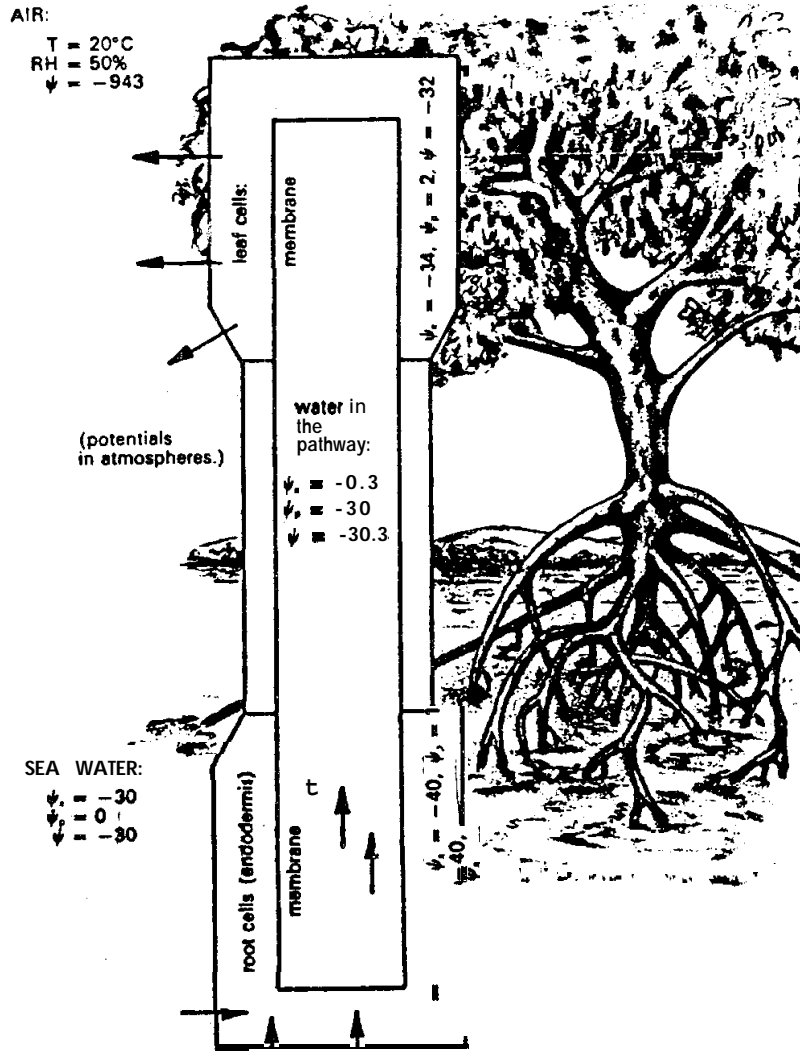
ในท่อ xylem จนน้ำถึงยอด พืชหรือไม้ ถ้าคำนวณความตลึงแรงที่ใช้ดึงน้ำขึ้นสู่ที่สูง 120 เมตร จะต้องมียขนาดเท่ากับ -12 bars และต้องมี แรงตลึงขนาดอีกเท่าตัวหนึ่ง เพื่อเอาชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำใน xylem นอกจากนี้จะต้องมีแรงตลึงขนาดเท่ากับ -6 bars ดึงน้ำผ่าน xylem ของราก ดังนั้น แรงตลึงที่จะต้องทำให้น้ำผ่านจากรากขึ้นไปสู่ยอดพืชที่สูง 120 เมตร จะต้องเป็นแรงขนาดเท่ากับ -30 bars (-12, -12, -6) เราได้ทราบมาแล้วว่าสายน้ำใน xylem สามารถทนต่อแรงตลึงได้ประมาณ -30 bars โดยที่สายน้ำจะไม่ขาด ดังนั้นน้ำจึงขึ้นไปสู่ยอดของพืชที่สูง 120 เมตรด้วยแรงตลึง -30 bars ได้อย่างสะดวกโดยที่สายน้ำไม่ขาด แต่โดยทั่วไปต้นไม้ที่มีความสูงขนาดนี้มีน้อยมาก และส่วนมากจะมีความสูงไม่เกิน 30 เมตร ตามทฤษฎีต้องใช้แรงตลึงประมาณ -12 bars เท่านั้นที่จะทำให้น้ำเคลื่อนที่ใน xylem ถึงยอดพืช แรงตลึงในใบที่ชนิดต่าง ๆ มีขนาดแตกต่างกัน ใบพืชจำพวก herbaceous ส่วนมาก มักจะมีแรงตลึงประมาณ -8 ถึง -12 bars ส่วนในพืชยืนต้นส่วนมากจะมีแรงตลึงในใบประมาณ -20 ถึง -35 bars และในต้นพืชทุกชนิดจะมีแรงตลึงพอที่จะ

ขึ้นภายในหลอดแก้ว ทำให้เคลื่อนที่ขึ้นตามแรงตลึงนั้น ขณะที่น้ำเคลื่อนที่ขึ้นนั้น จะเกิดสุญญากาศขึ้นภายในหลอดแก้วปรอทจึงเคลื่อนที่ขึ้นตามสายน้ำในหลอด ดังนั้นจากการทดลองดังกล่าวอาจสรุปได้ว่า การคายน้ำทำให้เกิดแรงตลึง-ดึงน้ำขึ้นไปในหลอดแก้วได้

ปัญหาที่ควรพิจารณา

ต่อไปคือขนาดของแรงตลึง พืชบางชนิดมีความสูงเกิน 120 เมตร แรงตลึงที่เกิดขึ้น เนื่องจากมีการคายน้ำพอเพียงที่จะดึงน้ำผ่านแรงเสียดทาน

ทำให้น้ำ เคลื่อนที่ขึ้นสู่ยอดได้อย่างสะดวกไม่ว่าพืชนั้นจะมีความสูงมากน้อยขนาดไหนก็ตาม  
 (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงค่า water potential ของส่วนต่าง ๆ ของพืช



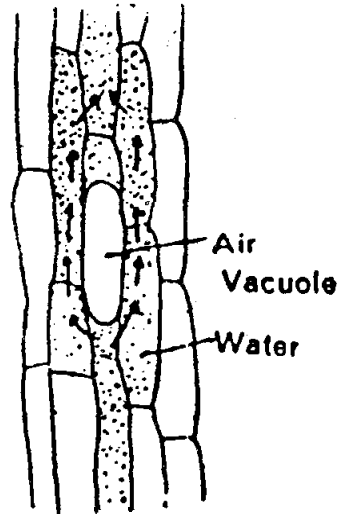
ขณะที่ใบพืชคายน้ำ น้ำจากผนังเซลล์จะระเหยออกสู่ intercellular space ทำให้ water potential ของผนังเซลล์ลดลงจึงเกิดมีการเคลื่อนที่ของน้ำจาก protoplasm และ vacuole ที่อยู่ใกล้เคียงไปสู่ผนังเซลล์ที่สูญเสียน้ำ ดังนั้นการคายน้ำของใบพืชจึงทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่ง และจากที่หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่งด้วยแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุล ด้วยวิธีการนี้น้ำจึงถูกดึงขึ้นสู่ยอดพืชด้วยแรงที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำของใบ และแรงเกาะกันระหว่างโมเลกุล และแรงดึงนี้เกิดขึ้นต่อกันตลอดความยาวของท่อ xylem จะเห็นได้ว่าถ้าการคายน้ำในต้นพืชสูง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในต้นพืชก็จะสูงขึ้นด้วย และถ้าในเวลาที่มีมีการคายน้ำน้อย อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในต้นพืชก็จะลดลงด้วย (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)

แม้ว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใน xylem ขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำของใบ แต่ก็ยังมีปัจจัยอื่นที่ เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำ อาทิ เช่นการใช้น้ำในขบวนการทางสรีรวิทยา- การสังเคราะห์แสง, การสร้างผนังเซลล์ขึ้นใหม่, hydrolysis, hydration ขบวนการเหล่านี้จะต้องใช้น้ำ น้ำที่ถูกใช้ไปจะทำให้ water potential ลดลง และทำให้น้ำเคลื่อนที่ใน xylem ได้ ในขณะที่ใบไม่คายน้ำน้ำภายใน xylem ก็ยังเคลื่อนที่ได้ แต่เคลื่อนที่ในอัตราที่ช้ามาก ๆ คือประมาณ 1 เมตร/ชั่วโมงของอัตราการเคลื่อนที่ตามปกติ การเคลื่อนที่นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้น้ำในขบวนการต่าง ๆ นั้นเอง ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในขณะที่ไม่มีการคายน้ำเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ามาก แต่ปริมาณน้ำที่เคลื่อนที่ไปนั้นพอกับความต้องการของขบวนการต่าง ๆ ที่ใช้น้ำ

ถึงแม้ว่านักสรีรวิทยาส่วนมากยอมรับว่าน้ำสามารถเคลื่อนที่สู่ส่วนยอดของลำต้นได้ เนื่องจากแรงดึงที่เกิดขึ้นที่ยอด แต่ก็มีนักสรีรวิทยาบางท่าน แสดงหลักฐานคัดค้านทฤษฎีแรงดึงนี้ อาทิ เช่น

1. จากรูปที่ 2 พบว่าถ้ามีฟองอากาศเกิดขึ้นในหลอดแก้วเพียงเล็กน้อยเท่านั้น น้ำที่ถูกดูดขึ้นมาในหลอดแก้วด้วยแรงดึงปกติ (แรงที่เกิดจากการระเหยน้ำหรือแรงที่เกิดจากการคายน้ำของกิ่งพืชสด) จะขาดสายทันที ทำให้น้ำส่วนล่างไม่สามารถถูกดูดขึ้นมา

ได้ สภาพเช่นนี้อาจเกิดขึ้นในต้นพืชได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออุณหภูมิกลางวันและกลางคืนต่างกันมาก ๆ ก็จะมีโอกาสทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในต้นพืชได้ง่าย เมื่อฟองอากาศขึ้นภายในท่อ xylem สายน้ำจะขาดเป็นท่อน ๆ ในเรื่องนี้มีผู้อธิบายว่าถ้าฟองอากาศขึ้นภายใน vessel สายน้ำจะขาดออกจากกัน แต่แรงดึงในท่อ vessel ที่อยู่ข้างเคียงจะช่วยดึงน้ำให้ผ่านขึ้นข้างบนได้ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)



รูปที่ 4 แสดงช่องว่างที่เกิดขึ้นในท่อลำเลียงน้ำ

2. ในสภาพที่ลำต้นพืชถูกตัดขาดออกครึ่งหนึ่ง 2 ข้างตรงข้ามกัน แต่อยู่คน

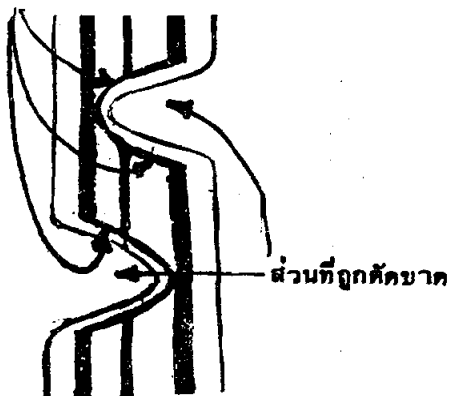
ละระดับความสูง (ดังรูปที่ 5 )

ถ้าพิจารณาตามทฤษฎีแล้วสายน้ำใน xylem จะถูกตัดขาดจากกันและถ้าสายน้ำถูกตัดขาดออกจากกันแล้วน้ำก็ไม่สามารถเคลื่อนที่จากข้างล่างขึ้นไปข้างบนด้วยแรงดึงได้

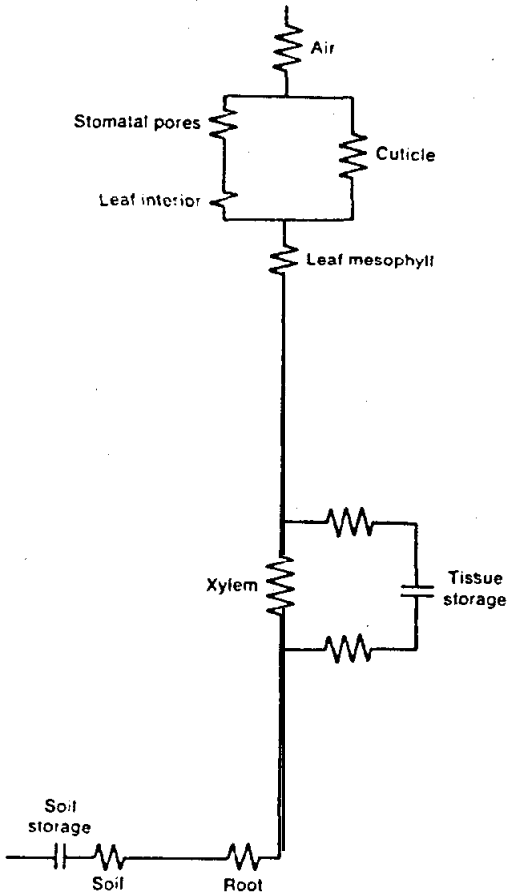
สภาพทั้งสองนี้ที่กล่าว

มาแล้ว เป็นข้อโต้แย้งการเคลื่อนที่ของน้ำในต้นพืชด้วยแรงดึงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการคายน้ำของใบ แต่ผู้กล่าวแย้งมิได้กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ใน

ส่วนของท่อลำเลียงที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 5 แสดงสภาพที่ลำต้นตัดขาดครึ่งหนึ่งทั้งสองด้าน (ภาพทศตามยาว) และท่อลำเลียงจะมีการต่อเนื่องกันในเวลาต่อมา



**รูปที่ 6** แสดงความต้านทานของการเคลื่อนที่ของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อพืช

จากกฎของ Ohm ดังนี้

$$\text{กระแส} = \frac{\text{ความแตกต่างของแรงเคลื่อน}}{\text{ความต้านทาน}}$$

จากสูตรดังกล่าวเราสามารถดัดแปลงมาใช้ในการเคลื่อนที่ของน้ำระหว่างจุด

2 จุด ได้ดังนี้

$$\text{Rate of water movement} = \frac{\psi_1 - \psi_2}{\text{Ex}}$$

การเคลื่อนที่ของน้ำที่ต่ำกว่าทฤษฎี ดังนั้น

ในปัจจุบันนักสรีรวิทยาส่วนมากจึงยอมรับทฤษฎีนี้

IV. THE RATE OF WATER MOVEMENT IN PLANTS

หลังจากที่เราได้

ศึกษาการดูดน้ำของราก, การคายน้ำของใบ และการเคลื่อนที่ของน้ำในรากและลำต้นมาแล้ว ต่อไปเราจะพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำในต้นพืช ถ้าเรายอมรับว่าการเคลื่อนที่ของน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่าง water potential ของสารละลายในที่ 2 แห่ง เราก็สามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำระหว่างจุด 2 จุด ในต้นพืชได้โดยใช้สูตร

$\psi_1$  และ  $\psi_2$  คือ water potential ของจุดสองจุดในต้นพืชเช่น ดินกับ  
เซลล์ผิว, เซลล์ผิวกับ xylem หรือ xylem ของใบกับอากาศ เป็นต้น

$E_r$  คือความต้านทานรวมระหว่างจุดสองจุดนั้นมีหน่วยเป็น  $\text{erg/cm}^3$   
 $\text{dynes/cm}^2$

จะเห็นว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำในต้นพืชนอกจากจะขึ้นอยู่กับ water  
potential gradient ระหว่างจุดสองจุดแล้วยังขึ้นอยู่กับความต้านทานของจุดทั้งสองนั้น  
ด้วย เราสามารถหาค่า water potential ณ จุดใดจุดหนึ่งของต้นพืชได้โดยใช้  
pressure chamber หรือเรียกอีกอย่างว่า pressure bomb แต่เครื่องมือดังกล่าว  
สามารถใช้หา water potential ของส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ที่มีขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น

ส่วน ค่าของความต้านทานอาจหาค่าได้ตามแบบการหาค่าความจุไฟฟ้าของ  
capacitor ที่ต่อกันดังรูปที่ 6