

บทที่ 1

บทนำ

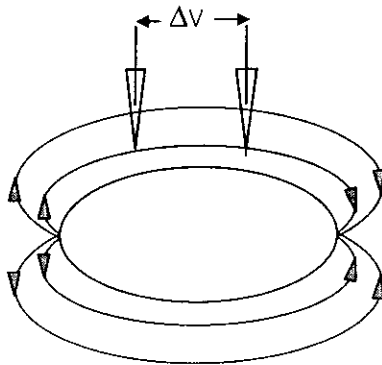
1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในสิ่งแวดล้อม สารโลหะเป็นสารพิษกลุ่มใหญ่กลุ่มหนึ่ง ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อาจพบได้ตามธรรมชาติหรือจากโรงงานอุตสาหกรรม การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหิน อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการถลุงแร่ สารโลหะส่วนมากมีคุณสมบัติในการเกิดพิษคล้ายคลึงกัน (ไมตรี, 2534) เช่น มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ การขนส่งออกซิเจนระหว่างเซลล์และกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) ในโครโมโซม เป็นต้น ปัจจุบันสารโลหะที่สร้างปัญหาให้กับชุมชนและสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม สรหนู นิเกิล เบอริลเลียม แบเรียม โครเมียม อลูมิเนียม แมงกานีส เซเลเนียมและพลวง (ไมตรี, 2534) โดยขบวนการเพิ่มความเข้มข้นทางชีววิทยา (bioconcentration) และห่วงโซ่อาหาร (food chain) ทำให้ความเข้มข้นของสารพิษเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ความเป็นพิษของสารพิษแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมี ปริมาณสารพิษที่ได้รับ การเปลี่ยนแปลงของสารพิษภายในเซลล์ กลไกทางชีวเคมีและสภาวะแวดล้อมของเซลล์นั้นๆ

ในพืช สารโลหะบางชนิดมีผลต่อการเจริญเติบโต โดยจะมีผลในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น อลูมิเนียม (Rout *et al.*, 2001) มีผลกระทบต่อกระบวนการแบ่งเซลล์บริเวณปลายรากและรากแขนง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง หน้าที่ และการทำงานของผนังเมมเบรนของราก และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการลำเลียงธาตุที่จำเป็นบางชนิด ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัสและเหล็ก ส่วนแคดเมียม (Das *et al.*, 1997) เมื่อแพร่เข้าสู่เซลล์ทำให้เซลล์ถูกทำลายทั้งทางด้านกายภาพและพันธุกรรม โดยยับยั้งการแบ่งเซลล์ (cell division) การเปลี่ยนแปลงโครโมโซม ทำให้ไมโทคอนเดรียเสียสภาพ การดูดซึมสารอาหารและน้ำลดลง

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าผลที่เกิดขึ้นมักจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของการดูดซึมแร่ธาตุต่างๆ และการเจริญเติบโตหยุดชะงัก โดยทั่วไปเราวัดการเจริญเติบโตของพืช โดยวัดขนาดของลำต้นหรือส่วนสูงที่เพิ่มขึ้นและตรวจสอบปริมาณแร่ธาตุที่พืชดูดซึมเข้าไป โดยการนำพืชชนิดนั้นมาผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง โดยการเผาให้เป็นเถ้า (dry ashing) หรือย่อยเปียก (wet digestion) แล้ววิเคราะห์หาปริมาณสารโดยวิธีทางเคมี (แมนและอมร, 2539) แร่ธาตุต่างๆ เหล่านี้จะถูกดูดซึมโดยราก ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตและ

การดูดซึมแร่ธาตุต่างๆ เหล่านี้โดยวิธีอื่นในขณะที่พืชยังอยู่ระหว่างการเจริญเติบโต โดยพิจารณาว่าในกระบวนการเจริญเติบโตของพืช หน่วยพื้นฐานของการเจริญเติบโตคือเซลล์ โดยเซลล์แต่ละเซลล์จะถูกล้อมด้วยผนังเมมเบรน ซึ่งมีหน้าที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ แยกสารละลายภายในเซลล์ออกจากภายนอกเซลล์ ทำให้ไอออนต่างๆ ภายในและภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นต่างกัน ความเข้มข้นที่ต่างกันนี้มีส่วนทำให้ไอออนชนิดต่างๆ เคลื่อนที่ผ่านผนังเมมเบรน การเคลื่อนที่ของไอออนต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า ฟลักซ์ไอออน (ion flux) หรือกระแสไฟฟ้าไอออน ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าคงตัว (steady ionic current) ปริมาณน้อยๆ ซึ่งเมื่อไหลผ่านไปนสารละลายที่ล้อมรอบเซลล์ จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดที่กระแสไฟฟ้าไอออนไหลผ่าน



ภาพประกอบ 1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ภายนอกเซลล์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านสารละลายภายนอกเซลล์

ดังนั้นหากวัดความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ได้ก็สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าไอออนได้ โดยพิจารณาจากกฎของโอห์ม (Miller *et al.*, 1986)

$$j = \frac{\bar{E}}{\rho}$$

โดย

$$\bar{E} = \frac{-\Delta V}{\Delta r} \hat{e}_E$$

ดังนั้น

$$j = \frac{-\Delta V}{\rho \Delta r} \hat{e}_E$$

เมื่อ	J	= ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m^2)
	\bar{E}	= สนามไฟฟ้า (V/m)
	ρ	= สภาพต้านทานของสารละลาย (Ωm)
	Δr	= ระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง
	\hat{e}_E	คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของสนามไฟฟ้า
		เครื่องหมายลบ (-) แสดงว่าสนามไฟฟ้าจะมีทิศไปในทิศที่ศักย์ไฟฟ้าลดลง

กระแสไฟฟ้าไอออน J ที่ไหลผ่านสารละลายจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV และหาก Δr มีค่าน้อย สนามไฟฟ้าในระยะ Δr นี้จะมีค่าคงที่ นั่นคือเมื่อทราบค่าสภาพต้านทาน ρ จะสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นกระแส J ได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV ที่วัดระหว่างจุดสองจุดที่อยู่ห่างกัน Δr และยิ่ง Δr เล็กลงเท่าใด ค่าความหนาแน่นกระแส J ก็จะคำนวณได้ใกล้ค่าจริงมากขึ้น แต่ ΔV ที่วัดได้ก็จะลดลงเช่นกัน การวัด ΔV ส่วนใหญ่จะใช้ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์อิเล็กโทรด (Ag/AgCl electrode) ที่อยู่ในไมโครปิเปตแก้ว (glass micropipette) อิเล็กโทรดชนิดนี้ส่วนใหญ่มีขีดจำกัดในการตรวจวัดประมาณ 10 ไมโครโวลต์ (Nuccitelli, 1983) ทำให้ไม่สามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไอออนปริมาณน้อยๆ ได้

ในปี ค.ศ.1974 Jaffe และ Nuccitelli ได้พัฒนาระบบไวเบรตติ้งโพรบ (vibrating probe) ที่มีขีดจำกัดในการตรวจวัดดีกว่าอิเล็กโทรดธรรมดาถึงประมาณ 1,000 เท่า ต่อมา Jaffe และ Nuccitelli (1977) ได้ใช้ระบบดังกล่าวศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในระบบต่างๆ ของทั้งเซลล์พืชและสัตว์ พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไอออนเกิดขึ้นในระบบที่มีการเจริญเติบโต

ในพืชระบบที่ศึกษากันมากคือราก (Jaffe, 1985; Weisenseel *et al.*, 1979; Miller *et al.*, 1986; Miller, 1989; Ryan *et al.*, 1992) และเอ็มบริโอ (Rathore and Robinson, 1989; Thavarungkul, 1997) โดยการศึกษาเอ็มบริโอของปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Thavarungkul, 1997) และเอ็มบริโอของแครอต (Rathore and Robinson, 1989) พบว่าขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอ นอกจากนี้แล้ว Rathore และ Robinson (1989) ยังพบว่าค่า pH ของสารละลายภายนอกเซลล์มีผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์

ในรากพืช Weisenseel และคณะ (1979) ศึกษาข้าวบาร์เลย์ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากบริเวณที่มีการยึดตัวและปลายขนราก และกระแสไฟฟ้าจะมีทิศออกจากรากในบริเวณถัดไป Miller และคณะ (1986) ศึกษารากถั่ว (*Trifolium repens* L.) และ Miller (1989) ยังได้ศึกษาราก

ข้าวโพดด้วย โดยพบว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนจะคล้ายคลึงกับในข้าวบาร์เลย์ และขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารละลายภายนอก

นอกจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH แล้วการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไอออนของโลหะบาง ชนิดจะมีผลต่อปริมาณไอออนที่ผ่านเข้าออกเซลล์ในสิ่งมีชีวิต เช่น ในสาหร่ายน้ำเค็ม (*Chara corallina*) Takano และ Shimmen (1999) พบว่าเมื่อปริมาณไอออนของอลูมิเนียมในสารละลาย เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณไอออนที่ผ่านเข้าออกเซลล์ลดลง เช่นเดียวกับในรากข้าวสาลี Ryan และ คณะ (1992) พบว่าเมื่อรากข้าวสาลีพันธุ์ Scout 66 ได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.5 กระแสไฟฟ้าไอออนและการยึดของรากจะถูกยับยั้ง Ryan และคณะ (1992) เสนอว่ากระแสไฟฟ้า ที่ตอบสนองต่ออลูมิเนียมส่วนใหญ่เกิดจาก H^+ , Ca^{2+} และ Cl^- ที่พุ่งเข้าบริเวณปลายราก

จากที่กล่าวมาแล้วจะพบว่า กระแสไฟฟ้าไอออนจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการเจริญเติบโต ดังนั้น ถ้าการเจริญเติบโตมีการเปลี่ยนแปลง กระแสไฟฟ้าไอออนที่เกิดขึ้นอาจเปลี่ยนแปลงด้วย ถ้าพืชถูก ยับยั้งการเจริญเติบโตด้วยสารพิษ คาดว่าจะทำให้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนเปลี่ยนแปลงไป จากเดิม หากทราบความสัมพันธ์ของรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนกับการเจริญเติบโตขณะที่พืชได้รับ สารพิษ อาจใช้รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนเป็นตัวบ่งบอกความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของสารพิษบางชนิดต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน เนื่องจากทานตะวันเป็นพืชเศรษฐกิจ และจากการทดสอบเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการพบว่า ทานตะวันใช้เวลาในการงอกน้อย รากตรงและแข็งแรงเหมาะสมกับการศึกษาด้วยระบบไวเบรติง โพรบและสามารถวัดการเจริญเติบโตได้ง่าย โดยวัดความยาวของรากที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นข้อมูลจาก งานวิจัยอาจบอกถึงความสัมพันธ์ของสารพิษกับการเจริญเติบโตและกระแสไฟฟ้าไอออนของราก ทานตะวันเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีววิทยา (bioindicator) ในสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

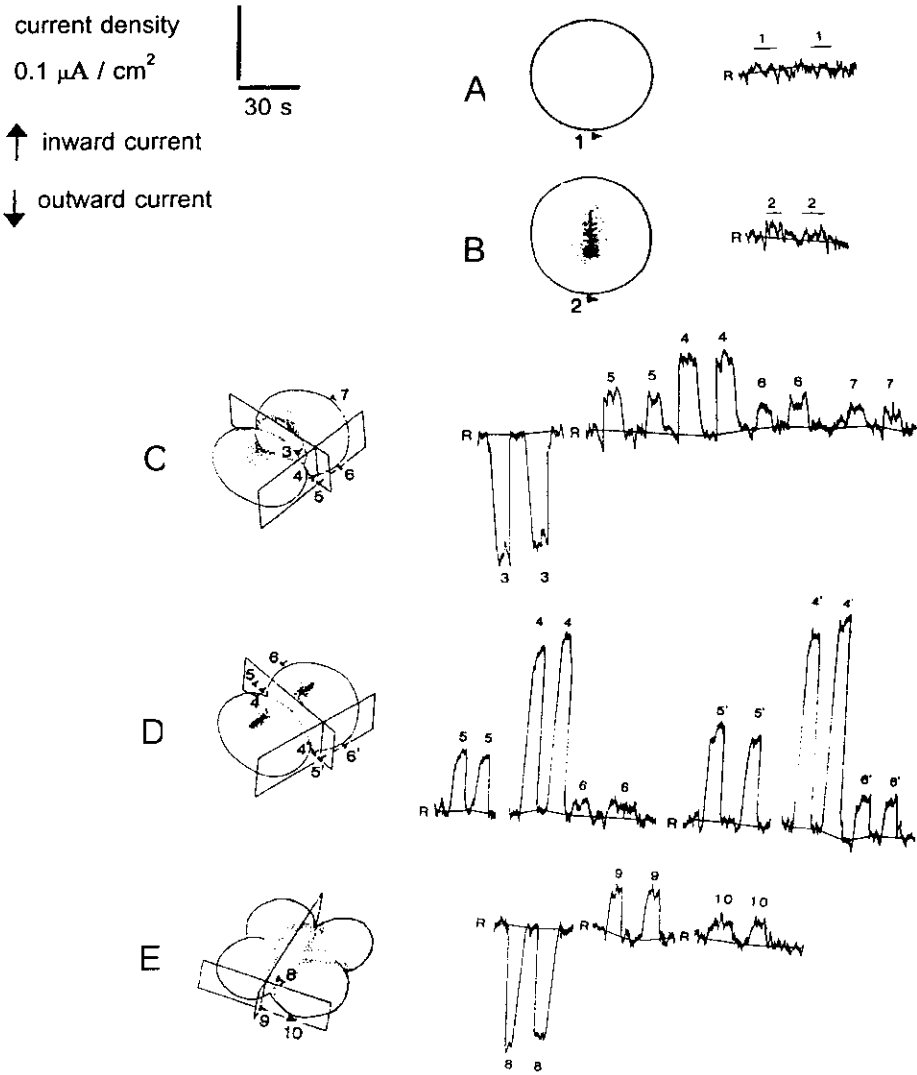
กระแสไฟฟ้าชีวภาพจากเซลล์หรือเนื้อเยื่อ ที่ไหลผ่านสารละลายรอบๆ เซลล์หรือเนื้อเยื่อ เป็น กระแสไฟฟ้าคงที่ขนาดน้อยๆ ในระดับไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กระแสไฟฟ้างกล่าว สามารถวัดได้ โดยวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แล้วจึงนำมา คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีปริมาณน้อย ดังนั้นความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยด้วยเช่นกัน อุปกรณ์ที่นำมาวัดค่ากระแสไฟฟ้าเหล่านี้ จึงต้องมีประสิทธิภาพสูง ในปี ค.ศ.1974 Jaffe และ Nucitelli ได้ประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ไวเบรติง

โพรบ เพื่อใช้วัดกระแสไฟฟ้าเหล่านี้ และพบว่าระบบไวเบรติงโพรบที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถวัดกระแสไฟฟ้าชีวภาพได้ถึงระดับ 10 นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และได้ใช้ระบบดังกล่าวศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในระบบต่างๆ ทั้งของเซลล์สัตว์และเซลล์พืช

1.2.1 กระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์สัตว์

ในปี ค.ศ. 1983 Kline และคณะ ใช้ระบบไวเบรติงโพรบวัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านเซลล์ไข่ของกบ *Xenopus Laevis* ขณะเซลล์แบ่งตัวในระยะต่างๆ (ภาพประกอบ 2) พบว่า ก่อนการแบ่งเซลล์ครั้งแรก (first cleavage) เซลล์จะสร้างเมมเบรนใหม่ระหว่างขั้วเซลล์ เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณดังกล่าว (ภาพประกอบ 2B) พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่เซลล์ ด้วยขนาด 0.02 ± 0.02 (SD, $n=22$) ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเซลล์เว้าตัวแบ่งเซลล์ออกเป็นสองเซลล์ (ภาพประกอบ 2C) พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากบริเวณเมมเบรนใหม่ใกล้รอยต่อกับเมมเบรนเก่าด้วยขนาด 0.43 ± 0.26 (SD, $n=29$) ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 2C ตำแหน่ง 3) และกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณขั้วเซลล์ทั้งสอง ด้วยขนาดที่น้อยกว่า จากนั้นเซลล์จะแบ่งตัวครั้งที่สอง (second cleavage) โดยสร้างเมมเบรนใหม่ระหว่างขั้วเซลล์ของเซลล์ใหม่ทั้งสอง (ภาพประกอบ 2E) แล้วเว้าตัวแบ่งเซลล์ออกเป็นสี่เซลล์ใหม่ พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกบริเวณเมมเบรนใหม่ด้วยขนาด 0.45 ± 0.15 (SD, $n=10$) ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 2E ตำแหน่ง 8) และกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณเมมเบรนเก่าและขั้วเซลล์ของเซลล์ใหม่เช่นเดียวกับการแบ่งเซลล์ครั้งแรก ต่อมา Overall และ Jaffe (1985) ได้วัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านไข่แมลงวันหลังจากปฏิสนธิ ในระยะต่างๆ พบว่า ระหว่างการเจริญเติบโตในระยะที่ไข่สะสมอาหาร พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณส่วนหน้าของไข่ (anterior pole) ด้วยขนาด 10 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และในระยะที่ไข่สร้างเนื้อเยื่อหุ้มตัวอ่อนพบกระแสไฟฟ้าไอออนขนาด 10 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีทิศเข้าบริเวณส่วนหลังของไข่ (posterior pole) และในปี ค.ศ. 1989 Sun และ Wyman ใช้ระบบไวเบรติงโพรบ ศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบไข่ของแมลงวัน (*Drosophila melanogaster*) ในระยะต่างๆ พบกระแสไฟฟ้าไอออนขนาดแตกต่างกันทั้งทิศเข้าและทิศออกจากไข่ในแต่ละตำแหน่ง อาจกล่าวได้ว่าขณะเซลล์ไข่ปฏิสนธิและพัฒนาเป็นตัวอ่อน มีไอออนที่สำคัญบางตัวก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไอออน และมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางตลอดระยะการเจริญเติบโตของตัวอ่อน แต่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนคล้ายคลึงกันในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณที่เซลล์กำลังเปลี่ยนแปลง

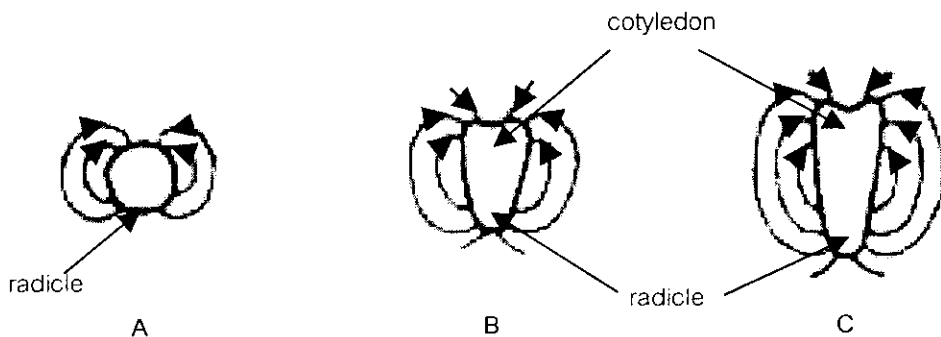
เช่น บริเวณเมมเบรนเก่าที่กำลังสร้างเมมเบรนใหม่ และกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น เช่น บริเวณเมมเบรนที่เกิดใหม่



ภาพประกอบ 2 กระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านเซลล์ไซของกบ ที่ตำแหน่งต่างๆ (แสดงเป็นตัว
 เลข) ขณะเซลล์แบ่งตัวในระยะต่างๆ A) ระยะก่อนการแบ่งเซลล์ B) ระยะเริ่ม
 แบ่งเซลล์ครั้งที่ 1 C) ระยะระหว่างการแบ่งเซลล์ครั้งที่ 1 D) ระยะก่อนการแบ่ง
 เซลล์ครั้งที่ 2 E) ระยะระหว่างการแบ่งเซลล์ครั้งที่ 2 (ภาพจาก Kline และ
 คณะ, 1983)

1.2.2 กระแสไฟฟ้าไอออนในพืช

ในกรณีของพืช ระบบที่ศึกษากันมากคือรากและเอ็มบริโอ Rathore และ Robinson (1989) ได้ศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอแครอต (ภาพประกอบ 3) ระยะแรกเอ็มบริโอมีรูปร่างเป็นทรงกลม (globular) (ภาพประกอบ 3A) จากนั้นพัฒนาเป็นรูปร่างคล้ายหัวใจ (heart) (ภาพประกอบ 3B) และรูปร่างคล้ายตอร์ปิโด (torpedo) (ภาพประกอบ 3C) ตามลำดับ พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะการเจริญเติบโต ในระยะที่เอ็มบริโอมีรูปร่างเป็นทรงกลมนั้นกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณที่จะเจริญเป็นยอดและมีทิศออกบริเวณที่จะเจริญเป็นราก (radicle) ในระยะที่เอ็มบริโอมีรูปร่างคล้ายหัวใจและตอร์ปิโด กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่ใบเลี้ยง (cotyledon) และมีทิศออกจากบริเวณที่จะเจริญเป็นราก เมื่อเปรียบเทียบเอ็มบริโอ 2 สายพันธุ์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตต่างกัน คือ สายพันธุ์ RCC 27 และสายพันธุ์ RCC 48 ที่เติบโตเร็วกว่า พบว่าในระยะที่เอ็มบริโอมีรูปร่างคล้ายตอร์ปิโดมีความแตกต่างของรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน ในสายพันธุ์ RCC 27 กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณใบเลี้ยงและมีทิศออกจากบริเวณที่จะเจริญเป็นราก (ภาพประกอบ 4A) ในขณะที่สายพันธุ์ RCC 48 ที่เติบโตเร็วกว่านั้นกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าทั้งที่บริเวณใบเลี้ยงและบริเวณที่จะเจริญเป็นรากและมีทิศออกจากตอนกลางของเอ็มบริโอ (ภาพประกอบ 4B)

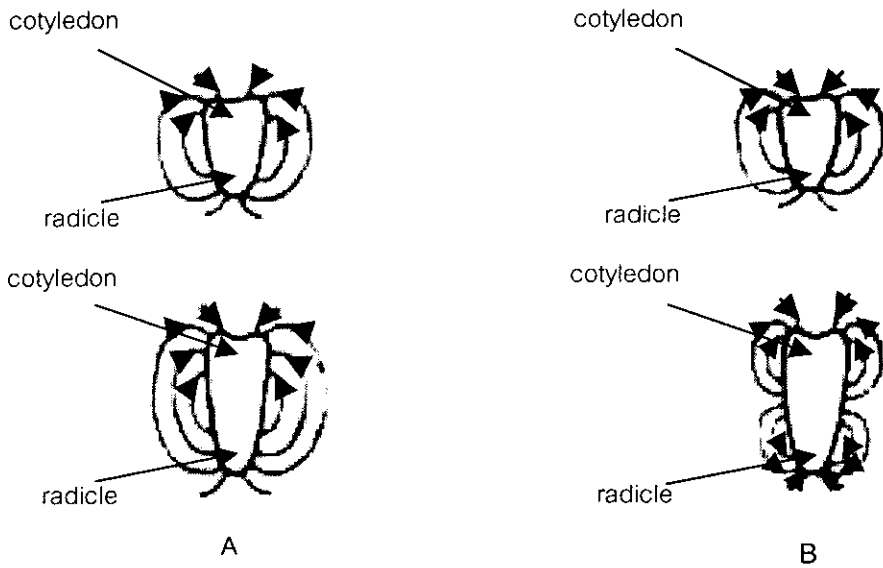


ภาพประกอบ 3 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในระยะต่างๆ ของเจริญเติบโตของเอ็มบริโอแครอต

(A) ระยะแรกเอ็มบริโอมีรูปร่างเป็นทรงกลม (B) ระยะมีรูปร่างคล้ายหัวใจ

(C) ระยะมีรูปร่างคล้ายตอร์ปิโด

(ภาพจาก Rathore และ Robinson, 1989)



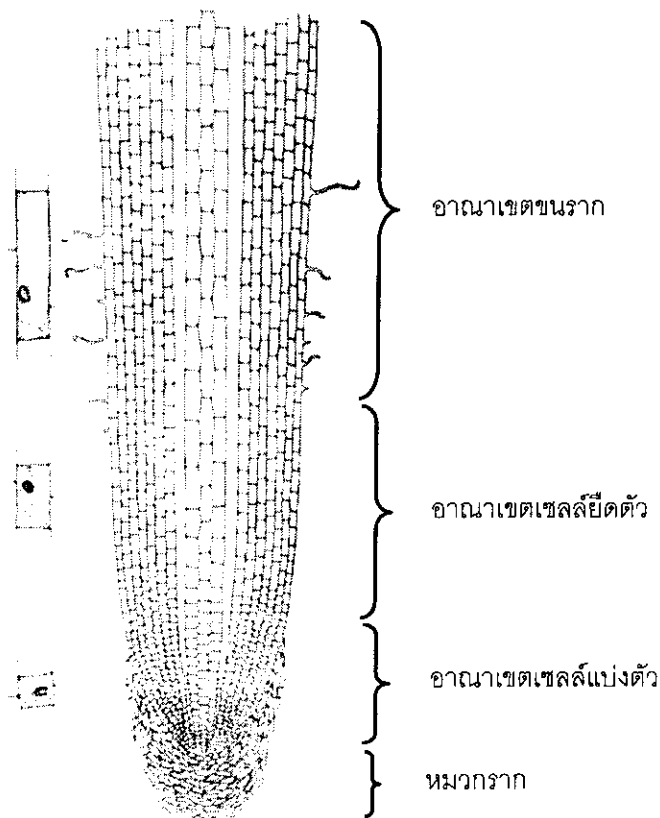
ภาพประกอบ 4 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนของเอ็มบริโอแครอตต่างสายพันธุ์

(A) สายพันธุ์ RCC 27 (B) สายพันธุ์เติบโตเร็ว RCC 48

(ภาพจาก Rathore และ Robinson, 1989)

ต่อมา Thavarangkul (1997) ได้ศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ เอ็มบริโอของปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) ในระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโต โดยในระยะแรกพบกระแสไฟฟ้าไอออนขนาด 1.7 ± 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีทิศออกจากบริเวณที่จะเจริญเป็นราก และมีทิศเข้าสู่ใบเลี้ยงด้วยขนาด $0.3-0.8$ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ต่อมาในระยะที่ 2 ที่ใบเลี้ยงเริ่มขยายตัว พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากบริเวณที่จะเจริญเป็นรากเช่นเดียวกับระยะที่ 1 แต่มีขนาดมากกว่าคือ 2.5 ± 1.5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และในระยะที่ 3 เมื่อเอ็มบริโอขยายตัวใหญ่ขึ้น พบว่ารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนที่พบจะแตกต่างจากระยะที่ 2 คือกระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณที่จะเจริญเป็นรากเปลี่ยนจากเดิมมีทิศออกเปลี่ยนเป็นมีทิศเข้าโดยคาดว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการที่รากกำลังจะงอกออกมาจากเอ็มบริโอ

สำหรับการศึกษาในรากพืช (ภาพประกอบ 5) Weisenseel และคณะ (1979) ได้วัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านรากและขนรากข้าวบาร์เลย์ พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่อาณาเขตหุ้มราก อาณาเขตเซลล์แบ่งตัว และอาณาเขตเซลล์ยึดตัวด้วยขนาด $0.8, 1.1$ และ 2.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนออกจากบริเวณอาณาเขตขนรากด้วยขนาด 0.5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



ภาพประกอบ 5 แสดงอานาเขตต่างๆ ของปลายราก (ภาพจาก Arnett และ Bazinet, 1977)

ในปี ค.ศ.1986 Miller และคณะ ได้ศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านราก และขนรากของพืชตระกูลถั่ว (*Trifolium repens*, L.) ขณะกำลังเจริญเติบโต พบรูปแบบกระแสไฟฟ้าแตกต่างจากที่พบในข้าวบาร์เลย์ กระแสไฟฟ้าไอออนที่พบมี 3 กลุ่มคือ บริเวณหมวกราก จนถึงส่วนต้นของอานาเขตเซลล์ยัดตัวพบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ค้ำปริมาณมาก บริเวณอานาเขตเซลล์ยัดตัวจนถึงบริเวณที่กำลังพัฒนาเป็นขนรากพบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ค้ำออก และบริเวณอานาเขตขนรากพบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ค้ำปริมาณน้อย โดยที่ขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยที่ค้ำอยู่ในช่วง 4.0-11.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร และขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ค้ำออก 4.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร

อีก 3 ปีต่อมา Miller (1989) ได้ศึกษาขนาดและรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากข้าวโพด (*Zea mays*) ซึ่งแตกต่างออกไปจากรูปแบบข้างต้น โดยพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีที่ค้ำเข้าสู่บริเวณปลายรากส่วนที่กำลังเจริญเติบโต คือบริเวณอานาเขตเซลล์แบ่งตัวและอานาเขตเซลล์ยัดตัว และพบกระแสไฟฟ้าไอออนมีที่ค้ำออกบริเวณส่วนที่หยุดการเจริญเติบโต หรืออาจแบ่ง

รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากออกเป็น 3 กลุ่มคือ ปลายสุดของรากบริเวณหมวกรากพบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกปริมาณน้อย ถัดจากบริเวณหมวกรากจนถึงสุดอาณาเขตเซลล์ยืดตัวพบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าปริมาณมากที่สุด และบริเวณที่เซลล์มีการเจริญเติบโตเต็มที่แล้วพบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกปริมาณมากกว่าบริเวณหมวกราก

จะเห็นว่าในรากพืชต่างชนิดกันจะมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันบ้าง (Jaffe, 1985; Weisenseel *et al.*, 1979; Miller *et al.*, 1986; Miller, 1989; Ryan *et al.*, 1992) ถึงแม้ในพืชชนิดเดียวกันรูปแบบกระแสไฟฟ้าอาจจะแตกต่างกันได้เช่นกัน เช่นในรากทานตะวันในสภาวะแวดล้อมเดียวกันพบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าหลายรูปแบบด้วยกัน (จุฬารัตน์, 2544) โดยรูปแบบแรกเหมือนกับที่พบในข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel, 1979) รูปแบบที่ 2 เหมือนที่พบในรากถั่ว (Miller, 1986) และมีอีกรูปแบบหนึ่งที่เหมือนกับในรากข้าวโพด (Miller, 1989) เมื่อพิจารณา รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในบริเวณต่างๆ ของรากพืชโดยรวม อาจกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ (ดูภาพประกอบ 5) บริเวณหมวกราก (root cap) เป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของราก กลุ่มเซลล์มีลักษณะคล้ายหมวกหุ้มอยู่ บริเวณนี้กระแสไฟฟ้าที่พบจะมีทั้งทิศเข้าและออก อาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (region of cell division) หรืออาณาเขตเนื้อเยื่อเจริญ (meristematic region) ยาวประมาณ 1.0-1.5 มิลลิเมตร อยู่ถัดจากหมวกรากขึ้นมา มีการแบ่งตัวของเซลล์แบบไมโทซิส (mitosis) ในบริเวณนี้กระแสไฟฟ้าจะมีทิศเข้าสู่ราก อาณาเขตเซลล์ยืดตัว (region of cell elongation) อยู่เหนือบริเวณเซลล์แบ่งตัว ยาวประมาณ 1.0-5.0 มิลลิเมตร เป็นบริเวณที่เซลล์มีการขยายตัวทางด้านยาวมากกว่าทางด้านกว้าง ส่วนใหญ่แล้วบริเวณนี้กระแสไฟฟ้าจะมีทิศเข้าด้วยปริมาณมากที่สุด ถัดไปเป็นอาณาเขตขนราก (region of root hair) เป็นอาณาเขตที่เซลล์มีการเจริญเติบโตเต็มที่รอบๆ รากจะมีขนาดเล็กๆ จำนวนมากเรียกว่า ขนราก บริเวณดังกล่าวกระแสไฟฟ้าจะมีทิศไม่แน่นอน

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว และอาณาเขตเซลล์ยืดตัว ซึ่งเป็นบริเวณที่พืชกำลังเจริญเติบโต ดังนั้นคาดว่ารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนน่าจะมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของพืช

นอกจากการศึกษากระแสไฟฟ้าในรากปกติแล้ว Meyer และ Weisenseel (1997) ได้ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากข้าวโพด (*Zea mays*) ทั้งในสภาวะปกติและเมื่อรากข้าวโพดเกิดบาดแผล พบว่าในสภาวะปกติมีกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่บริเวณหมวกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวด้วยขนาด 1.5-1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเข้าสู่อาณาเขตเซลล์ยืดตัวด้วยขนาดที่มากกว่าคือ 2.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากบริเวณอาณาเขตขนราก เมื่อบากรากข้าวโพดบริเวณอาณาเขตเซลล์ยืดตัว พบว่ามีกระแสไฟฟ้า

ปริมาณมากพุ่งเข้าบริเวณบาดแผลด้วยขนาดมากกว่า 60 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และค่อยๆ ลดขนาดลดลง สองชั่วโมงต่อมากระแสไฟฟ้าบริเวณบาดแผลลดลงเหลือ 2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเปลี่ยนทิศจากเข้าเป็นออกคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Hush และ Overall (1989) ที่ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากถั่ว (*Pisum sativum* L.) พบว่าที่สภาวะปกติ กระแสไฟฟ้าไอออนขนาด 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีทิศเข้าสู่อาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและอาณาเขตเซลล์ยึดตัว และกระแสไฟฟ้าไอออนปริมาณน้อยขนาด 0.1 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรมีทิศออกจากบริเวณถัดมา เมื่อรากถูกบากห่างจากปลายราก 3 มิลลิเมตร พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไอออนปริมาณมากกว่า 10 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ไหลเข้าตรงบาดแผล และรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติ โดยคาดว่ากระแสไฟฟ้าไอออนเหล่านี้จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำไอออนต่างๆ เข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการพัฒนาชีวเซลล์ใหม่ และรักษาบาดแผล (Hush and Overall, 1989; Meyer and Weisenseel, 1997)

ในกรณีที่รากได้รับสารพิษ Ryan และคณะ (1992) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไอออน การเจริญเติบโตของรากและความเป็นพิษของอลูมิเนียมในรากข้าวสาลีพันธุ์ Scout 66 เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวรากในสภาวะปกติ พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าบริเวณ 2.0-3.0 มิลลิเมตรจากปลายราก และมีกระแสไฟฟ้าไอออนสุทธิปริมาณน้อยกว่ามีทิศออกจากบริเวณที่รากมีการเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว เมื่อรากข้าวสาลีได้รับอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.5 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมงพบว่า อัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าไอออนสุทธิที่ไหลเข้าเริ่มลดลง

1.2.3 ผลของสารพิษ

ในการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิด ต้องอาศัยปัจจัยหลายๆ อย่างประกอบกัน เช่น สายพันธุ์ แร่ธาตุในดิน อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณแสง หรือความหนาแน่นของประชากร เป็นต้น นอกจากนี้การปนเปื้อนของโลหะหนักบางชนิดนอกจากจะเป็นพิษต่อคนและสัตว์แล้ว ยังเป็นพิษต่อพืชด้วย ในการศึกษาความเป็นพิษในพืชมีการศึกษากันหลายวิธี วิธีหนึ่งคือดูการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของไอออนในขณะที่มีสารพิษ เช่น Ryan และคณะ (1992) ได้ศึกษาผลของอลูมิเนียม (Al^{3+}) ที่มีต่อกระแสไฟฟ้าไอออนและการยึดตัวของรากข้าวสาลี พบว่าหลังจากข้าวสาลีพันธุ์ Scout 66 ได้รับอลูมิเนียมเป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง การยึดตัวของรากและการเคลื่อนที่ของ H^+ เข้าสู่รากจะถูกยับยั้ง แต่ไม่พบผลดังกล่าวในข้าวสาลีพันธุ์ Altas 66 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ทนอลูมิเนียม เมื่อศึกษาลงไปในระดับเซลล์ของรากข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) Ryan และคณะ (1997) วัดกระแสไฟฟ้าไอออนของโปรโตพลาส (protoplast) จากเซลล์บริเวณปลายรากและ

เนื้อเยื่อของรากที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว พบว่า Al^{3+} จะกระตุ้นแอนไอออนแชนแนล (anion channel) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกของไอออนลบเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะ Cl^- นั่นคือทำให้มีกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่เซลล์มากขึ้น โดยพบว่าเซลล์ส่วนใหญ่จะตอบสนองทันทีหลังจากที่ได้รับ Al^{3+} แต่มีบางกรณีที่ต้องใช้เวลา 10-90 นาที การกระตุ้น anion channel นี้เกิดจาก Al^{3+} เท่านั้น เนื่องจากโลหะไตรวาเลนซ์อื่นๆ เช่น La^{3+} ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้

อลูมิเนียมนอกจากจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ต่อไอออนลบแล้วยังพบว่ายังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนบวกด้วย โดย Liu และ Luan (2001) ได้ศึกษาความเป็นพิษของอลูมิเนียมที่มีต่อพืช โดยศึกษากลไกของอลูมิเนียมในการยับยั้งการดูดซึมโพแทสเซียม (K^+) ผ่าน K^+ แชนแนลขาเข้า (inward K^+ channel) ในขนรากและเซลล์คุม (guard cell) ของใบ พบว่าอลูมิเนียมจะไปขัดขวาง (block) K^+ แชนแนล โดยอลูมิเนียมที่เข้าสู่ไซโตพลาสซึมผ่านทางแชนแนลที่มีลักษณะคล้ายกับ Ca^{2+} แชนแนล (Ca^{2+} channel-like) และจะเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนในพลาสมาเมมเบรนที่ควบคุม K^+ แชนแนลขาเข้า จากผลการทดลองพบว่าทันทีที่เซลล์ได้รับอลูมิเนียม อลูมิเนียมจะส่งผลยับยั้งการไหลเข้าของโพแทสเซียมอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อการไหลออกของโพแทสเซียมเพียงเล็กน้อยและผลการยับยั้งก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอลูมิเนียมด้วย ซึ่งการลดลงของ K^+ ที่เข้าสู่เซลล์น่าจะส่งผลต่อการเจริญเติบโต เนื่องจาก K^+ เป็นไอออนที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช (Arnett and Bazinet, 1977) นอกจากนี้ยังพบว่าอลูมิเนียมมีผลในการยับยั้งการเปิดของปากใบ (stomata) ด้วย (Liu and Luan, 2001) นอกจากนี้ Rout และคณะ (2001) พบว่าอลูมิเนียมจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Ca^{2+} และ Mg^{+} เข้าสู่เซลล์ และเห็นผลชัดเจนในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญของพืช โดยเฉพาะเซลล์บริเวณปลายราก เนื่องจากอลูมิเนียมทำให้โครงสร้างและหน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลง ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแบ่งตัวและการหายใจของเซลล์

นอกจากในรากพืชแล้วยังพบว่า Al^{3+} จะมีผลต่อสาหร่ายบางชนิด ในปี ค.ศ. 1999 Takano และ Shimmen ได้ศึกษาความเป็นพิษของอลูมิเนียมที่มีต่อเซลล์สาหร่าย *Chara corallina* โดยพิจารณาผลของ Al^{3+} ที่มีต่อการเกิดอัลคาไลน์แบนด์ (alkaline band) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นตามปกติของสาหร่ายชนิดนี้ พบว่าหลังจากเซลล์สาหร่ายได้รับ Al^{3+} pH 4.5 Al^{3+} จะยับยั้งการไหลเข้าของ HCO_3^- โดย Al^{3+} มีผลยับยั้งการเกิดอัลคาไลน์แบนด์ จะเห็นว่าในพืชที่ต่างกัน Al^{3+} จะมีผลต่อไอออนต่างชนิดกัน

นอกจากการศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ ระหว่างที่ได้รับสารพิษ วิธีหนึ่งที่ศึกษากันมากคือ ให้พืชได้รับสารพิษระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงศึกษาว่าสารพิษได้ถูกขนส่งไปอยู่ในส่วนใดของพืชและมีผลอย่างไรต่อการเจริญเติบโต ดังตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 1997 Chakravarty และ Srivastava ได้ศึกษามลของแคดเมียม (Cd^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) ที่มีต่อการดูดซึมโลหะและการเจริญเติบโตของต้นกล้าจาก linseed พบว่าแคดเมียมจะถูกดูดซึมที่บริเวณรากมากกว่าสังกะสี และจะสะสมอยู่ในไซโตพลาสซึมมากกว่าในผนังเซลล์ ในขณะที่สังกะสีจะถูกขนถ่ายไปยังปลายยอดมากกว่าแคดเมียม และจะสะสมอยู่ในผนังเซลล์มากกว่าในไซโตพลาสซึม ในสภาวะที่มีทั้งแคดเมียมและสังกะสีพบว่า สังกะสีจะขัดขวางการดูดซึมแคดเมียมและทำให้ความเป็นพิษของแคดเมียมลดน้อยลง นอกจากนี้ Vassilev และคณะ(1998) ได้ศึกษาการตอบสนองทางกายภาพของข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) ต่อแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน พบว่าเมื่อดินมีความเข้มข้นของแคดเมียม 45 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ข้าวบาร์เลย์จะดูดซึมแคดเมียมเข้าสู่สมอในส่วนต่างๆ ของพืช โดยที่บริเวณรากจะมีการสะสมของแคดเมียมมากกว่าส่วนอื่นประมาณ 10 เท่า และปริมาณการสะสมจะลดลงตามระยะห่างจากผิวดิน และมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของข้าวบาร์เลย์ โดยลดการสะสมมวลแห้งลง แต่แคดเมียมจะมีผลน้อยมากกับอัตราการสังเคราะห์แสงและไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของข้าวบาร์เลย์ ในปีเดียวกัน Hart และคณะ (1998) ได้ศึกษากลไกการดูดซึม การขนถ่ายและการสะสมแคดเมียมในข้าวสาลี 2 สายพันธุ์คือ durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*) และ bread wheat (*Triticum aestivum* L.) พบว่าเมื่อข้าวสาลีได้รับแคดเมียม แคดเมียมจะถูกดูดซึมโดยราก จากนั้นไซเล็มจะขนถ่ายแคดเมียมไปสะสมยังปลายยอด โดยที่แคดเมียมจะจับตัวกับองค์ประกอบของผนังเซลล์ (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และโปรตีน) ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในสายพันธุ์ bread wheat มีมากกว่าสายพันธุ์ durum wheat การสะสมแคดเมียมในทั้งสองสายพันธุ์ขึ้นอยู่กับเวลาโดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นอยู่ในช่วง 75 นาทีแรกและหลังจาก 4 ชั่วโมงผ่านไปอัตราการสะสมจะลดลงเรื่อยๆ แต่การสะสมยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

นอกจากแคดเมียมแล้วสารพิษชนิดหนึ่งที่ศึกษากันมากคือ อารซีนิก ในปี ค.ศ. 1997 Carbonell-Barrachina และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของอารซีนิก ($arsenite, As^{3+}$) ในสารละลายภายนอกที่มีต่อการสะสมอารซีนิกในมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill) และถั่ว (*Phaseolus vulgaris* L.) โดยศึกษากระบวนการดูดซึมและสะสมอารซีนิกในราก ลำต้น ใบและผลของมะเขือเทศและถั่วเมื่อได้รับอารซีนิกความเข้มข้น 0, 2, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอารซีนิกจะเป็นพิษต่อพืชทั้งสองชนิด โดยการเจริญเติบโตของมะเขือเทศและถั่วได้รับผลกระทบ

จากอาร์ซินิกอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่ามะเขือเทศมีความทนทานต่อพิษของอาร์ซินิกมากกว่าถั่ว โดยถั่วจะตายหลังจากได้รับอาร์ซินิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 36 วัน ความเป็นพิษที่พบในมะเขือเทศคือ ทำให้มวลแห้งลดลง และมะเขือเทศจะมีกลไกในการลดความเป็นพิษของอาร์ซินิกคือ จำกัดการขนถ่ายอาร์ซินิกไปสู่ปลายยอด โดยการเพิ่มการสะสมอาร์ซินิกไว้ที่ระบบรากแทน ในรากของมะเขือเทศอาร์ซินิกจะมีผลน้อยมากต่อการเจริญเติบโตและลดกระบวนการเผาผลาญอาหารภายในเซลล์ ในถั่วจะมีการดูดซึมและขนถ่ายอาร์ซินิกไปยังปลายยอด และสะสมไว้บริเวณใบในปริมาณมาก ในปีต่อมา Carbonell-Barrachina และคณะ (1998) ได้ศึกษาการดูดซึมความเป็นพิษและผลกระทบของอาร์ซินิกที่มีต่อการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารในหญ้า (*Spartina alterniflora*) โดยใช้สารประกอบของอาร์ซินิกในรูปของ อาร์ซิไนท์ (As^{3+}) อาร์ซิเนท (As^{5+}) กรดโมโนเมทิลอาร์ซิโนนิก (monomethyl arsonic acid, MMAA) และกรดไดเมทิลอาร์ซินิก (dimethyl arsinic acid, DMAA) ที่ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.8 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากรดโมโนเมทิลอาร์ซิโนนิก มีความเป็นพิษมากที่สุด โดยจะไปลดการดูดซึมสารอาหารที่จำเป็นหลายชนิด (ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม, โบรอน, ทองแดง, เหล็ก) และเมื่อไม่พิจารณาชนิดของสารประกอบ อาร์ซินิกความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรจะไม่ใช่พิษต่อหญ้า (ไม่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตหรือกระบวนการดูดซึมสารอาหาร) แต่สารประกอบอนินทรีย์ของอาร์ซินิกความเข้มข้นดังกล่าวจะช่วยเพิ่มการสร้างมวลแห้งในหญ้า การสะสมอาร์ซินิกในรากและปลายยอดจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอาร์ซินิก โดยสารประกอบอนินทรีย์ของอาร์ซินิกและกรดโมโนเมทิลอาร์ซิโนนิก ส่วนใหญ่จะสะสมในราก ในขณะที่กรดไดเมทิลอาร์ซินิกจะขนถ่ายไปยังปลายยอด นอกจากนี้ชนิดของสารประกอบและความเข้มข้นของอาร์ซินิกจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซึมสารอาหาร ได้แก่ As^{5+} มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตโดยช่วยเพิ่มความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในพืช สารประกอบอนินทรีย์ของอาร์ซินิกจะเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมในรากและรวมทั้งจะทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมลดลง และจะมีผลเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมในใบ ในขณะที่สารประกอบอนินทรีย์ของอาร์ซินิกจะเพิ่มความเข้มข้นของโบรอนในรากและความเข้มข้นของทองแดงทั้งในรากและปลายยอด

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า การเกิดพิษเนื่องจากสารต่างๆ จะเริ่มจากการที่รากดูดซึมสารพิษเข้าไป และ/หรือการที่สารพิษมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ ซึ่งคาดว่าจะทำให้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หากทราบความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนกับการเจริญเติบโตชนิดและปริมาณสารพิษที่ได้รับ อาจใช้รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนเป็นตัวบ่งบอกความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อมได้

งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลของสารพิษต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน (sunflower) *Helianthus annuus* Linn. เนื่องจากปัจจุบันทานตะวันเป็นพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 400,000- 500,000 ไร่ (กลุ่มพืชน้ำมัน, 2542) โดยคาดว่าข้อมูลจากงานวิจัยอาจบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสารพิษกับการเจริญเติบโตและรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนของรากทานตะวัน ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานและอาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีววิทยา (bioindicator) ในสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน ในสภาวะปกติ และในสภาวะที่รากทานตะวันได้รับสารที่เป็นพิษต่อการเจริญเติบโต เช่น อลูมิเนียม
2. ศึกษาผลของปริมาณสารเป็นพิษต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน เมื่อได้รับสารเป็นพิษเทียบกับสภาวะปกติ
2. ทราบผลของปริมาณสารพิษต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนและต่อการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาทางการเกษตร

1.5 ขอบเขตและวิธีดำเนินการ

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเมล็ดทานตะวันให้ได้รากที่เหมาะสมต่อการวัดกระแสไฟฟ้าไอออน
2. ศึกษาารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันในสภาวะปกติ
3. ศึกษาารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันที่ได้รับสารพิษ
4. ศึกษาผลของปริมาณสารพิษต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน
5. สรุปผลการทดลอง