# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเมมเบรน การเคลื่อนที่ของไอออนเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า กระแสไฟฟ้าไอออน (ionic current) กระแสไฟฟ้านี้มีทั้งแบบที่เกิดเป็นครั้งคราว (transient) และแบบที่ไหลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่เรียกว่า กระแสไฟฟ้าคงตัว (steady current) กระแสไฟฟ้าแบบครั้งคราวเกิดจากการกระตุ้นในช่วงระยะสั้นๆ เช่นสัญญาณในเซลล์ประสาทซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่มิลลิวินาที ส่วนสัญญาณกระแสไฟฟ้าคงตัวคือกระแสไฟฟ้าไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวอาจจะอยู่ในระดับไม่กี่วินาทีหรือถึงระดับเป็นชั่วโมง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าไอออนแบบคงตัวที่เกิดขึ้นในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตนี้มีขนาดน้อยมาก โดยอยู่ในระดับไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Jaffe, 1985) และต้องวัดโดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเป็นพิเศษที่เรียกว่า ระบบไวเบรติงโพรบ (vibrating probe system) (Jaffe and Nuccitlli, 1974) หลังจากการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวทำให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าไอออนคงตัวปริมาณน้อยนี้ในระบบต่างๆ ได้ เช่น ในเอ็มบริโอของสัตว์ (Robinson, 1983) หลอดไข่ของแมลง (Diehl-Jome and Hurebner, 1989) รากพืช (Jaffe and Nucclitelli, 1977; Miller *et al.*, 1986; Meyer and Weisenseel,1997; Weisenseel *et al.*, 1979) เป็นต้น

กระแสไฟฟ้าไอออนที่เกิดขึ้นเหล่านี้พบว่าเกี่ยวข้องกับกลไกบางอย่างของเซลล์ เช่น การนำอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ รวมทั้งควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์พืชและสัตว์ (Jaffe and Nuccitelli , 1974; Jaffe *et al.*, 1977) จากการศึกษาในระบบต่างๆ ทั้งในพืชและสัตว์พบว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้ามีส่วนเกี่ยวข้องกับบริเวณที่มีการเจริญเติบโตของเซลล์ ตัวอย่างในเซลล์สัตว์ เช่น กระแสไฟฟ้าในเอ็มบริโอของคางคก *Xenopus* (Robinson, 1983) ฟอลลิเคิล (follicle) ของ *Drosophila* (Bohrmann *et al.*, 1986) และในหลอดไข่ของแมลง *Rhodios prolixus* (Diehl-Jome and Hurebner, 1989) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่เซลล์ที่มีการเจริญเติบโต ส่วนในพืช เช่น ในไซโกต (zygote) ของสาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณข้างเซลล์และมีทิศเข้าบริเวณส่วนที่จะเจริญไปเป็นราก (rhizoid) (Nuccitelli,1978) ในสาหร่ายน้ำจืด *Microsterias* และ *Closterium* (Troxell,

1989) กระแสมีทิศเข้าบริเวณเซลล์ใหม่และออกจากเซลล์เก่า นอกจากนี้ในเนื้อเยื่ออื่นๆ ของพืช เช่นในเอ็มบริโอของแครอท (Rathore and Robinson, 1989) และเอ็มบริโอของปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Thavarungkul, 1997) พบว่าขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการเจริญเติบโต

นอกจากเอ็มบริโอแล้วรากพืชเป็นอีกระบบหนึ่งที่มีการศึกษากันมาก (Jaffe and Nucclitelli, 1977; Miller *et al.*,1986; Meyer *et al.*, 1997; Weisenseel *et al.*, 1979) ความสนใจในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในรากนั้นเกิดจากการที่รากเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ขนส่งไอออนต่างๆ ระหว่างสิ่งแวดล้อมภายนอกกับภายในราก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนที่บริเวณนี้น่าจะมีผลต่อการเจริญเติบโต ที่ผ่านมามีการศึกษารากพืชหลายชนิดได้แก่รากโคลเวอร์ *Trifolium repens* (Miller *et.al.*, 1986) รากข้าวบาร์เลย์ *Hordeum vulgare* L. (Weisenseel *et.al.*, 1979) รากข้าวโพด *Zea may* cv. (Miller, 1989) และรากถั่ว *Pisum sativum* (Hush and Overall, 1986) พบว่ากระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีทิศเข้าสู่รากในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญและบริเวณของเซลล์ที่มีการยืดตัว ในขณะเดียวกันจะมีทิศออกจากรากในบริเวณที่เซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

นอกจากรากแล้วยังมีผู้ที่ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในขนราก เนื่องจากขนรากเป็นส่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ชั้นนอกของรากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของรากและมีส่วนสำคัญในการดูดกลืนแร่ธาตุต่างๆ จากการศึกษากระแสไฟฟ้าในขนรากและบริเวณรอบๆ โซนของขนราก (root hair zone) เช่น ในรากของข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et .al.*, 1979) พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณโซนของขนรากและมีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก นอกจากนี้ยังพบอีกว่า $H^+$ เป็นส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้าไอออนในรากและขนรากของข้าวบาร์เลย์ ในทางตรงกันข้าม Miller และคณะ (1986) พบว่ากระแสไฟฟ้าในรากโคลเวอร์ *Trifolium repens* มีทิศเข้าสู่รากบริเวณโซนของขนราก

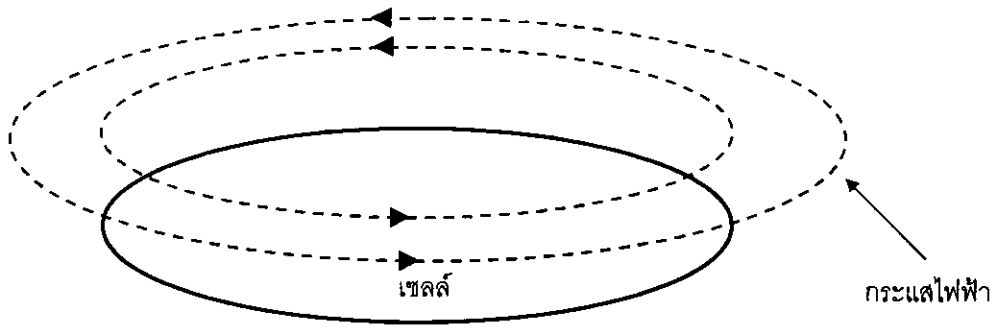
เนื่องจากทานตะวันเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมพืชน้ำมัน และประเทศไทยได้มีการส่งเสริมให้มีการปลูกทานตะวันเพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่ออุตสาหกรรมพืชน้ำมัน ทางหน่วยวิจัยชีวฟิสิกส์ : ไบโอเซนเซอร์และกระแสไฟฟ้าชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงได้สนใจที่จะศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในรากทานตะวันและจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณปลายรากและมีทิศออกในบริเวณเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ (จุฬาภรณ์ ม่วงดิษฐ์, 2540) ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาเซลล์ในช่วงที่มีการเจริญเติบโต

งานวิจัยนี้ต้องการจะขยายการศึกษากระแสไฟฟ้าในรากทานตะวันออกไปอีก โดยจะศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนที่ขนรากเนื่องจากขนรากเป็นส่วนหนึ่งของระบบรากพืชที่ทำหน้าที่ในการขนส่งไอออนเข้าสู่ราก โดยจะศึกษาในสภาวะปกติและสภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนแปลงของ pH หรือความเข้มข้นของไอออนบางชนิด การศึกษาดังกล่าวอาจนำไปสู่ความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไอออนต่อการเจริญเติบโต

**1.2 บทตรวจเอกสาร**

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีเยื่อหุ้มเซลล์ทำหน้าที่ในการแยกสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนภายในและภายนอกเซลล์มีความแตกต่างกัน ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าออกของไอออนชนิดต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า กระแสไฟฟ้าไอออน ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไอออนกับเซลล์สิ่งมีชีวิตเกี่ยวข้องกับกลไกต่างๆ ของระบบเซลล์ เช่น การนำอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ รวมทั้งควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของเซลล์พืช (Hush and Overall, 1989) และสัตว์ (Jaffe and Nuccitelli, 1974)

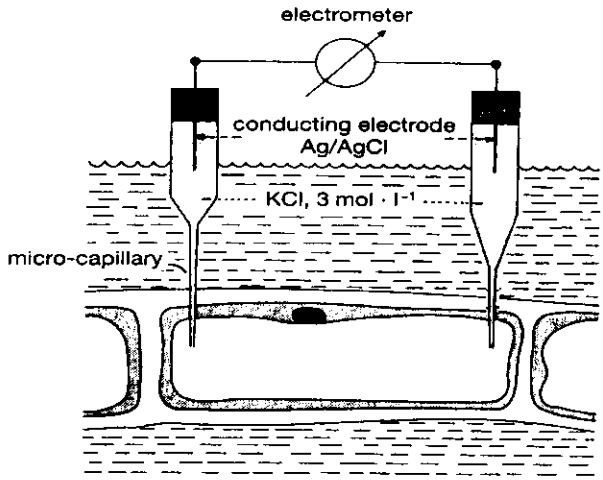
กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ (ภาพประกอบ 1) สามารถวัดได้ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของไอออน การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า




ภาพประกอบ1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในสารละลายภายนอกเซลล์

สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน วิธีแรกวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ โดยใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมาก (microelectrode) ที่ประกอบด้วยด้วยหลอดแก้วที่ดึงจนปลายแหลมภายในบรรจุด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์และใช้เงิน/เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้า การวัดความ

ต่างศักย์ไฟฟ้าจะใช้ไมโครอิเล็กโทรดสองอันแทงเข้าไปในเซลล์แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง (ภาพประกอบ 2) แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์และจะมีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการบาดเจ็บของเซลล์จากการแทงอิเล็กโทรดเกิดขึ้นด้วย วิธีที่สอง คือการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดบนผิวของตัวอย่างโดยการแตะอิเล็กโทรดบนผิวตัวอย่าง ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านชั้นของเหลวบนผิวของตัวอย่าง วิธีนี้พบว่าหากผิวของตัวอย่างแห้งจะทำให้ความต้านทานที่ผิวตัวอย่างมีค่าสูง ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าสูงพอที่จะวัดได้ แต่การที่ผิวตัวอย่างแห้งจะส่งผลกระทบต่อตัวอย่างได้ (Jaffe,1977) ส่วนวิธีสุดท้ายเป็นวิธีที่วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายภายนอกตัวอย่างซึ่งมีปริมาณน้อยมาก (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) โดยวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดในสารละลายที่มีกระแสไฟฟ้า ในกรณีนี้ไม่สามารถวัดได้โดยใช้อิเล็กโทรดเงิน/เงินคลอไรด์เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก (นาโนโวลต์) น้อยกว่าระดับสัญญาณรบกวน (noise) ของอิเล็กโทรดชนิดนี้ (ประมาณ 10 ไมโครโวลต์) ระบบไวเบรติงโพรบจึงได้ถูกพัฒนาขึ้น (Jaffe and Nuccitelli, 1974) เพื่อให้สามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยได้ ไวเบรติงโพรบนี้จะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่มีระยะห่างกันเล็กน้อย และสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถึงระดับนาโนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตที่มีปริมาณน้อย โดยระบบที่ Jaffe และ Nuccitelli (1974) ได้พัฒนาขึ้นนี้ได้ถูกนำมาศึกษาเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าไอออนทั้งในพืชและสัตว์

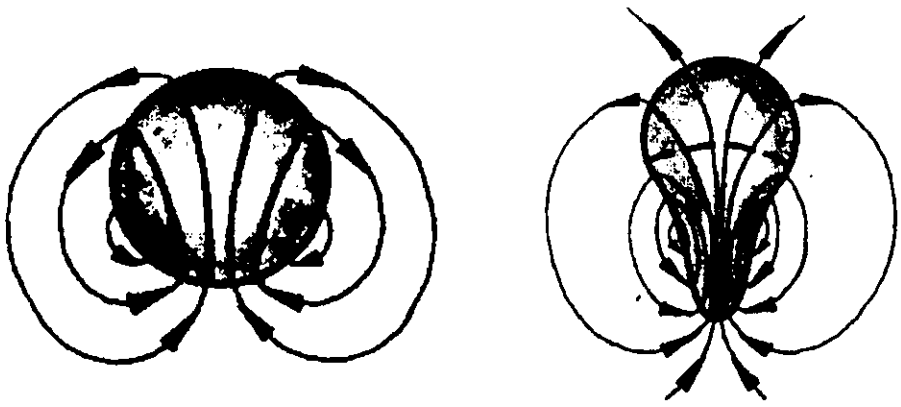



ภาพประกอบ 2 การใช้ไมโครอิเล็กโทรดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์

จากการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนทั้งในระบบของพืชและสัตว์โดยใช้ระบบไวเบรติงโพรบ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกต่างๆ หลายประการด้วยกัน เช่น การนำอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ รวมทั้งควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์พืช (Hush and Overall,1989) และสัตว์ (Jaffe and Nuccitelli , 1974) กลไกหนึ่งของกระแสไฟฟ้านี้ที่เป็นที่สนใจกันมากคือความเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต ตัวอย่างการศึกษาในเซลล์สัตว์ เช่น ในเอ็มบริโอของคางคก *Xenopus* พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณส่วนที่เป็นเซลล์ใหม่และส่วนที่พัฒนาไปเป็นเหงือก ด้วยขนาด 7 และ 60 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีทิศออกจากเซลล์ที่อยู่ระหว่างเหงือกกับส่วนที่งอกใหม่ด้วยขนาดที่น้อยกว่า 1 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Robinson, 1983) ส่วนการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฟอลลิเคิล (follicle) ของ *Drosophila* (Bohrmann *et al.*, 1986; Overall and Jaffe, 1985) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากส่วนหลังของฟอลลิเคิล (posterior) ซึ่งเป็นส่วนของโอโอไซต์ (oocyte) และมีทิศเข้าบริเวณส่วนหน้าของฟอลลิเคิล (anterior) ในทำนองเดียวกันในหลอดไข่ของแมลง *Rhodios prolixus* (Diehl-Jome and Hurebner, 1989) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตเช่นกัน

สำหรับการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนของพืชมีการศึกษาในหลายระบบเช่นกัน ระบบแรกๆ ที่มีการศึกษาคือไซโกตของสาหร่ายสีน้ำตาล (Nuccitelli, 1978) พบว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าด้านที่ไม่ได้รับแสงด้วยขนาด 1-2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรหลังจากการปฏิสนธิ 2-3 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 3A) จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะออกจากบริเวณข้างเซลล์และจะมีทิศเข้าบริเวณที่งอกเป็นไรซอยด์ (rhiziod) (ภาพประกอบ 3B) นอกจากการงอกแล้วยังมีการศึกษากระแสไฟฟ้าในขณะที่สาหร่ายมีการขยายตัวของผนังเซลล์ (cell wall) โดยศึกษาในสาหร่ายน้ำจืด *Microsterias* และ *Closterium* พบว่าเมื่อเซลล์มีการขยายผนังเซลล์กระแสไฟฟ้าจะเข้าสู่บริเวณผนังเซลล์ที่มีการเจริญเติบโตเป็นเซลล์ใหม่และออกจากเซลล์เก่า (Troxell, 1989) ด้วยขนาด 0.7 – 5.4 และ 0.2 – 1.5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซ็นติเมตร ตามลำดับ นอกจากสาหร่ายแล้วยังมีการศึกษาในราน้ำ (water mold) *Achlya* พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ส่วนปลายของไฮฟัล (hyphal) และออกที่ส่วนของทรังก์ (trunk) (Kropf *et al.*, 1984) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในเนื้อเยื่ออื่นๆ ของพืช เช่น เอ็มบริโอ (Rathore and Robinson, 1989; Thavarungkul, 1997) จากการศึกษาในเอ็มบริโอปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Thavarungkul, 1997) พบว่า กระแสไฟฟ้าจะมีทิศเข้าสู่เอ็มบริโอส่วนที่เป็นใบเลี้ยงและออกจากเอ็มบริโอตรงบริเวณที่จะเจริญไปเป็นรากด้วยขนาดเฉลี่ย

1 - 2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามระยะการเจริญเติบโต ส่วนในเอ็มบริโอของแครอท (Rathore and Robinson, 1989) พบว่าขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการเจริญเติบโตเช่นกัน



(A) (B)

ภาพประกอบ 3 ทิศทางของกระแสไฟฟ้าภายนอกเซลล์ในสาหร่ายสีน้ำตาล (Nuccitelli, 1978) (A) ก่อนเกิดการงอกของไรซอยด์ (rhizoid) (B) เมื่อมีไรซอยด์งอกออกจากเซลล์

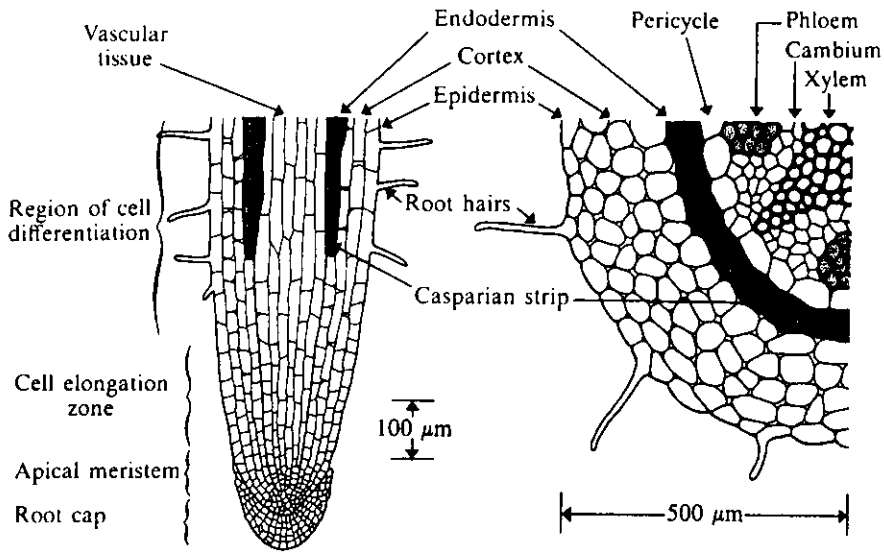
สำหรับระบบที่ศึกษากันมากในพืชอีกระบบหนึ่ง คือราก (Jaffe and Nueclitelli, 1977; Miller *et al.*,1986; Miller, 1989; Meyer *et al.*, 1997; Weisenseel *et al.*, 1979) ความสนใจในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในรากนั้นเกิดจากการที่รากเป็นส่วนที่ทำหน้าแลกเปลี่ยนไอออน ต่างๆ ระหว่างสิ่งแวดล้อมภายนอกกับภายใน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณหรือทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนที่บริเวณนี้น่าจะมีผลต่อการเจริญเติบโต รากพืชสามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ 4 อาณาเขตด้วยกัน (ภาพประกอบ 4) (Nobel, 1999) กล่าวคือ

- อาณาเขตหมวกราก (root cap) ส่วนที่อยู่ปลายสุดของรากเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายหมวกหุ้มอยู่ หมวกรากจะทำหน้าที่ป้องกันเซลล์ที่อยู่ปลายสุดของราก หมวกรากของพืชบางชนิดมีน้ำเมือกติดอยู่บริเวณภายนอกเพื่อช่วยหล่อลื่นปลายรากขณะที่เจริญลงสู่ดิน

- อาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (region of cell division) หรือเขตเนื้อเยื่อเจริญ (apical meristem region) อยู่ถัดจากหมวกรากขึ้นมา เป็นส่วนปลายสุดของรากที่ภายนอกถูกปกคลุมด้วยหมวกราก อาณาเขตนี้ประกอบด้วยเซลล์ที่มีการแบ่งตัวแบบไมโตซีส (mitosis) อยู่ตลอดเวลา และเซลล์ที่อยู่รอบนอกส่วนปลายจะเปลี่ยนเป็นหมวกราก อาณาเขตนี้จะมีสีขุ่น

- อาณาเขตเซลล์ยืดตัว (region of cell elongation) เป็นอาณาเขตที่อยู่เหนือเซลล์แบ่งตัวมีสีจางกว่าและมีความกว้าง 1 – 10 มิลลิเมตร เซลล์จะมีการขยายตัวตามความยาวมากกว่าด้านข้างทำให้รากยืดยาวออก ซึ่งเซลล์ในบริเวณนี้จะพัฒนาไปเป็นเซลล์ primary tissue ชนิดต่างๆ ของราก เช่น ท่อลำเลียงอาหาร (phloem) ท่อลำเลียงน้ำ (xylem)

- อาณาเขตที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ (region of cell differentiation) บริเวณนี้จะมีขนรากเล็กๆ (root hairs) จำนวนมาก ที่เกิดจากการพัฒนาของเซลล์ผิวนอก (epidermis cell) เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการขนถ่ายไอออนเข้าสู่ราก




ภาพประกอบ 4 ส่วนต่างๆ ของรากพืช (Nobel, 1999)

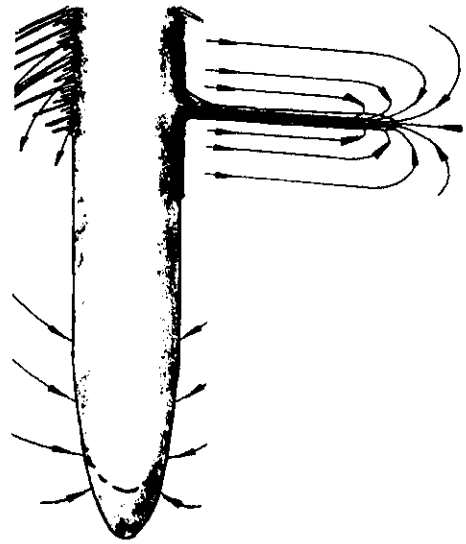
เมื่อพิจารณาจากการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในรากของพืชชนิดต่างๆ พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีความสัมพันธ์กับอาณาเขตของราก โดยมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน รูปแบบแรก กระแสไฟฟ้าในรากบริเวณอาณาเขตหมวกรากมีทิศทางไม่แน่นอนคือบางรากมีทิศเข้าและ

บางรากมีทิศออก แต่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าในบริเวณถัดขึ้นไปในอาณาเขตของเซลล์ที่มีการแบ่งตัว และบริเวณที่มีการยืดตัวของเซลล์ไปจนถึงบริเวณใกล้กับอาณาเขตของขนรากและกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นทิศออกจากรากในอาณาเขตของขนราก รูปแบบนี้พบในรากข้าวบาร์เลย์ *Hordeum vulgare* L. (Weisenseel *et al.*, 1979) โดยพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่เซลล์ในบริเวณที่มีการยืดตัวของเซลล์ด้วยขนาด 1 - 3 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและมีทิศออกจากบริเวณขนรากด้วยขนาด 0.5 – 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีกรูปแบบหนึ่ง กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าตั้งแต่บริเวณหมวกรากจนถึงบริเวณเซลล์ที่มีการยืดตัว มีทิศออกจากรากบริเวณที่เซลล์มีการเจริญเติบโตเต็มที่และมีทิศเข้าอีกครั้งในบริเวณขนราก เช่น ในรากโคลเวอร์ *Triflolium repens* L. (Miller *et al.*, 1986) และในรากถั่ว *Pisum salivum* L. (Hush and Overall, 1986) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่รากด้วยขนาด 0.15–1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และรูปแบบสุดท้ายกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากอาณาเขตหมวกราก มีทิศเข้าบริเวณเซลล์ที่มีการแบ่งตัวและขยายตัวของเซลล์และมีทิศออกอีกครั้งในบริเวณที่เซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ เช่น ในรากข้าวโพด *Zea may* cv. (Miller, 1989) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่บริเวณหมวกรากด้วยขนาด 0.7 –1.2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและมีทิศเข้าสูงสุดตรงส่วนกลางของบริเวณที่เซลล์ขยายตัวด้วยขนาด 1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและมีทิศออกจากจากเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ด้วยขนาด 0.5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับการศึกษากระแสไฟฟ้ารอบๆ รากในบริเวณที่มีขนรากและที่ปลายขนราก (Miller *et al.*, 1986; Weisenseel *et al.*, 1979) เช่น ในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) พบว่ากระแส ไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากรากบริเวณที่มีขนรากด้วยขนาด 0.5-1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 5) ในทางตรงกันข้าม ในรากโคลเวอร์ (Miller *et al.*, 1986) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณดังกล่าวด้วยขนาด 0.15 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก Weisenseel และคณะ (1979) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณโคนของขนรากและมีทิศเข้าที่ปลายของขนรากด้วยขนาด 2.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 5) และพบว่า $H^+$ เป็นส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้าไอออนในรากและขนรากของข้าวบาร์เลย์

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของ pH ของสารละลายภายนอกต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในพืช เช่น ในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) เมื่อค่า pH ของสารละลายรอบๆ รากเพิ่มจาก pH 5.5 เป็น 7.1 กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ในบริเวณที่เซลล์มีการยืดตัว (elongation zone) มีค่าลดลงจาก 2.6 เป็น 1.9 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้น

ในรากข้าวโพดเช่นกัน (Miller, 1989) ในการศึกษาดังกล่าวเมื่อสารละลายรอบๆ รากมีที่ค่า pH 3.0 กระแสไฟฟ้าบริเวณที่มีการยืดตัวของเซลล์มีทิศเข้าด้วยขนาด 10 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 6.0 และ 7.0 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าด้วยขนาดที่ลดลงเป็น 2.0 และ 0.5 ไมโครแอมแปร์ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาฟลักซ์ไอออนของ $H^+$ และ $Ca^{2+}$ ในบริเวณที่มีการยืดตัวของเซลล์ในรากข้าวโพดโดยใช้เทคนิคไมโครอิเล็กโทรดประมาณค่าฟลักซ์ไอออน (microelectrode ion flux estimation technique) (Shabala *et al.*, 1997) (ฟลักซ์ไอออนคือปริมาณการเคลื่อนที่ของไอออนต่อพื้นในระยะเวลาหนึ่ง สามารถเทียบเป็นกระแสไฟฟ้าได้) ให้ผลทำนองเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยพบว่า หากค่า pH ลดลง $H^+$ จะเข้าสู่บริเวณนี้ในปริมาณที่สูงขึ้นในระยะเริ่มต้นและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ $Ca^{2+}$ มีทิศไหลเข้าปริมาณสูงในระยะแรกและค่อยๆ ลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของ $H^+$



ภาพประกอบ 5 รูปแบบกระแสไฟฟ้าในข้าวบาร์เลย์ กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากกลุ่มของขนรากขณะที่กระแสไฟฟ้าเข้าที่บริเวณเซลล์ยืดตัวและปลายของขนราก (Weisenseel,1983)

นอกจากการศึกษาผลของ pH ต่อกระแสไฟฟ้าแล้วยังมีการศึกษาผลของ pH ต่อการงอกของขนราก โดย Bibikava และคณะ (1998) ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบฟลูโอเรสเซนต์ (fluorescence) ในการศึกษาการงอกของขนราก *Arabidopsis thailiana* พบว่าที่ pH 4.0 จะยับยั้งการงอกของขนราก

จากที่กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของรากในพืชหลายชนิด ดังนั้นทางหน่วยวิจัยชีวฟิสิกส์: ไบโอเซนเซอร์และกระแสไฟฟ้าชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงได้สนใจศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในรากพืชโดยเลือกรากทานตะวัน (*Helianthus annuus* Linn.) เนื่องจากพืชชนิดนี้ได้รับการส่งเสริมการปลูกเพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอกับอุตสาหกรรมพืชน้ำมัน และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณปลายรากและมีทิศออกจากรากในบริเวณเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาเซลล์ในช่วงที่มีการเจริญเติบโต และยังพบว่า pH มีผลต่อกระแสไฟฟ้าไอออน โดยเมื่อ pH ลดลงกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากมากขึ้นเกือบตลอดทั้งความยาวรากเนื่องจากมีปริมาณของ $H^+$ ที่เพิ่มขึ้นแสดงว่า $H^+$ น่าจะมีส่วนสำคัญในการเกิดกระแสไฟฟ้านี้ (จุฬาภรณ์ ม่วงดิษฐ์, 2540)

งานวิจัยนี้ต้องการจะขยายการศึกษากระแสไฟฟ้าในรากทานตะวันออกไปอีกโดยจะศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนที่ขนรากเนื่องจากขนรากเป็นส่วนหนึ่งของระบบรากพืชที่ทำหน้าที่ในการขนส่งไอออนเข้าสู่รากพืชดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาจนำไปสู่ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไอออนต่อการเจริญเติบโตของเซลล์พืชได้ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้เมล็ดทานตะวันชนิดพันธุ์ลูกผสมแปซิฟิกของบริษัทแปซิฟิกเมล็ดพันธุ์ สระบุรี โดยใช้ระบบไวเบรติงโพรบศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในขนรากทานตะวันโดยจะศึกษาในสภาวะปกติและสภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนแปลงของ pH หรือความเข้มข้นของไอออนบางชนิด

## 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ขนรากทานตะวันในสภาวะปกติ
2. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ขนรากทานตะวันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pH ในสิ่งแวดล้อม
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนบางชนิด เช่น $Ca^{2+}$ $K^+$ และ $Cl^-$ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ขนรากทานตะวัน ในสภาวะปกติและสภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป เช่น ค่า pH
2. ทราบถึงผลของความเข้มข้นของไอออนบางชนิด เช่น $Ca^{2+}$ $K^{+}$ และ $Cl^{-}$ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้า ไอออน รอบๆ ขนรากทานตะวัน
3. ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้อาจนำไปสู่ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไอออนกับการเจริญเติบโตของทานตะวัน และอาจเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการอธิบายกลไกบางอย่างของขนรากและรากพืชในการขนถ่ายไอออนได้

## 1.5 ขอบเขตและวิธีดำเนินงาน

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเมล็ดและการเจริญของขนรากทานตะวัน
2. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ขนรากทานตะวัน ในสภาวะปกติ
3. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ขนรากทานตะวันสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง pH ของ สิ่งแวดล้อม
4. ศึกษาการไหลผ่านเข้าออกของไอออนบางชนิดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของขนรากทานตะวัน เช่น $K^{+}$ , $Ca^{2+}$ และ $Cl^{-}$
5. รวบรวม วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง