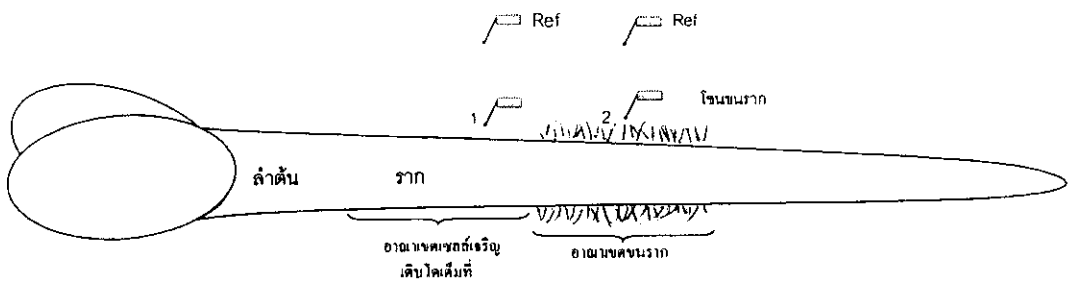


### บทที่ 3

#### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

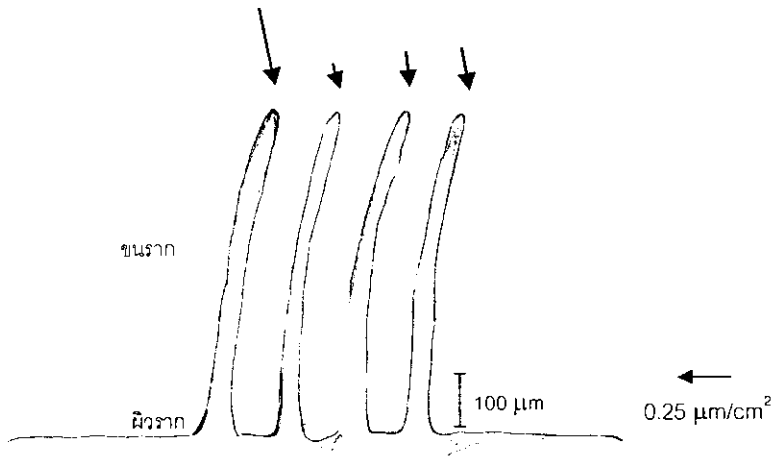
##### 3.1 รูปแบบกระแสไฟฟ้าในขรรากทานตะวันในสภาวะปกติ (สารละลาย APW pH 6.0)

ในรากทานตะวันที่ใช้ในการทดลอง โขนของขรรากมีช่วงความยาวประมาณ 1.0 – 1.5 เซนติเมตร อยู่ถัดจากส่วนที่เป็นลำต้น 1.5 เซนติเมตรและอยู่ห่างจากปลายราก 1.5 - 2.0 เซนติเมตร ขรราก มีอายุ 15 – 17 ชั่วโมง มีความยาวอยู่ในช่วง 500 – 800 นาโนเมตร วัดกระแสไฟฟ้าไอออนของขรรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 ± 0.05 โดยวัดที่ระยะ 50 ไมโครเมตรจากปลายขรราก และวัดกระแสไฟฟ้ารอบโขนของขรรากโดยวัดที่ระยะห่างออกไป 150 ไมโครเมตร จากแนวของปลายขรราก นอกจากนี้ยังวัดกระแสไฟฟ้าบริเวณที่เซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ก่อนอาณาเขตขรราก โดยเริ่มวัดที่ตำแหน่ง 10.00 มิลลิเมตรจากโคนราก (ภาพประกอบ 26) โดยวัดห่างจากผิวราก 150 ไมโครเมตร

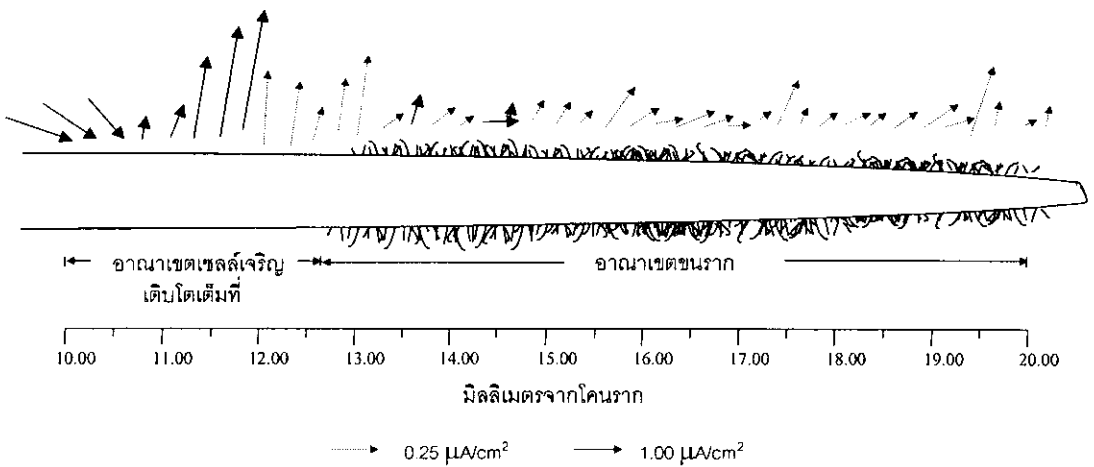


ภาพประกอบ 26 แสดงส่วนต่างๆ ของต้นกล้าทานตะวัน โดยตำแหน่งที่ 1 คือ ตำแหน่งที่วัดกระแสไฟฟ้าที่ผิวรากในอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ที่ระยะ 150 ไมโครเมตรจากผิวราก และตำแหน่งที่ 2 แสดง ตำแหน่งวัด ที่ปลายขรรากห่างจากปลายขรราก 50 ไมโครเมตร

จากจำนวน 8 ราก วัดกระแสไฟฟ้าได้จาก 70 ขนราก โดยกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ปลายของขนราก 58 ขนราก ด้วยขนาด  $0.10 - 0.94$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 27) ในอีก 12 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด  $0.18 - 0.72$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีรอบโชนของขนราก กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีทิศออกด้วยขนาด  $0.10 - 2.0$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 28) ส่วนอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ที่อยู่ถัดจากอาณาเขตขนรากขึ้นมากระแสไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าในรากเดียวกันบางตำแหน่งเข้าและบางตำแหน่งออก ด้วยขนาด  $0.23 - 3.53$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อพิจารณารูปแบบของกระแสของกระแสไฟฟ้าพบว่ามีเพียงรูปแบบเดียว คือ กระแสไฟฟ้าบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ที่กระแสไฟฟ้าในรากเดียวกันบางตำแหน่งเข้าและบางตำแหน่งออก ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโชนของขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโชนขนราก



ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนราก

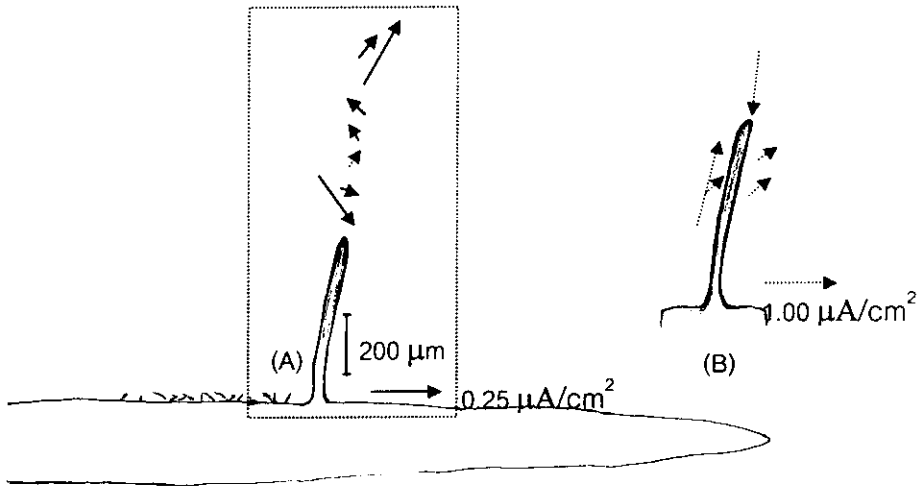


ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ระยะห่างจากผิวของราก 150 ไมโครเมตร ในอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนขนราก (วัดห่างจากแนวปลายขนราก 150 ไมโครเมตร) ใน APW pH 6.00

จากการวัดกระแสไฟฟ้าที่ระยะต่างๆ จากปลายขนราก โดยแต่ละตำแหน่งมีระยะทางเพิ่มขึ้น 50 ไมโครเมตร (ภาพประกอบ 29 A) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ในตัวอย่างที่แสดงในภาพประกอบ 29A พบว่าที่ระยะห่างจากปลายขนราก 50 ไมโครเมตร กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากด้วยขนาด 0.24 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อวัดที่ระยะถัดไป 50 ไมโครเมตร กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงแต่ยังมีทิศเข้าสู่ปลายขนรากดังเดิม แต่เมื่อระยะห่างจากปลายขนรากเพิ่มเป็น 150 ไมโครเมตรจนถึง 300 ไมโครเมตร กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนราก โดยขนาดของกระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีขนาดที่ 300 ไมโครเมตรเป็น 0.31 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หากกระแสไฟฟ้าเกิดจากปลายขนรากเพียงอย่างเดียวขนาดของกระแสไฟฟ้าน่าจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ดังนั้นเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ไม่ได้มาจากขนรากเพียงแห่งเดียว

ในบางรากที่ขนรากไม่หนาแน่นจนเกินไปจะวัดกระแสไฟฟ้าด้านข้างของขนรากด้วย ภาพประกอบ 29B แสดงกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากขนรากหนึ่งทั้งบริเวณปลายขนรากและด้านข้างจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ปลายขนรากส่วนในด้านข้างกระแสไฟฟ้ามีทิศในแนวออกจากขนรากหรือมีแนวขนานกับขนราก ลักษณะของกระแสไฟฟ้างกล่าวว่าจะเป็นผลจากกระแสไฟฟ้าที่ออกจากรากมากกว่าที่จะออกจากขนราก และเมื่อวัดกระแสไฟฟ้าไอออนห่างออกไปจากขนราก

พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโชนรอบโชนขนราก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ตำแหน่งของปลายขนรากน่าจะมีส่วนที่เกิดจากขนรากรวมกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากตัวรากตัวราก



ภาพประกอบ 29 รูปแบบกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) แสดงทิศกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งห่างจากปลายขนราก

50 – 350 ไมโครเมตร โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 50 ไมโครเมตร

(B) แสดงทิศกระแสไฟฟ้ารอบโชนขนราก

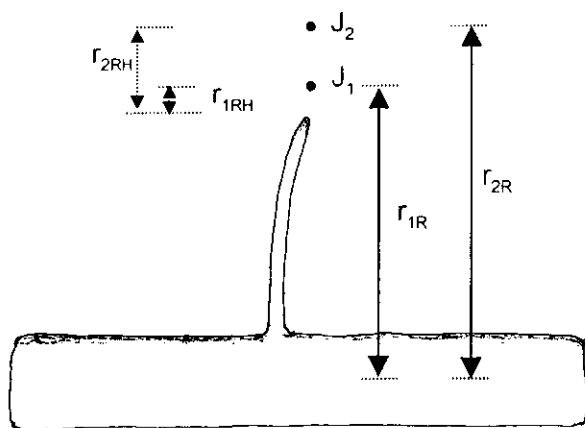
หากพิจารณาขนรากที่วัดกระแสไฟฟ้าที่อยู่ห่างจากขนรากอื่นๆ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ปลายของขนรากคือผลรวมของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด 2 แห่ง คือปลายขนรากและจากตัวราก โดยปลายขนรากสามารถพิจารณาให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแบบจุดและตัวรากเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทรงกระบอก (Weisenseel *et al.*, 1979) ดังนั้นจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ปลายขนรากและที่วัดได้ที่ระยะห่างออกไปรอบโชนขนราก สามารถนำมาคำนวณกระแสไฟฟ้าจริงที่ปลายขนรากได้โดยพิจารณา ดังนี้ (ภาพประกอบ 30)

ให้  $J_1$  = กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากปลายขนราก (ตำแหน่ง 1)

$J_2$  = กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากโชนรอบขนราก (ตำแหน่ง 2)

$J_{1R}, J_{2R}$  = กระแสไฟฟ้าจริงจากรากที่ตำแหน่ง 1 และ 2

$J_{1RH}, J_{2RH}$  = กระแสไฟฟ้าจริงจากขนรากที่ตำแหน่ง 1 และ 2



ภาพประกอบ 30 ตำแหน่งวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายชนรากและรอบโคนชนราก (●) ตำแหน่งวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายชนราก ( $J_1$ ) และ รอบโคนชนราก ( $J_2$ )

ในกรณีแหล่งกำเนิดแบบทรงกระบอกความหนาแน่นกระแส  $J$  มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า  $I$  รัศมีจากจุดศูนย์กลางทรงกระบอก  $r$  และความยาวของทรงกระบอก  $L$  ตามสมการ

$$J = \frac{I}{2\pi r L} \quad (16)$$

กรณีที่แหล่งกำเนิดแบบจุด

$$J = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (17)$$

เมื่อ

$r$  = ระยะทางจากแหล่งกำเนิด

ดังนั้น

$$J_1 = J_{1R} + J_{1RH} \quad (18)$$

และ

$$J_2 = J_{2R} + J_{2RH} \quad (19)$$

โดยกระแสไฟฟ้าจริงจากปลายชนราก

$$J_{1RH} = J_1 - J_{1R}$$

เนื่องจาก

$$J_{1R} = \frac{r_{2R}}{r_{1R}} J_{2R}$$

ดังนั้น

$$J_{1RH} = J_1 - \left( \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right) J_{2R}$$

แทนค่าจาก (19)

$$\begin{aligned} J_{1RH} &= J_1 - \frac{r_{2R}}{r_{1R}} (J_2 - J_{2RH}) \\ &= J_1 - \left( \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right) J_2 + \left( \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right) J_{2RH} \end{aligned}$$

เนื่องจาก  $J_{2RH} = \left[ \frac{r_{1RH}}{r_{2RH}} \right]^2 J_{1RH}$

จะได้

$$\begin{aligned} J_{1RH} &= J_1 - \left[ \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right] J_2 + \left( \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right) \left( \frac{r_{1RH}}{r_{2RH}} \right)^2 J_{1RH} \\ J_{1RH} &= \frac{J_1 - \left[ \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right] J_2}{1 - \left[ \frac{r_{2R}}{r_{1R}} \right] \left[ \frac{r_{1RH}}{r_{2RH}} \right]^2} \end{aligned} \quad (20)$$

เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายชนรากจะเลือกชนรากที่เกิดห่างๆ กันเพื่อที่ในขณะที่วัดโพรบจะได้ไม่ชนกับชนรากอื่น กระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือ  $J_1$  โดยตำแหน่งที่วัดอยู่ห่างจากปลายชนราก 50 ไมโครเมตร เมื่อสิ้นสุดการวัดทุกครั้งจะเลื่อนโพรบไปที่ตำแหน่ง 150 ไมโครเมตร จากปลายชนราก เพื่อวัดกระแสไฟฟ้า  $J_2$  นั่นคือ ระยะ  $r_{1RH}$  และ  $r_{2RH}$  เป็น 50 และ 150 ไมโครเมตรตามลำดับ ส่วนชนรากที่วัดกระแสไฟฟ้ามีความยาวอยู่ในช่วง 650 - 700 ไมโครเมตร และตัวรากเองมีรัศมีประมาณ 500 ไมโครเมตร ดังนั้น

$$\begin{aligned} r_{1R} &= \text{รัศมีของราก} + \text{ความยาวชนราก} + r_{1RH} \\ &= 500 + 700 + 50 \\ &= 1250 \text{ ไมโครเมตร} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} r_{2R} &= 500 + 700 + 150 \\ &= 1350 \text{ ไมโครเมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$J_{1RH} = \frac{J_1 - \left(\frac{1350}{1250}\right)J_2}{1 - \left(\frac{1350}{1250}\right)\left(\frac{50}{150}\right)^2}$$

$$J_{1RH} = \frac{J_1 - 1.08J_2}{0.88} \quad (21)$$

ตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนรอกมีทิศเข้าสู่ปลายขนรอกด้วยขนาด 0.18 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโคนขนรอกที่วัดห่างออกไปจากแนวปลายขนรอกในบริเวณเดียวกันมีทิศออกจากโคนของขนรอกด้วยขนาด 0.43 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่องหมายลบแสดงทิศทางเข้าและเครื่องหมายบวกแสดงทิศทางออก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรอกมีความสัมพันธ์ตามสมการ 21 จะได้

$$J_{1RH} = \frac{-0.18 - (1.08 \times 0.43)}{0.88}$$

$$= -0.73 \text{ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร}$$

นั่นคือกระแสไฟฟ้ามืดเข้าสู่ปลายของขนรอกด้วยขนาด 0.73 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ในทำนองเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากรอบโคนขนรอกที่ระยะห่างออกไป 150 ไมโครเมตรเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากขนรอกและรากเช่นกัน ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณกระแสไฟฟ้าเนื่องจากตัวรากเองสามารถหาได้จากสมการ (16) – (19) ได้เป็นสมการ

$$J_2 = \frac{J_2 - \left(\frac{r_{1RH}}{r_{2RH}}\right)^2 J_1}{1 - \left(\frac{r_{2R}}{r_{1R}}\right)\left(\frac{r_{1RH}}{r_{2RH}}\right)^2} \quad (22)$$

$$= \frac{J_2 - \left(\frac{50}{150}\right)^2 J_1}{1 - \left(\frac{1350}{1250}\right)\left(\frac{50}{150}\right)^2}$$

$$= \frac{J_2 - 0.11J_1}{0.88} \quad (23)$$

ตัวอย่างเช่นวัดกระแสที่ปลายขนรากได้  $-0.24$  และ  $0.081$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรที่ระยะห่างจากปลายขนราก  $50$  และ  $150$  ไมโครเมตร ตามลำดับ

จาก

$$J_{2R} = \frac{J_2 - 0.11J_1}{0.88}$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} J_{2R} &= \frac{0.081 - 0.11(-0.24)}{0.88} \\ &= 0.12 \text{ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากรากที่ระยะห่างจากปลายขนราก  $150$  ไมโครเมตรมีขนาด  $0.12$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ( $0.081$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) กระแสไฟฟ้าจากที่คำนวณได้จะมีค่ามากกว่าที่วัดได้อยู่  $33\%$  ในขณะที่ทิศของกระแสไฟฟ้าทั้งสองวิธียังคงมีทิศออกจากรากเหมือนกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อวัดกระแสไฟฟ้ารอบโคนของขนรากแต่ละตำแหน่งแล้วไม่สามารถเลื่อนโพรบใกล้เข้ามาหาขนรากเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนรากได้ทุกครั้ง เนื่องจากบางครั้งขนรากที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวมีจำนวนมากและอยู่กันหนาแน่นเกินไปทำให้ไม่สามารถแยกได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่วัดนั้นเกิดจากหนึ่งขนรากหรือจากกลุ่มของขนราก ดังนั้นกระแสไฟฟ้ารอบโคนของขนรากจะให้ค่าที่วัดได้ โดยกระแสไฟฟ้าดังกล่าวนี้น่าจะแสดงแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากจะใช้ค่าที่คำนวณตามสมการ (18)

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากมาคำนวณด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก  $59$  ขนราก (จาก  $70$  ขนราก) ด้วยขนาด  $0.12 - 1.65$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ย  $0.85 \pm 0.37$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก  $11$  ขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนรากด้วยขนาด  $0.048 - 0.85$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.42 \pm 0.27$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นั่นคือใน  $70$  ขนรากมี  $84\%$  ที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก ในขณะที่บริเวณรอบโคนของขนรากมีกระแสไฟฟ้าออกจากบริเวณนี้ด้วยขนาด  $0.10 - 2.0$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับในขนรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) ที่พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากและมีทิศออกจากรากบริเวณของโคนของขนราก



นอกจากนี้ได้วัดกระแสไฟฟ้าไอออนในบริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ก่อนถึงอาณาเขตของขนรากในสารละลาย APW pH  $6.00 \pm 0.05$  จำนวน 8 ราก พบว่ากระแสไฟฟ้าในรากเดียวกันบางตำแหน่งเข้าและบางตำแหน่งออก


ในการพิจารณาว่าทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนจากรากที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งมีทิศเข้าหรือออกอย่างมีนัยสำคัญ นำผลการทดลองจากทั้งหมด 8 ราก มาทดสอบทางสถิติโดยใช้การทดสอบประชากรกลุ่มเดียว ที่มี Z เป็นตัวทดสอบ ผลการทดสอบ (ตาราง 4 และภาพประกอบ 31) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากผิวรากและรอบโคนของขนรากที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P < 0.05$ ) ในช่วงที่ห่างจากโคนของราก 11.50 - 16.00 มิลลิเมตร ส่วนที่ตำแหน่งอื่นกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบไม่สามารถระบุได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าหรือออกอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่มีทิศออกจากโคนขนราก



ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนขรอกที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนรอกโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตรในสารละลาย APW pH 6.00

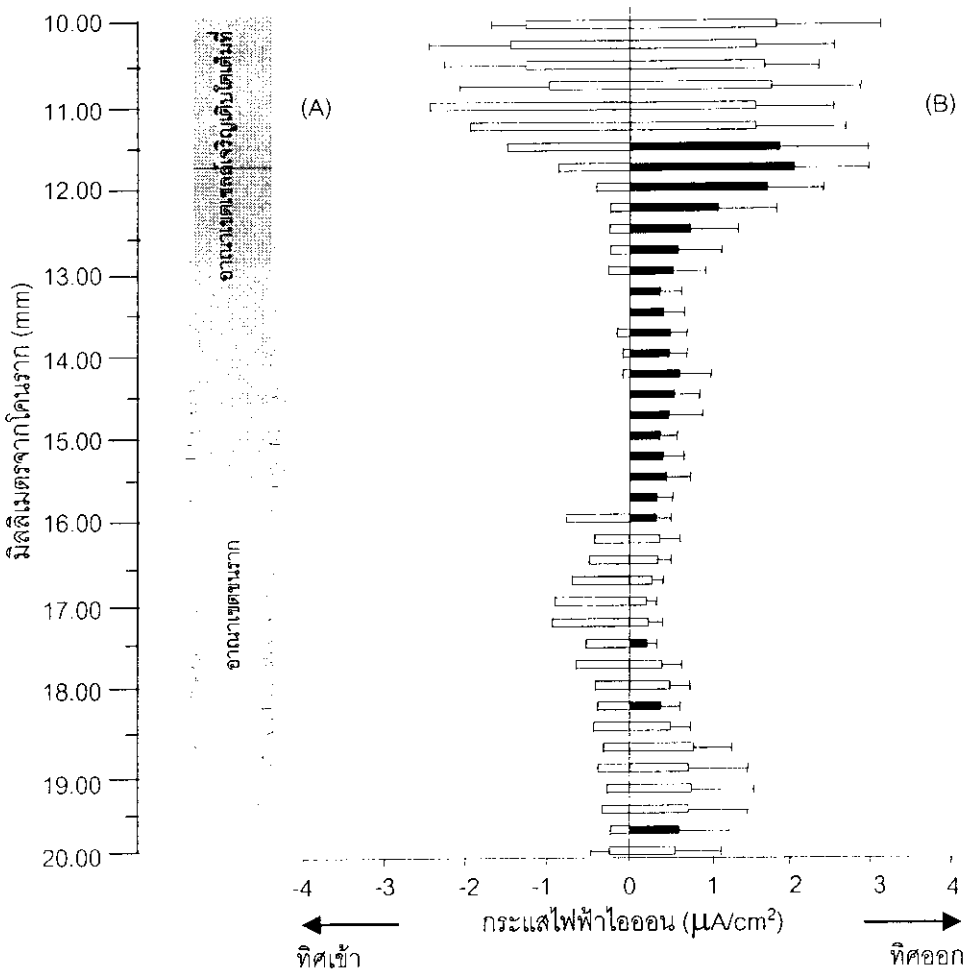
ระยะห่าง จากโคนรอก (mm)	กระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
10.00	1.81	1.29	4	-1.28	0.42	4
10.25	1.56	0.96	5	-1.47	1.00	3
10.50	1.66	0.66	5	-1.28	1.00	3
10.75	1.75	1.10	5	-1.00	1.09	3
11.00	1.55	0.96	6	-2.46	N	2
11.25	1.55	1.11	6	-1.96	N	2
11.50	1.85 <sup>a</sup>	1.09	7	-1.51	N	1
11.75	2.03 <sup>a</sup>	0.92	7	-0.88	N	1
12.00	1.70 <sup>a</sup>	0.69	7	-0.41	N	1
12.25	1.10 <sup>a</sup>	0.71	7	-0.24	N	1
12.50	0.75 <sup>a</sup>	0.59	7	-0.25	N	1
12.75	0.60 <sup>a</sup>	0.53	7	-0.24	N	1
13.00	0.53 <sup>a</sup>	0.41	7	-0.27	N	1
13.25	0.38 <sup>b</sup>	0.27	8	non	N	0
13.50	0.42 <sup>b</sup>	0.26	8	non	N	0
13.75	0.51 <sup>a</sup>	0.20	7	-0.15	N	1
14.00	0.50 <sup>a</sup>	0.21	7	-0.09	N	1
14.25	0.62 <sup>a</sup>	0.38	7	-0.09	N	1
14.50	0.55 <sup>b</sup>	0.31	8	non	N	0
14.75	0.49 <sup>b</sup>	0.41	8	non	N	0
15.00	0.38 <sup>b</sup>	0.21	8	non	N	0

ระยะห่าง จากโคนรอก (mm)	กระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
15.25	0.41 <sup>b</sup>	0.26	8	non	N	0
15.50	0.46 <sup>b</sup>	0.29	8	non	N	0
15.75	0.34 <sup>b</sup>	0.19	8	non	N	0
16.00	0.33 <sup>a</sup>	0.18	7	-0.79	N	1
16.25	0.37	0.25	6	-0.43	N	2
16.50	0.35	0.16	6	-0.50	N	2
16.75	0.29	0.13	6	-0.71	N	2
17.00	0.21	0.12	6	-0.93	N	2
17.25	0.23	0.17	6	-0.95	N	2
17.50	0.22 <sup>a</sup>	0.12	7	-0.54	N	1
17.75	0.41	0.24	6	-0.66	N	2
18.00	0.50	0.25	6	-0.42	N	2
18.25	0.39 <sup>a</sup>	0.23	7	-0.39	N	1
18.50	0.51	0.24	6	-0.45	N	2
18.75	0.80	0.46	6	-0.32	N	2
19.00	0.73	0.73	6	-0.39	N	2
19.25	0.77	0.77	6	-0.28	N	2
19.50	0.73	0.73	6	-0.33	N	2
19.75	0.62 <sup>a</sup>	0.62	7	-0.23	N	1
20.00	0.57	0.57	6	-0.24	0.24	2

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$   อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

 อาณาเขตขรอก  แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 31 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเชลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนขนรอกทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH  $6.00 \pm 0.05$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) ตำแหน่งการวัดจากโคนรอกในอาณาเขตเชลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรอก

(B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าจากผลทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.2 รูปแบบกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะวันเมื่อเปลี่ยน pH ของสารละลาย APW

ในการพิจารณาว่า pH (ปริมาณ  $H^+$ ) มีผลต่อกระแสไฟฟ้าไอออนในขนรากอย่างไร ทำการทดลองโดยวัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากและรอบโคนของขนรากในสารละลาย APW pH  $4.00 \pm 0.05$  และ  $8.00 \pm 0.05$

#### 3.2.1 pH 4.00

วัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนราก ทั้งหมด 50 ขนราก จาก 12 ราก พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากจำนวน 31 ขนราก ด้วยขนาด 0.18 – 2.45 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 19 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนรากด้วยขนาด 0.13 – 1.68 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

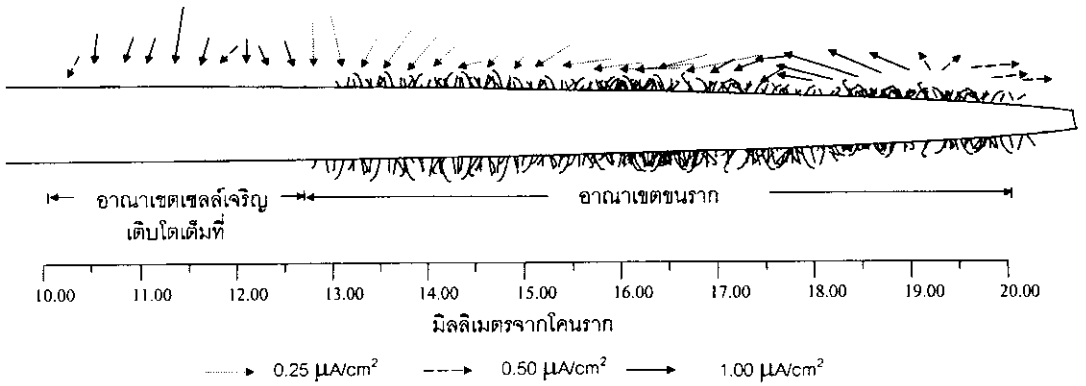
สำหรับกระแสไฟฟ้าภายนอกรากในบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ก่อนอาณาเขตขนรากบางรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออก บางรากมีทิศเข้า และมีบางรากที่อยู่ในบริเวณนี้ กระแสไฟฟ้าในบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออก โดยกระแสไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 0.10 – 2.9 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโคนขนรากมีทั้งทิศเข้าและออกจากรากโดยมีขนาด 0.10 – 2.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองทั้ง 12 ราก สามารถแบ่งรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแบ่งออกได้สองรูปแบบด้วยกัน คือ

รูปแบบที่ 1 (ภาพประกอบ 32) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนของขนรากระหว่างระยะ 10.00 – 17.00 มิลลิเมตรจากโคนราก โดยค่ากระแสไฟฟ้าเข้าที่บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.11 – 2.97 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และบริเวณโคนของขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าด้วยขนาด 0.22 – 1.16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในส่วนที่เหลือของโคนขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด 0.12-0.50 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก 20 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนราก 12 ขนราก ด้วยขนาด 0.17 – 2.07 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.46 \pm 0.30$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 8 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากด้วยขนาด 0.17 – 2.07 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยขนาดเฉลี่ย  $0.66 \pm 0.61$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยในรูปแบบนี้พบ 6 ราก จาก 12 ราก

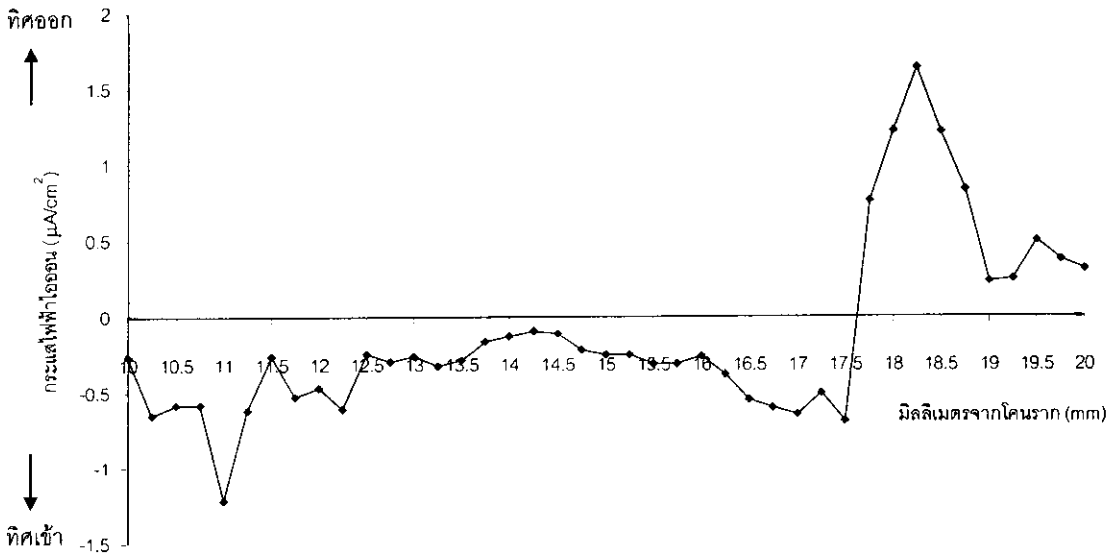
รูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบ 33) ในบางรากกระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณผิวรากในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ทิศเข้าเพียงอย่างเดียวและแต่ในบางรากบางตำแหน่งกระแสไฟฟ้ามีทิศ

เข้าบางตำแหน่งมีทิศออก ด้วยขนาด 0.18 – 2.91 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอาณาเขตชนรากับรากบริเวณอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ จะมีทิศเข้า (12.50 – 14.00 มิลลิเมตร) ด้วยขนาด 0.23 – 0.97 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในส่วนที่เหลือของอาณาเขตของชนรากกระแสไฟฟ้าในบางตำแหน่งมีทิศออก และบางตำแหน่งมีทิศเข้าด้วยขนาด 0.07 - 1.11 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ปลายชนรากที่วัดได้ 30 ชนรากที่มี มี 23 ชนราก ที่มีกระแสไฟฟ้าทิศเข้าสู่ปลายชนรากด้วยขนาด 0.17 – 1.94 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ย  $0.82 \pm 0.55$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอีก 7 ชนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายชนรากด้วยขนาด 0.12 – 1.58 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกันโดยหาค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่งทั้งในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนชนราก ให้ผลการทดสอบดังตาราง 5 ภาพประกอบ 34 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) ที่ระยะตั้งแต่ 10.00 – 14.00 มิลลิเมตร (ยกเว้นตำแหน่งที่ 12.00 มิลลิเมตร) ส่วนที่ตำแหน่งอื่นๆ ไม่สามารถระบุได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าหรือออกอย่างมีนัยสำคัญ



(A)

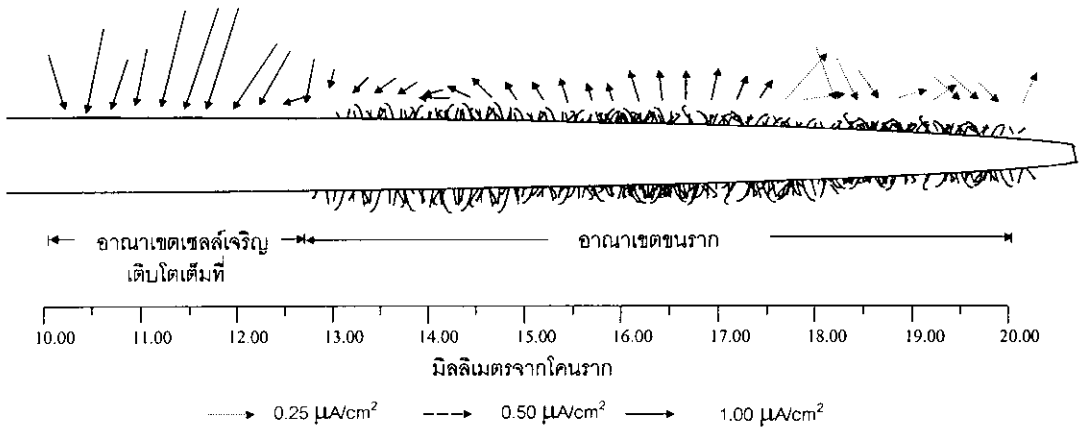


(B)

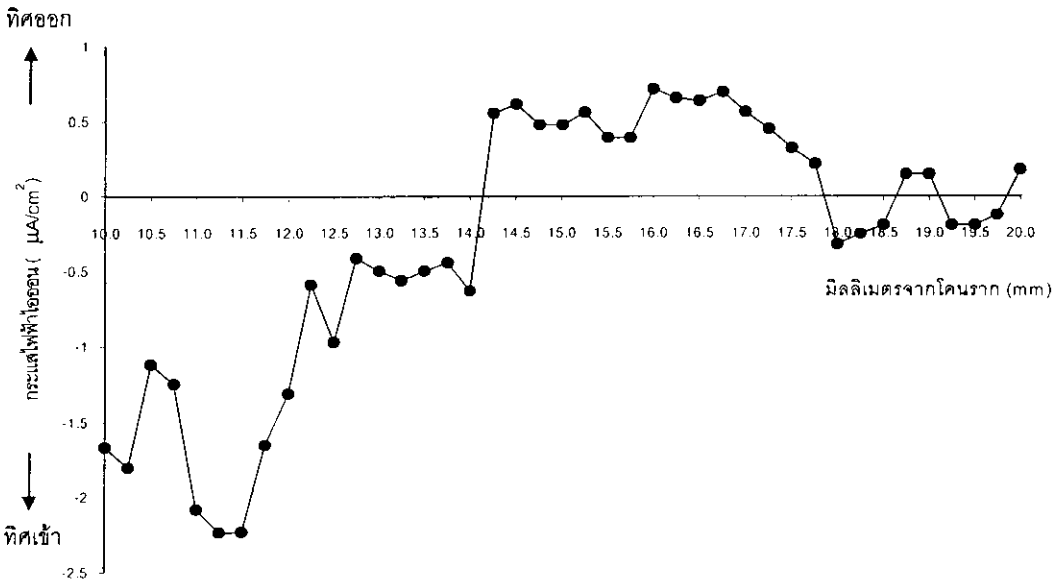
ภาพประกอบ 32 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนชนราก รูปแบบที่ 1 ใน APW pH 4.00

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า

(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนชนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)



(A)



(B)

ภาพประกอบ 33 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนขนราก รูปแบบที่ 2 ใน APW pH 4.00

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า


(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50



มิลลิเมตร) และรอบโซนขนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)

ตาราง 5 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตรในสารละลาย APW pH 4.00 ± 0.05

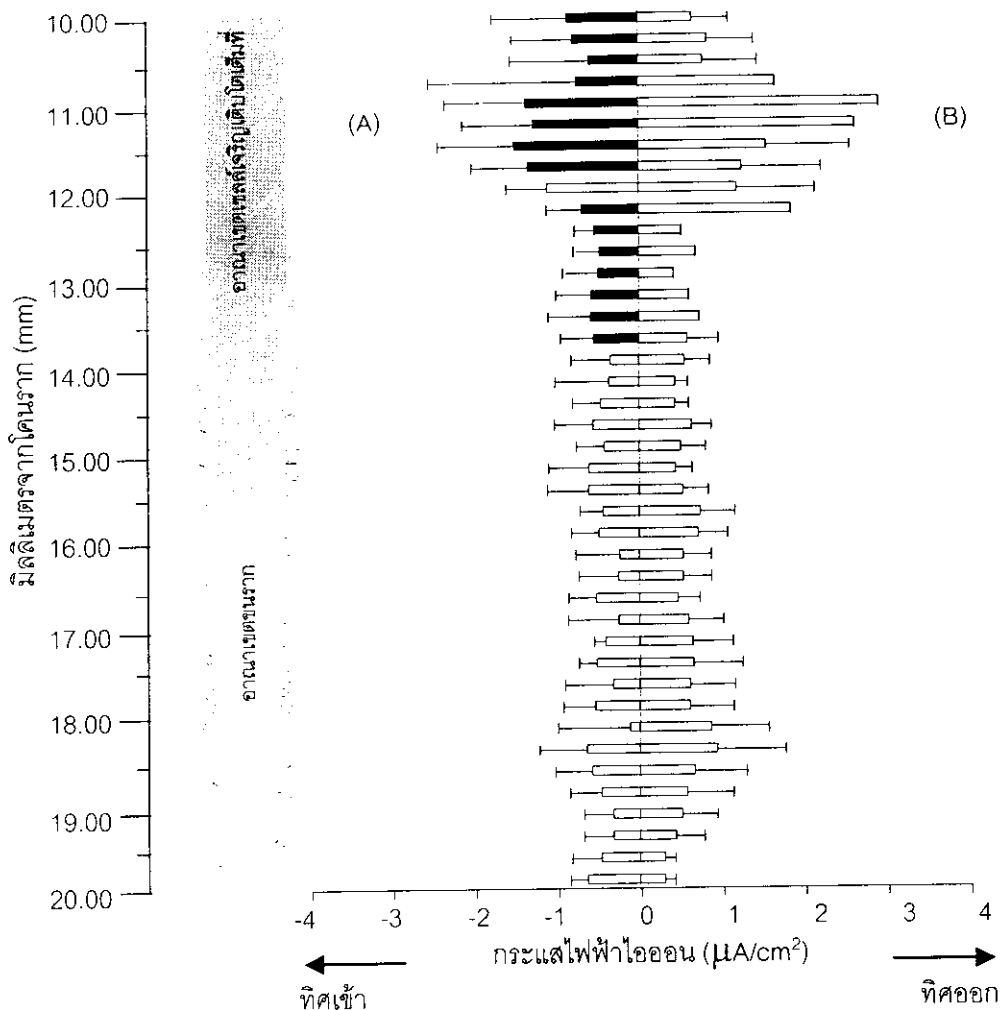
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
10.00	0.66	0.44	3	-0.86 <sup>a</sup>	0.91	9
10.25	0.84	0.56	3	-0.80 <sup>a</sup>	0.73	9
10.50	0.79	0.66	3	-0.60 <sup>a</sup>	0.96	9
10.75	1.66	N	3	-0.76 <sup>a</sup>	1.79	9
11.00	2.91	N	1	-1.37 <sup>b</sup>	0.97	11
11.25	2.62	N	1	-1.27 <sup>b</sup>	0.86	11
11.50	1.55	1.01	3	-1.51 <sup>b</sup>	0.93	9
11.75	1.25	0.95	3	-1.35 <sup>b</sup>	0.67	9
12.00	1.19	0.94	4	-1.11	0.49	8
12.25	1.85	N	2	-0.70 <sup>a</sup>	0.41	10
12.50	0.52	N	2	-0.55 <sup>a</sup>	0.23	10
12.75	0.69	N	1	-0.48 <sup>b</sup>	0.27	11
13.00	0.43	N	1	-0.49 <sup>b</sup>	0.40	11
13.25	0.61	N	2	-0.58 <sup>a</sup>	0.43	10
13.50	0.74	N	2	-0.59 <sup>a</sup>	0.51	10
13.75	0.59	0.37	3	-0.55 <sup>a</sup>	0.40	9
14.00	0.55	0.30	5	-0.34	0.49	7
14.25	0.44	0.15	6	-0.36	0.66	6
14.50	0.43	0.17	5	-0.47	0.35	7
14.75	0.64	0.23	5	-0.56	0.48	7
15.00	0.51	0.30	5	-0.42	0.35	7
15.25	0.45	0.19	5	-0.61	0.49	7
15.50	0.54	0.31	5	-0.61	0.50	7
15.75	0.75	0.42	5	-0.44	0.29	7
16.00	0.72	0.35	6	-0.49	0.34	6
16.25	0.54	0.34	5	-0.24	0.54	7
16.50	0.54	0.34	5	-0.25	0.49	7
16.75	0.47	0.27	6	-0.53	0.34	6
17.00	0.60	0.43	5	-0.25	0.62	7
17.25	0.65	0.48	5	-0.41	0.14	7
17.50	0.66	0.59	6	-0.52	0.22	6
17.75	0.62	0.54	7	-0.32	0.60	5
18.00	0.61	0.53	6	-0.54	0.39	6
18.25	0.87	0.69	4	-0.11	0.89	8
18.50	0.94	0.82	4	-0.65	0.57	8
18.75	0.67	0.62	6	-0.58	0.46	6
19.00	0.58	0.56	8	-0.46	0.39	4
19.25	0.51	0.43	8	-0.32	0.36	4
19.50	0.44	0.34	8	-0.32	0.36	4
19.75	0.30	0.12	8	-0.46	0.37	4
20.00	0.31	0.12	9	-0.64	0.21	3

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$   อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

 อาณาเขตขนราก  แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ





ภาพประกอบ 34 แสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนชนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH  $4.00 \pm 0.05$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) ตำแหน่งการวัดจากโคจรากอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนชนราก

(B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ส่วนที่แรงแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าจากผลทดสอบทางสถิติที่ระควมเชื่อมั่น 95 %

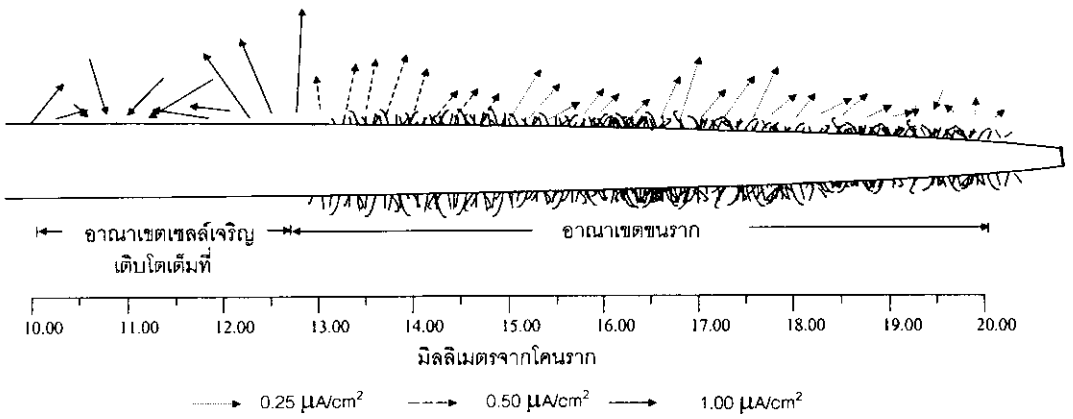
### 3.2.2 pH 8.00

ใน APW pH 8.00 จากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากทานตะวันทั้งหมด 30 ขนราก จาก 9 ราก พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนราก 9 ขนราก ด้วยขนาด 0.11 – 0.93 ไมโครแอมแปร์ต่อ ตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.41 \pm 0.28$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 21 ขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด 0.029 – 1.22 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ย  $0.28 \pm 0.27$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับกระแสไฟฟ้าภายนอกกรากในบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มก่อนอาณาเขตขนราก กระแสไฟฟ้าบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออก โดยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.11 – 3.95 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโคนขนรากมีทั้งทิศเข้าและออกจากกรากโดยมีขนาด 0.10 – 2.41 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองทั้ง 9 ราก สามารถแบ่งรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแบ่งออกได้สองรูปแบบด้วยกัน คือ

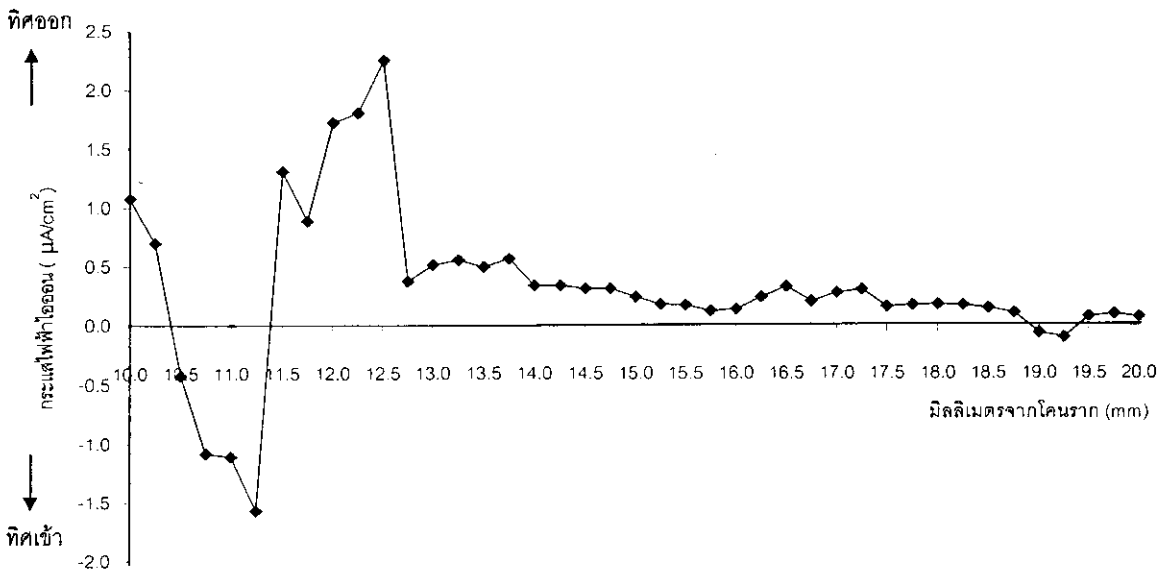
รูปแบบที่ 1 (ภาพประกอบ 35) พบกระแสไฟฟ้ารูปแบบนี้ 4 รากจากทั้งหมด 9 ราก โดยบริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่กระแสไฟฟ้าบางตำแหน่งมีทิศเข้าบางตำแหน่งมีทิศออกด้วยขนาด 0.67 – 3.21 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโคนของขนรากมีทิศออกมีขนาดอยู่ในช่วง 0.10 – 0.93 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่วัดได้ 12 ขนรากในรูปแบบนี้ พบว่า 2 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าด้วยขนาดเฉลี่ย 0.31 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 10 ขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด 0.06 – 1.22 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.35 \pm 0.35$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

รูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบ 36) กระแสไฟฟ้าในบริเวณเซลล์เจริญเติบโตบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออก โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 0.11 – 3.95 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโคนของขนรากมีทิศออกตอนต้นของโคนของขนราก ที่ระยะ 12.50 – 14.50 มิลลิเมตรจากโคนราก มีขนาดอยู่ในช่วง 0.10 – 2.41 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หลังจากระยะนี้ไปแล้วกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่โคนของขนรากด้วยขนาด 0.10 – 1.16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งพบกระแสไฟฟ้ารูปแบบนี้ 5 ราก สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากวัดได้ 18 ขนราก โดยที่ 7 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าด้วยขนาด 0.10 – 0.93 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.43 \pm 0.31$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้ามีทิศออก 11 ขนราก มีขนาดอยู่ในช่วง 0.029 – 0.53 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ย  $0.22 \pm 0.18$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกันโดยหาค่าเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งของทุกรากและทดสอบทิสที่มีนัยสำคัญโดยวิธีทางสถิติ (ตาราง 6 และภาพประกอบ 37) พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากในสวนต้นของโชนขนรากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P < 0.05$ ) ส่วนที่ตำแหน่งอื่นๆ ทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้า - ออก ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



(A)

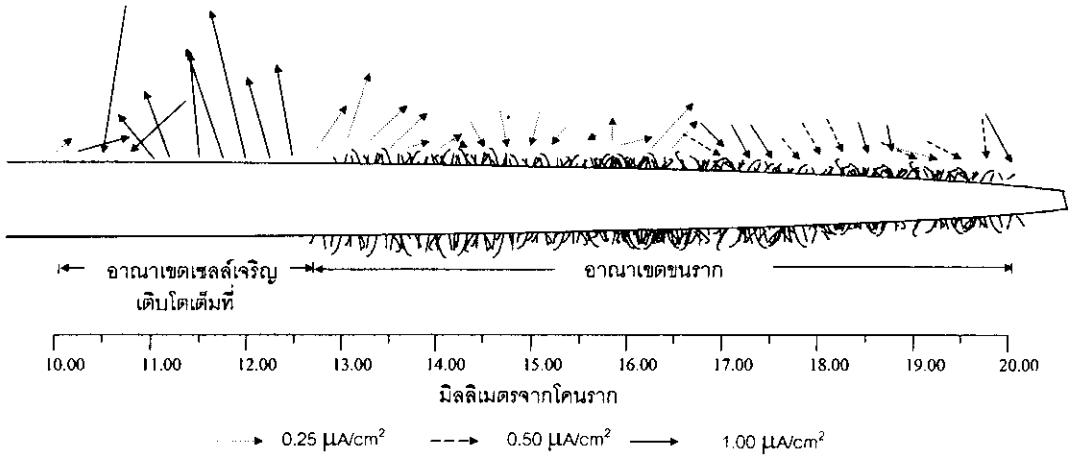


(B)

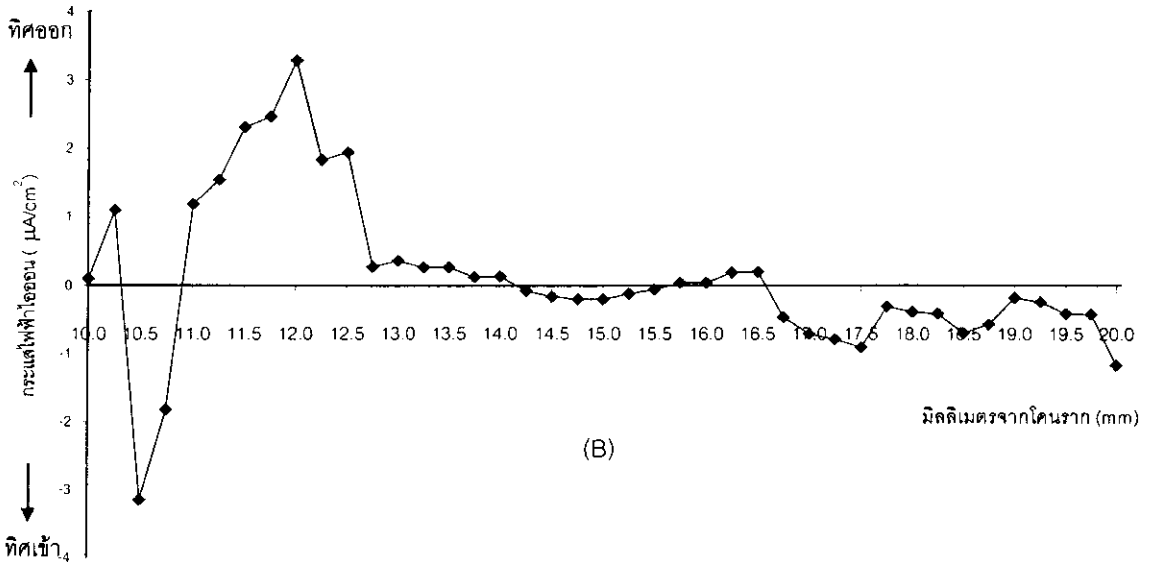
ภาพประกอบ 35 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนขนราก รูปแบบที่ 1 ใน APW pH 8.00

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า

(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนขนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)



(A)



(B)

ภาพประกอบ 36 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนชนราก รูปแบบที่ 2 ใน APW pH 8.00

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า

(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนชนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)

ตาราง 6 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย APW pH 8.00 ± 0.05

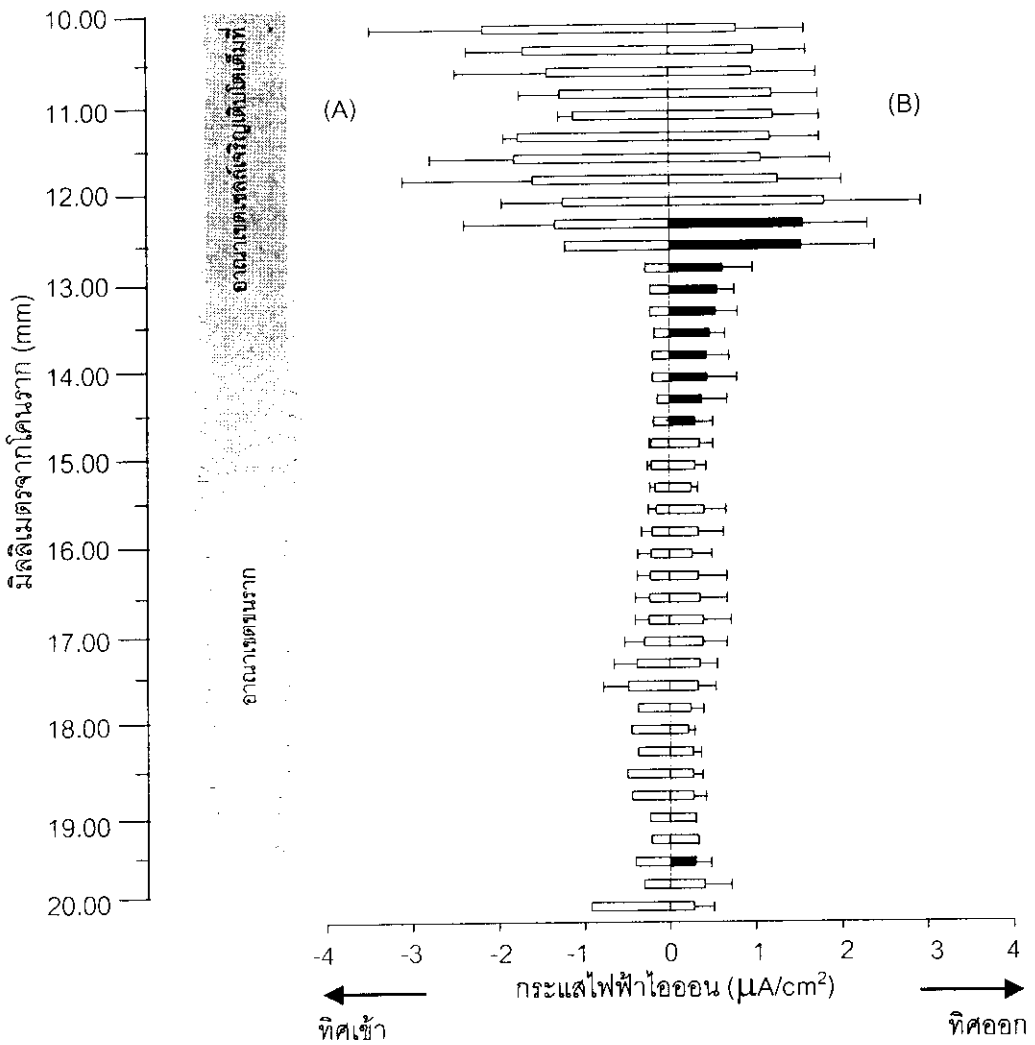
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน
10.00	0.79	0.79	5	-2.16	1.32	4
10.25	0.99	0.61	6	-1.69	0.66	3
10.50	0.96	0.75	4	-1.43	1.06	5
10.75	1.20	0.53	4	-1.27	0.48	5
11.00	1.21	0.53	6	-1.12	0.17	3
11.25	1.18	0.57	6	-1.76	0.17	3
11.50	1.07	0.80	6	-1.81	0.98	3
11.75	1.27	0.74	6	-1.59	1.51	3
12.00	1.80	1.12	5	-1.24	0.72	4
12.25	1.56 <sup>a</sup>	0.75	6	-1.33	1.06	3
12.50	1.54 <sup>a</sup>	0.86	7	-1.22	N	2
12.75	0.62 <sup>b</sup>	0.35	7	-0.28	N	2
13.00	0.56 <sup>b</sup>	0.20	8	-0.22	N	1
13.25	0.54 <sup>b</sup>	0.25	8	-0.23	N	1
13.50	0.47 <sup>b</sup>	0.18	8	-0.18	N	1
13.75	0.44 <sup>a</sup>	0.26	8	-0.19	N	1
14.00	0.44 <sup>a</sup>	0.35	8	-0.19	N	1
14.25	0.38 <sup>a</sup>	0.29	7	-0.14	N	2
14.50	0.30 <sup>a</sup>	0.20	7	-0.18	N	2
14.75	0.35	0.16	6	-0.21	0.02	3
15.00	0.30	0.13	6	-0.21	0.05	3

ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน
15.25	0.26	0.06	4	-0.17	0.07	5
15.50	0.40	0.09	6	-0.15	0.25	3
15.75	0.34	0.13	6	-0.20	0.30	3
16.00	0.27	0.16	6	-0.21	0.23	3
16.25	0.34	0.16	6	-0.22	0.33	3
16.50	0.36	0.17	6	-0.23	0.31	3
16.75	0.40	0.17	5	-0.24	0.32	4
17.00	0.39	0.24	4	-0.29	0.28	5
17.25	0.35	0.27	3	-0.38	0.20	4
17.50	0.33	0.30	3	-0.48	0.21	5
17.75	0.24	0.12	4	-0.37	0.15	2
18.00	0.21	0.10	4	-0.45	0.07	2
18.25	0.27	0.21	3	-0.37	0.09	4
18.50	0.27	0.31	3	-0.50	0.11	3
18.75	0.27	0.32	3	-0.44	0.15	3
19.00	0.30	0.24	2	-0.24	N	4
19.25	0.32	0.14	2	-0.22	N	4
19.50	0.29 <sup>a</sup>	0.19	5	-0.40	N	1
19.75	0.40	0.14	3	-0.30	0.31	3
20.00	0.28	N	3	-0.92	0.22	2

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$    อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

  อาณาเขตขนราก   แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 37 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเชลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH  $8.00 \pm 0.05$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

- (A) ตำแหน่งการวัดจากโคนอาณาเขตเชลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนราก
- (B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าจากผลทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.3 เปรียบเทียบรูปแบบกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW ที่มี pH ต่างกัน

#### 3.3.1 กระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก

เมื่อเปรียบเทียบทิศของกระแสไฟฟ้ารอบๆ รากใน pH 4.00 6.00 และ 8.00 (ภาพประกอบ 38) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าและออกอย่างมีนัยสำคัญที่แต่ละ pH มีลักษณะแตกต่างกันโดยใน pH 4.00 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ ส่วน pH 6.00 และ pH 8.00 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญบริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และตอนต้นอาณาเขตขนราก ผลดังกล่าวคล้ายคลึงกับที่พบในรากทานตะวันที่มีอายุ 2 วันซึ่งยังไม่มีขนราก (จุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์, 2544 ; ฌ็องรูฟงค์ ถือดำ, 2545) ที่พบว่า ที่ pH 6.00 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากในอาณาเขตที่จะเกิดขนรากและในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ สำหรับ pH 8.00 กระแสไฟฟ้ามีลักษณะเช่นเดียวกับใน pH 6.00 และจะเปลี่ยนเป็นทิศเข้าเมื่อมี pH 4.00 (จุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์, 2544)

ในการพิจารณาผลของ pH ต่อขนาดของกระแสไฟฟ้า นำขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่งของทุกรากใน pH เดียวกันมาหาค่าเฉลี่ยหลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับวิธีสถิติว่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนที่สภาวะของ APW ต่างๆ นั่นคือ pH 4.00 6.00 และ 8.00 จะมีความแตกต่างกันอย่างไร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 คู่ (ตาราง 7) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

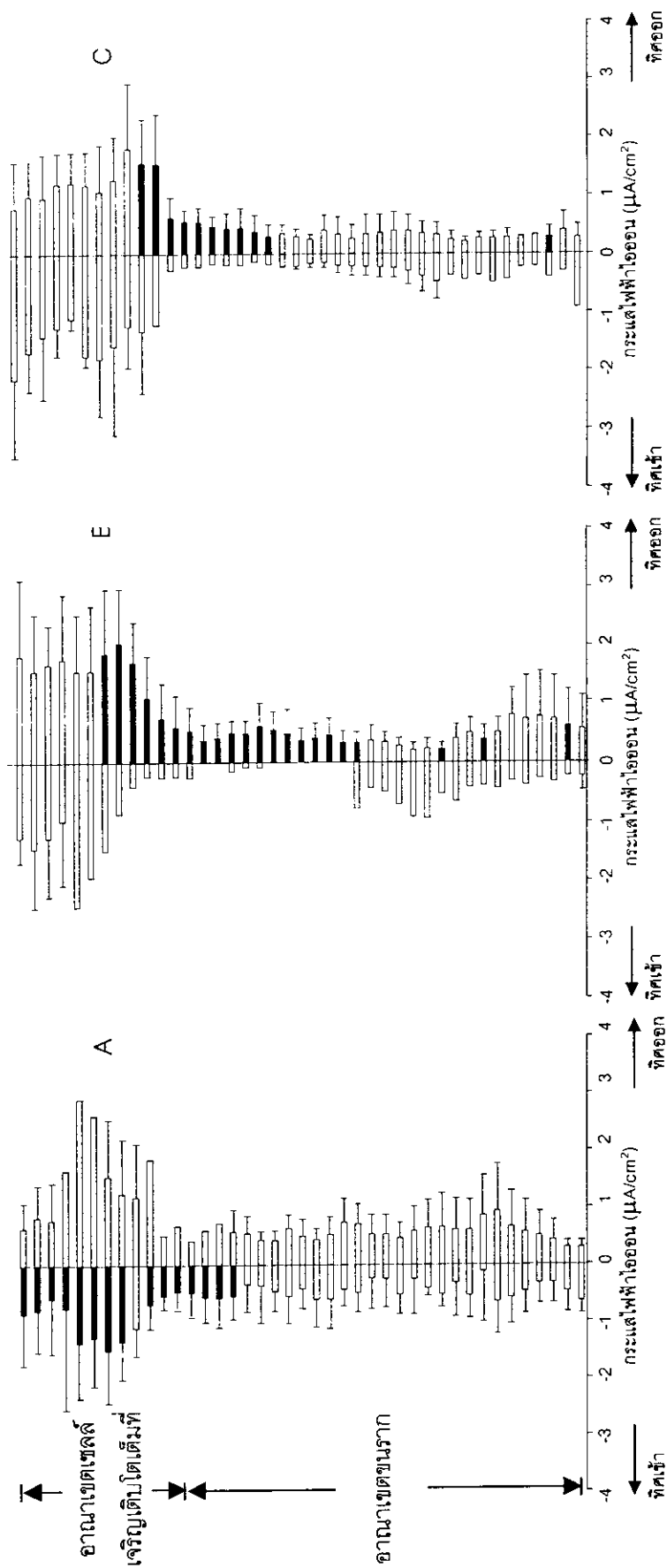
1) ระหว่าง APW pH 4.00 กับสภาวะปกติ pH 6.00 ใน pH 4.00 กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดน้อยกว่าที่สภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ที่ตำแหน่ง 1-3 และ 8-9 ซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และที่ตำแหน่ง 40 ในอาณาเขตขนราก และมีขนาดมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ที่ตำแหน่งที่ 24, 25 และ 31 ตามลำดับในอาณาเขตขนราก

2) ระหว่าง APW pH 4.00 กับ pH 8.00 พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าใน pH 4.00 มากกว่าที่ pH 8.00 อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) 17 ตำแหน่งจาก 41 ตำแหน่ง นั่นคือที่ตำแหน่ง 19 -26 28-29 และ 32-38 และที่ตำแหน่ง 10 - 11 ขนาดของกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า pH 8.00 อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ )

3) ระหว่าง APW pH 6.00 และ pH 8.00 ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 มีค่ามากกว่า pH 8.00 อย่างมีนัยสำคัญ 8 ตำแหน่ง และขนาดกระแสไฟฟ้ามีขนาดน้อยกว่า pH 8.0 อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) เพียงตำแหน่งเดียว



จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นว่าระหว่าง pH 4.00 กับ pH 6.00 และ pH 6.00 กับ pH 8.00 ขนาดของกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ( $P < 0.10$ ) แต่จะมีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่าง APW pH 4.00 กับ pH 8.00 ซึ่งพบว่ากระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) นั่นคือเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจาก pH เพิ่มขึ้นปริมาณของ  $H^+$  ในสารละลายจะลดลง ดังนั้นการลดลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจึงเป็นตัวชี้ว่า  $H^+$  น่าจะมีส่วนสำคัญในการเกิดกระแสดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองในรากทานตะวันสอดคล้องกับการศึกษาในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) และรากข้าวโพด (Miller, 1989; Shabala *et al.*, 1997)



ภาพประกอบ 38 ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน ( $\pm$  SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนขนราก ใน APW ที่ pH ต่างๆ

ส่วนที่แรงแสดงทิศทางที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

(A) APW pH 4.00 (B) APW pH 6.00 (C) APW pH 8.00

ตาราง 7 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละจากเปรียบเทียบระหว่างจากในสภาวะลายสมภาวะปกติ (APW pH 6.00) กับ APW pH 4.00 pH 4.00 กับ pH 8.00 และสมภาวะปกติ กับ pH8.00

ตำแหน่ง	ระยะเวลา จาก โคนราก	APW pH 4.0 กับ APW pH 6.0		APW pH 4.0 กับ APW pH 8.0		APW pH 6.0 กับ APW pH 8.0	
		t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ
1	10:00	-1.882	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>a</sup>	-1.329	ไม่มีความแตกต่าง	0.278	ไม่มีความแตกต่าง
2	10:25	-2.037	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>b</sup>	-1.346	APW pH 4.0 < APW pH 8.0 <sup>b</sup>	0.754	ไม่มีความแตกต่าง
3	10:50	-2.050	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>b</sup>	-1.003	ไม่มีความแตกต่าง	0.717	ไม่มีความแตกต่าง
4	10:75	-1.193	ไม่มีความแตกต่าง	-0.007	ไม่มีความแตกต่าง	1.297	ไม่มีความแตกต่าง
5	11:00	-0.781	ไม่มีความแตกต่าง	0.610	ไม่มีความแตกต่าง	1.516	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
6	11:25	-0.622	ไม่มีความแตกต่าง	0.027	ไม่มีความแตกต่าง	0.683	ไม่มีความแตกต่าง
7	11:50	-0.667	ไม่มีความแตกต่าง	0.502	ไม่มีความแตกต่าง	1.035	ไม่มีความแตกต่าง
8	11:75	-1.528	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>a</sup>	-0.140	ไม่มีความแตกต่าง	1.066	ไม่มีความแตกต่าง
9	12:00	-1.263	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>a</sup>	-1.185	ไม่มีความแตกต่าง	-0.042	ไม่มีความแตกต่าง
10	12:25	-0.322	ไม่มีความแตกต่าง	-1.811	APW pH 4.0 < APW pH 8.0 <sup>b</sup>	-1.291	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.10$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  c แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.025$  d แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

e แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.005$  ..... ตำแหน่งที่ 1- 11 (10.00 - 12.50 มิลลิเมตร) คือ จำนวนเซตเรลส์ที่เจริญเติบโตเต็มที่

..... ตำแหน่ง 11- 41 (12.75 - 20.00 มิลลิเมตร) คือ จำนวนเซตของขนาดกระแสไฟฟ้าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตำแหน่ง	ระยะจากโคนราก	APW pH 4.0 กับ APW pH 6.0		APW pH 4.0 กับ APW pH 8.0		APW pH 6.0 กับ APW pH 8.0	
		t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ
11	12.50	-0.673	ไม่มีความแตกต่าง	-3.526	APW pH 4.0 < APW pH 8.0 <sup>a</sup>	-2.200	APW pH 6.0 < APW pH 8.0 <sup>b</sup>
12	12.75	-0.349	ไม่มีความแตกต่าง	-0.379	ไม่มีความแตกต่าง	0.041	ไม่มีความแตกต่าง
13	13.00	-0.075	ไม่มีความแตกต่าง	-0.236	ไม่มีความแตกต่าง	-0.141	ไม่มีความแตกต่าง
14	13.25	1.250	ไม่มีความแตกต่าง	0.462	ไม่มีความแตกต่าง	-1.002	ไม่มีความแตกต่าง
15	13.50	0.980	ไม่มีความแตกต่าง	0.930	ไม่มีความแตกต่าง	-0.130	ไม่มีความแตกต่าง
16	13.75	0.650	ไม่มีความแตกต่าง	0.964	ไม่มีความแตกต่าง	0.425	ไม่มีความแตกต่าง
17	14.00	0.487	ไม่มีความแตกต่าง	0.654	ไม่มีความแตกต่าง	0.216	ไม่มีความแตกต่าง
18	14.25	-0.430	ไม่มีความแตกต่าง	0.908	ไม่มีความแตกต่าง	1.335	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>c</sup>
19	14.50	-0.749	ไม่มีความแตกต่าง	1.602	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	2.170	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>c</sup>
20	14.75	0.578	ไม่มีความแตกต่าง	2.008	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.172	ไม่มีความแตกต่าง
21	15.00	0.610	ไม่มีความแตกต่าง	1.586	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.268	ไม่มีความแตกต่าง
22	15.25	0.817	ไม่มีความแตกต่าง	2.387	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	2.164	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>c</sup>
23	15.50	0.701	ไม่มีความแตกต่าง	1.582	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.045	ไม่มีความแตกต่าง
24	15.75	1.610	APW pH 4.0 > APW pH 6.0 <sup>a</sup>	1.848	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.424	ไม่มีความแตกต่าง
25	16.00	1.500	APW pH 4.0 > APW pH 6.0 <sup>a</sup>	2.573	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.294	ไม่มีความแตกต่าง

ตาราง 7 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ระยะเวลา จาก โดนราก	APW pH 4.0 กับ APW pH 6.0		APW pH 4.0 กับ APW pH 8.0		APW pH 6.0 กับ APW pH 8.0	
		t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ	t (df=18)	ผลการทดสอบ
26	16.25	0.994	ไม่มีความแตกต่าง	1.660	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.638	ไม่มีความแตกต่าง
27	16.50	0.709	ไม่มีความแตกต่าง	1.286	ไม่มีความแตกต่าง	0.576	ไม่มีความแตกต่าง
28	16.75	0.791	ไม่มีความแตกต่าง	1.401	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.432	ไม่มีความแตกต่าง
29	17.00	0.821	ไม่มีความแตกต่าง	1.543	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.286	ไม่มีความแตกต่าง
30	17.25	0.513	ไม่มีความแตกต่าง	1.065	ไม่มีความแตกต่าง	0.240	ไม่มีความแตกต่าง
31	17.50	1.713	APW pH 4.0 > APW pH 6.0 <sup>a</sup>	0.972	ไม่มีความแตกต่าง	-0.966	ไม่มีความแตกต่าง
32	17.75	0.611	ไม่มีความแตกต่าง	1.644	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.224	ไม่มีความแตกต่าง
33	18.00	0.574	ไม่มีความแตกต่าง	1.735	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	2.035	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
34	18.25	1.327	ไม่มีความแตกต่าง	1.774	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.850	ไม่มีความแตกต่าง
35	18.50	1.055	ไม่มีความแตกต่าง	1.509	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	0.933	ไม่มีความแตกต่าง
36	18.75	-0.234	ไม่มีความแตกต่าง	1.350	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.773	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
37	19.00	-0.476	ไม่มีความแตกต่าง	1.530	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	2.151	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
38	19.25	-0.662	ไม่มีความแตกต่าง	1.511	APW pH 4.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>	1.845	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
39	19.50	-1.155	ไม่มีความแตกต่าง	0.710	ไม่มีความแตกต่าง	1.536	APW pH 6.0 > APW pH 8.0 <sup>a</sup>
40	19.75	-1.464	APW pH 4.0 < APW pH 6.0 <sup>a</sup>	0.053	ไม่มีความแตกต่าง	1.289	ไม่มีความแตกต่าง
41	20.00	-1.035	ไม่มีความแตกต่าง	-1.311	ไม่มีความแตกต่าง	-0.260	ไม่มีความแตกต่าง

### 3.3.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก

จากการศึกษาผลของ pH ของสารละลายภายนอกต่อกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนราก โดยวัดกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่ pH 6.00 pH 4.00 และ pH 8.00 ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อนำค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนที่วัดได้ที่ปลายขนรากที่ pH ของสารละลายต่างๆ ดังแสดงในตาราง 8 มาเปรียบเทียบกัน (ภาพประกอบที่ 39) ที่ pH 6.00 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ปลายขนรากสูงสุด โดยที่ pH 4.00 และ pH 8.00 มีขนาดน้อยกว่า 12% และ 52% ตามลำดับ สำหรับกระแสไฟฟ้าออก pH 4.00 มีขนาดเฉลี่ยมากที่สุด โดยมากกว่า pH 6.00 อยู่ 25% ส่วน pH 8.00 น้อยที่สุด โดยน้อยกว่า pH 6.00 อยู่ 33% เมื่อเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าทั้งที่ค้ำเข้าและออกด้วยวิธีทางสถิติดังแสดงตาราง 9 พบว่าระหว่าง pH 6.00 กับ pH 4.00 ขนาดของกระแสไฟฟ้าเข้าและออกไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) แต่มีขนาดมากกว่า pH 8.00 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ( $P < 0.10$ ) สำหรับผลการทดสอบระหว่าง pH 4.00 กับ pH 8.00 ขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ค้ำเข้าของ pH 4.00 มีขนาดมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งที่ค้ำเข้า ( $P < 0.05$ ) และออก ( $P < 0.10$ )

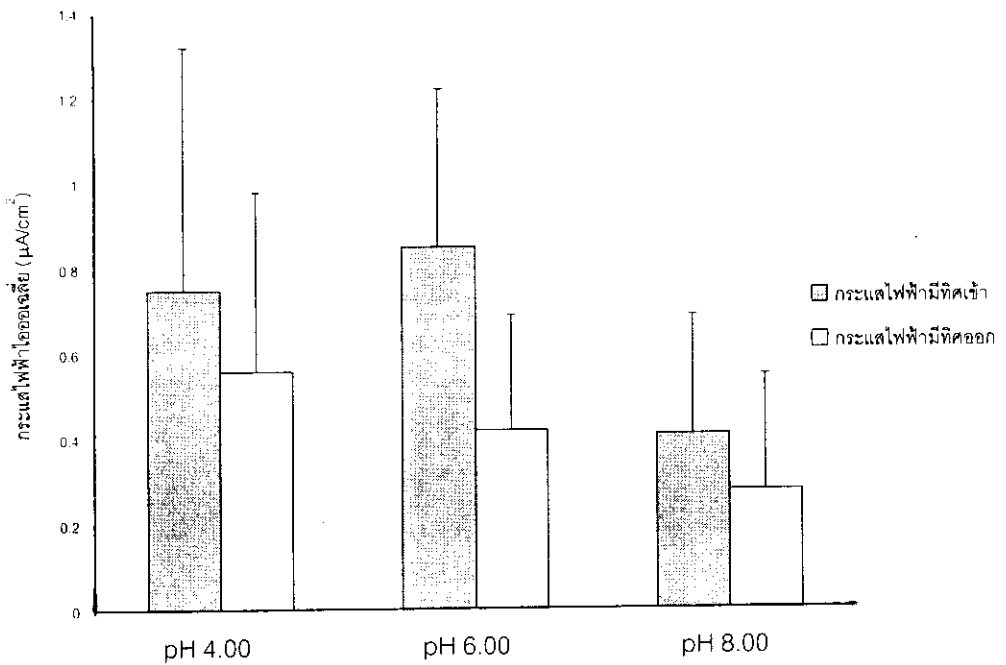
จากผลการทดสอบทางสถิติขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ระหว่าง pH 4.00 และ 6.00 แต่จะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง pH 6.00 กับ 8.00 และ pH 4.00 กับ 8.00 นั่นคือ เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นปริมาณของ  $H^+$  มีค่าลดลง การลดลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อค่า pH ขึ้น จึงเป็นตัวชี้ให้เห็นว่า  $H^+$  น่าจะมีส่วนสำคัญต่อการเกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งคล้ายคลึงกับที่พบในขนรากข้าวบาร์เลย์โดย Weisenseel และคณะ (1979) คือขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างๆ

สภาวะของสารละลาย APW	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปลายขนราก ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			
	มีทิศเข้า	จำนวน (ขนราก)	มีทิศออก	จำนวน (ขนราก)
pH 4.00	$0.75 \pm 0.57^a$	31	$0.56 \pm 0.42$	19
pH 6.00	$0.85 \pm 0.37^c$	59	$0.42 \pm 0.27$	11
pH 8.00	$0.41 \pm 0.28$	9	$0.28 \pm 0.27^b$	21

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$     b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.001$      ทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 39 กราฟเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW

pH 4.00 6.00 และ 8.00

ตาราง 9 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่ pH ต่าง ๆ ของสารละลาย APW

สถานะของสารละลาย APW	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปลายขนราก ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			
	ทิศเข้า		ทิศออก	
	t (df)	ผลการทดสอบ	t (df)	ผลการทดสอบ
pH 6.00 กับ pH 4.00	1.000 (88)	ไม่มีความแตกต่าง	-0.990 (28)	ไม่มีความแตกต่าง
pH 6.00 กับ pH 8.00	3.413 (66)	pH 6.00 > pH 8.00 <sup>a</sup>	1.393 (30)	pH 6.00 > pH 8.00 <sup>a</sup>
pH 4.00 กับ pH 8.00	1.718 (38)	pH 4.00 > pH 8.00 <sup>b</sup>	2.533 (38)	pH 4.00 > pH 8.00 <sup>a</sup>

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.10$     b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$     c แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.025$

d แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$      แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

### 3.3.3 อัตรายึดของขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างกัน

ในขณะที่วัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายของขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างกัน ซึ่งสามารถวัดอัตรายึดของขนรากได้เพียงบางขนรากเท่า เนื่องจากในบางขนรากไม่มีจุดสังเกตที่เด่นชัด จึงไม่สามารถวัดอัตรายึดได้ อัตรายึดของขนรากในแต่ละ pH ที่วัดได้แสดงไว้ในตาราง 10 จะเห็นได้ว่า ที่ pH 6.00 ขนรากมีอัตรายึดสูงสุด ทั้งในกรณีของกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าและมีทิศออกจากปลายขนราก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายึด ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้า พบว่าปริมาณดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน คืออัตรายึดจะลดลงเมื่อเปลี่ยน pH ของ APW จากสถานะปกติ pH 6.00 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแบ่งออกเป็นสองกรณีด้วยกัน

1) เมื่อ pH ลดลง กรณีที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนราก ที่ pH 6.00 ขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและอัตรายึดมากกว่า pH 4.00 อยู่ 49% และ 25% ตามลำดับ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกจากปลายขนรากไม่สามารถเปรียบเทียบได้ เนื่องจากที่ pH 6.00 สามารถวัดได้เพียงหนึ่งขนราก แต่อัตรายึดมีมากกว่า pH 4.00 เพียง 10% เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อ pH ของ APW ลดลง อัตรายึดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ pH 4.00 เป็นสถานะที่เป็นกรดโดยอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของขนราก กล่าวคือทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สถานะของสิ่งแวดล้อมที่มีสภาพความเป็นกรดเบส 5.7 – 8.0 จึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตของขนรากมีค่าลดลงซึ่งตรงกับผลการวิจัย จากการศึกษาค้นคว้าของ pH ต่อการงอกของขนรากใน *Arabidopsis thaliana* โดย Bibikava และคณะ (1998) ที่พบว่าที่ pH 4.00 จะยับยั้งการงอกของขนราก



2) เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายของขนรากพบว่า ขนาดของกระแสไฟฟ้าและอัตรายึดที่ pH 6.00 มากกว่า pH 8.00 อยู่ 31% และ 53% ตามลำดับ ทำนองเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกจากปลายขนราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าที่ pH 8.00 แต่อัตรายึดมีค่ามากกว่า นั่นคือ เมื่อ pH เพิ่มขึ้น อัตรายึดลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจาก ที่ pH 8.00 เป็น pH สูงสุดที่ทานตะวันเจริญเติบโตได้แต่อาจจะไม่เหมาะสมจึงทำให้อัตราการยึดของขนรากลดลงเช่นเดียวกับ pH 4.00

โดยสรุปในกรณีที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ขนราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าและอัตรายึด จะเพิ่มหรือลดไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนในกรณีที่กระแสไฟฟ้ามีทิศออกยังไม่สามารถสรุปได้เนื่องจากตัวอย่างน้อยเกินไป

ตาราง 10 อัตรายึดของขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างกัน

pH ของ APW	กระแสไฟฟ้า					
	มีทิศเข้า			มีทิศออก		
	ขนาดกระแสไฟฟ้า เฉลี่ย ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	อัตรายึด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	จำนวน (ขนราก)	ขนาดกระแสไฟฟ้า เฉลี่ย ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	อัตรายึด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	จำนวน (ขนราก)
4.00	$0.38 \pm 0.55$	$0.55 \pm 0.33$	6	$0.39 \pm 0.49$	$0.51 \pm 0.09$	4
6.00	$0.75 \pm 0.36$	$0.73 \pm 0.25$	7	0.058	0.57	1
8.00	$0.52 \pm 0.38$	$0.34 \pm 0.08$	3	$0.23 \pm 0.17$	$0.23 \pm 0.03$	5

### 3.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนบางชนิดต่อกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะวัน

สารละลาย APW ประกอบด้วยไอออนสี่ชนิด คือ แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) และคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ไอออนเหล่านี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนในงานวิจัยนี้ไอออนที่สนใจได้แก่  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{K}^+$  และ  $\text{Cl}^-$  เนื่องจากคาดว่าไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าในขนราก (Weisenseel *et al.*, 1979) ในการศึกษาผลของไอออนต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าในขนรากใช้วิธีที่ต่างกันสองวิธี คือ ในกรณีที่ศึกษาผลของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{K}^+$  ใช้สารละลายที่มีไอออนบวกคือ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{K}^+$  เพียงอย่างเดียวโดยรักษาความเข้มข้นของไอออนในสารละลายและค่า pH ให้คงเดิม (ตารางที่ 1) ในกรณีนี้เพื่อศึกษาว่าหากความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ

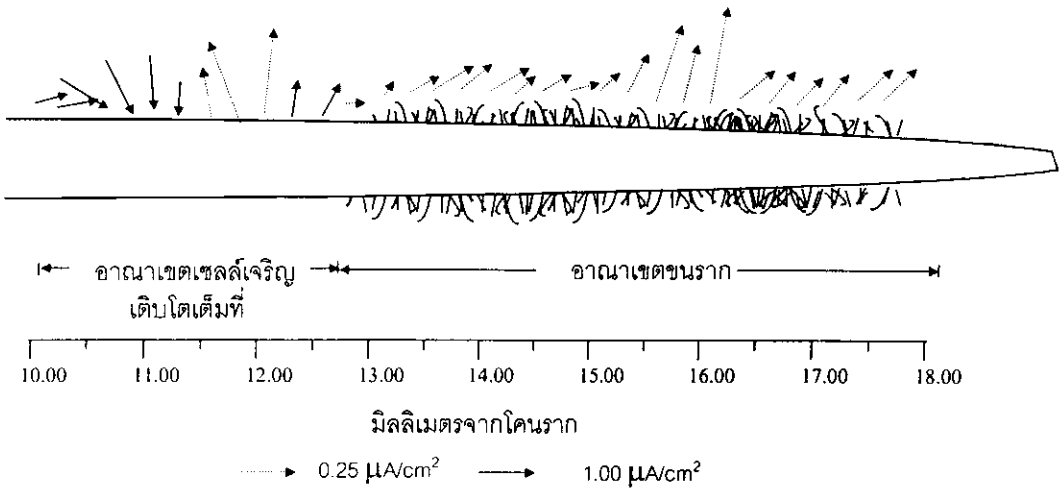
K<sup>+</sup> เพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ส่วนในกรณีของ Cl<sup>-</sup> ใช้วิธีการแทนที่ไอออน (ion substitution) (Miller, 1989; Troxell, 1989) โดยใช้โซเดียมซัลเฟตแทนโซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมซัลเฟตแทนโพแทสเซียมคลอไรด์และแคลเซียมซัลเฟตแทนแคลเซียมคลอไรด์ (Miller, 1989) (ตารางที่ 1) โดยให้ไอออนหลักมีความเข้มข้นและจำนวนประจุเท่ากับในสารละลาย APW pH 6.0

### 3.4.1 ผลของแคลเซียม

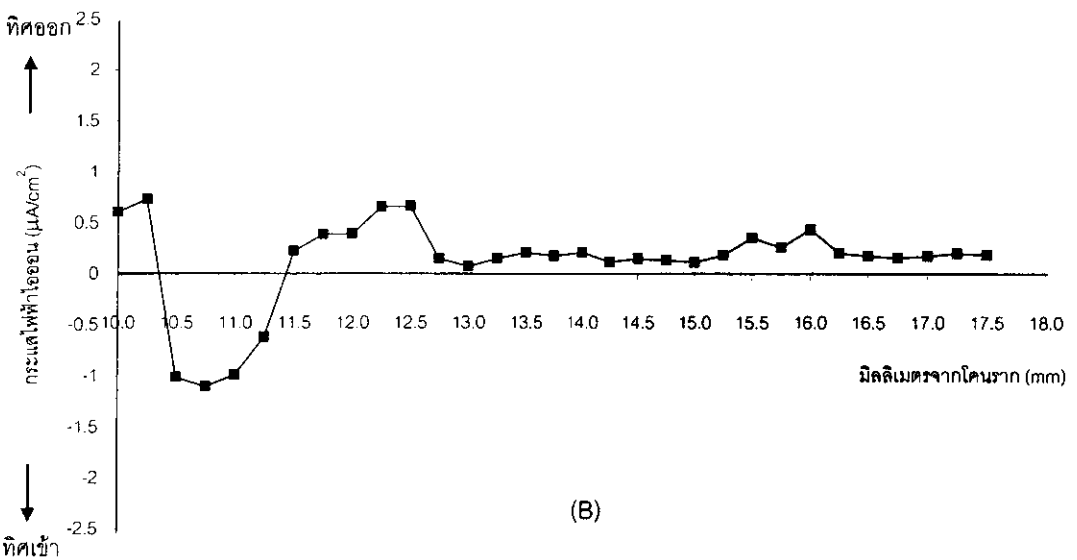
วัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากและรอบโคนขนรากตามวันในสารละลายที่มีแคลเซียมไอออน 0.65 มิลลิโมลาร์ โดยที่สารละลายมีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนและ pH เท่ากับสารละลาย APW สภาวะปกติ pH 6.00 ทำการวัดเช่นเดียวกับการวัดกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติ จาก 8 ราก วัดกระแสไฟฟ้าจากปลายขนรากได้ 26 ขนราก ในจำนวนนี้ 11 ขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ปลายขนราก ด้วยขนาด 0.11 – 1.34 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.86 \pm 0.43$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 15 ขนราก มีกระแสไฟฟ้าออกด้วยขนาด 0.14 – 0.79 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและมีขนาดเฉลี่ย  $0.39 \pm 0.18$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ในส่วนรอบโคนของขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด 0.08 – 0.77 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 40 สำหรับกระแสไฟฟ้าอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตกระแสไฟฟ้าบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออกจากราก มีขนาดอยู่ในช่วง 0.11 – 3.54 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมด 8 รากมาทดสอบทางสถิติพบว่าในอาณาเขตขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโคนขนรากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) (ตาราง 11 และ ภาพประกอบ 41) ที่ตำแหน่ง 14.00 – 16.25 มิลลิเมตรยกเว้นที่ตำแหน่ง 14.25 – 14.50 มิลลิเมตรจากโคนราก



(A)



(B)

ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนขนรากในสารละลาย  $0.65 \text{ mM CaCl}_2$

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า

(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนขนราก (12.75 – 17.50 มิลลิเมตร)

ตาราง 11 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย 0.65 mM CaCl<sub>2</sub> pH 6.00 ± 0.05

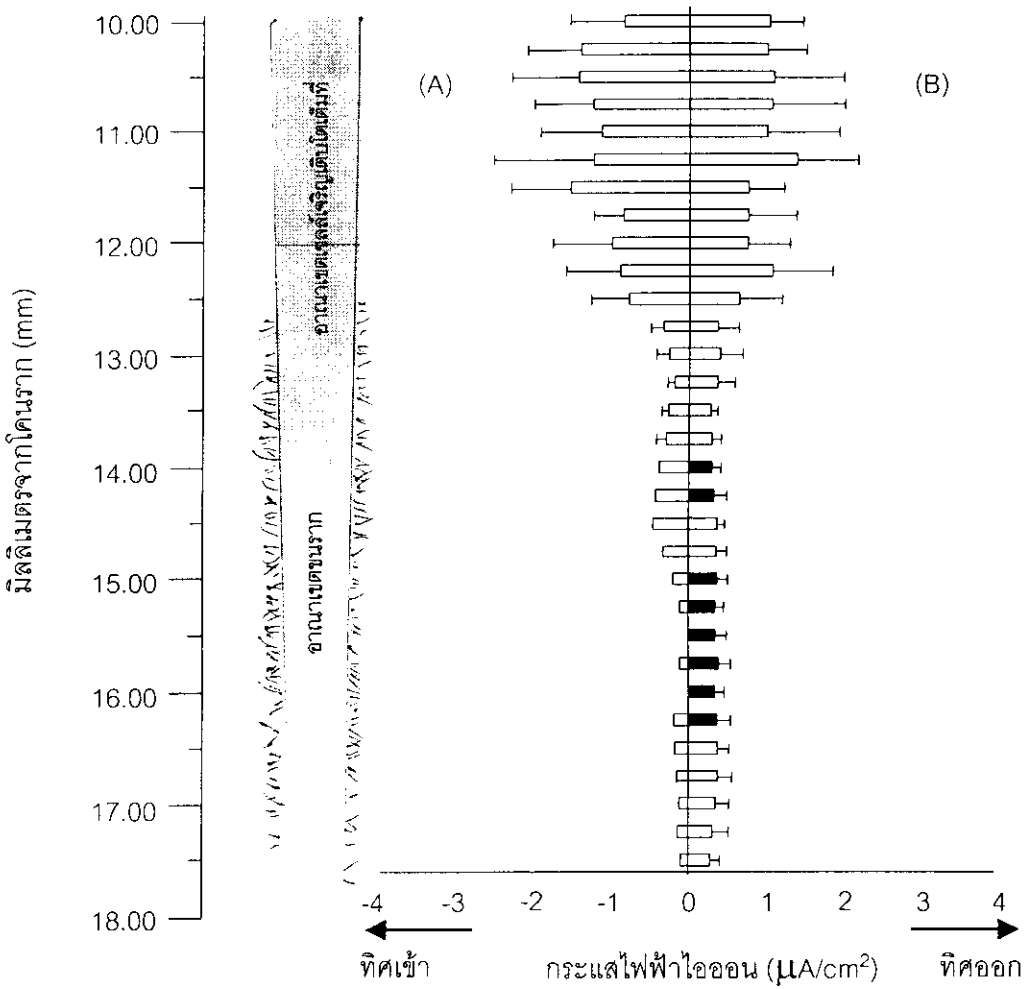
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า(μA/cm <sup>2</sup> )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
10.00	1.06	0.43	3	-0.86	0.71	5
10.25	1.02	0.52	4	-1.44	0.70	4
10.50	1.11	0.92	3	-1.46	0.87	5
10.75	1.08	0.96	3	-1.27	0.78	5
11.00	1.01	0.96	3	-1.16	0.80	5
11.25	1.41	0.80	3	-1.26	1.32	5
11.50	0.77	0.45	5	-1.56	0.79	3
11.75	0.76	0.64	5	-0.86	0.40	3
12.00	0.76	0.55	5	-1.01	0.79	3
12.25	1.08	0.79	5	-0.91	0.72	3
12.50	0.65	0.56	6	-0.78	0.50	2
12.75	0.37	0.28	6	-0.34	0.17	2
13.00	0.40	0.30	5	-0.26	0.17	3
13.25	0.38	0.22	6	-0.19	0.09	2
13.50	0.29	0.09	6	-0.26	0.09	2
13.75	0.30	0.10	6	-0.29	0.13	2

ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า(μA/cm <sup>2</sup> )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
14.00	0.30 <sup>b</sup>	0.09	7	-0.38	N	1
14.25	0.33 <sup>b</sup>	0.17	7	-0.43	N	1
14.50	0.37	0.10	6	-0.47	N	2
14.75	0.36	0.14	6	-0.34	N	2
15.00	0.37 <sup>b</sup>	0.14	7	-0.20	N	1
15.25	0.35 <sup>b</sup>	0.11	7	-0.11	N	1
15.50	0.35 <sup>b</sup>	0.14	8	non	N	0
15.75	0.39 <sup>b</sup>	0.15	7	-0.11	N	1
16.00	0.34 <sup>b</sup>	0.14	8	N	N	0
16.25	0.38 <sup>b</sup>	0.17	7	-0.18	N	1
16.50	0.39	0.15	6	-0.18	N	2
16.75	0.38	0.19	6	-0.15	N	2
17.00	0.35	0.18	6	-0.12	N	2
17.25	0.31	0.21	6	-0.14	N	2
17.50	0.28	0.13	6	-0.09	N	2

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.05 b แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.01   อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

  อาณาเขตราก   แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 41 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 -12.50 มิลลิเมตร) และโซนของชนรากทานตะวันวัดในสารละลาย 0.65 mM  $\text{CaCl}_2$  pH 6.0 ที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) ตำแหน่งการวัดจากโคนรากอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนของชนราก

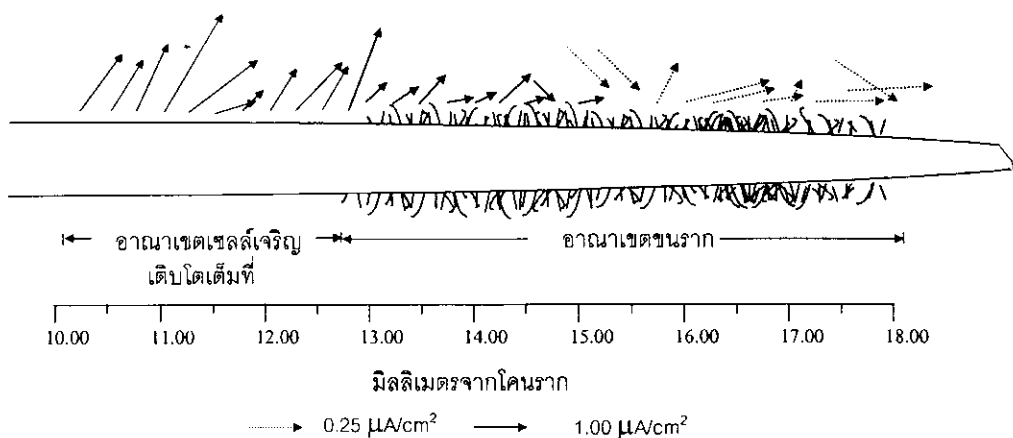
(B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้า จากผลทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.4.2 ผลของโพแทสเซียม

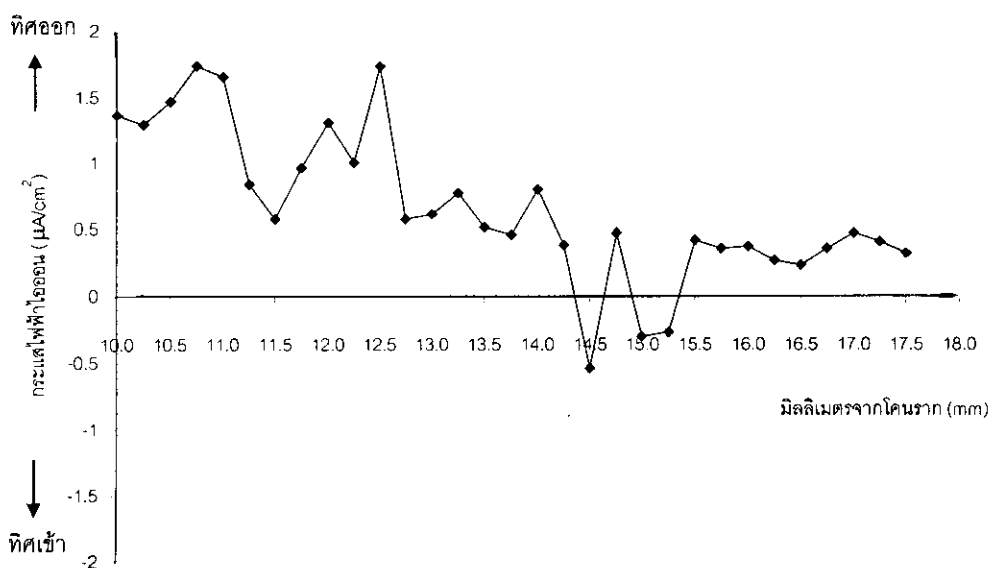
จากการวัดทั้งหมด 30 ขนราก จาก 7 ราก กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก 21 ขนรากด้วยขนาด  $0.10 - 1.34$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่าเฉลี่ย  $0.70 \pm 0.39$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอีก 9 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนราก ด้วยขนาด  $0.12 - 1.78$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และมีขนาดเฉลี่ย  $0.70 \pm 0.59$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มกระแสไฟฟ้าบางรากมีทิศออก และบางรากกระแสไฟฟ้าบางตำแหน่งมีทิศเข้าบางตำแหน่งมีทิศออก โดยมีขนาดอยู่ในช่วง  $1.06 - 2.16$  ไมโครต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 42) สำหรับกระแสไฟฟ้ารอบโคนของขนราก กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่มีทิศออกจากโคนของขนราก แต่มีบางตำแหน่งมีทิศเข้า โดยมีขนาดอยู่ในช่วง  $0.10 - 1.52$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งวัดต่างๆ ของทุกราก (ตาราง 12 และภาพประกอบ 43) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) ระหว่างรอยต่อบริเวณของเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่กับโคนของขนราก ( $11.00 - 13.00$  มิลลิเมตร จากโคนขนราก) ส่วนที่ตำแหน่งอื่น ๆ ทิศทางของกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



(A)



(B)

ภาพประกอบ 42 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนขนรากในสารละลาย 1.3 mM KCl

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า

(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50

มิลลิเมตร) และรอบโซนขนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย 0.65 mM KCl pH 6.00 ± 0.05

ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
10.00	1.33	0.32	4	-0.89	0.46	3
10.25	1.27	0.34	4	-0.96	0.52	3
10.50	1.09	0.78	3	-1.03	0.60	4
10.75	1.36	0.73	4	-0.39	0.64	3
11.00	1.08 <sup>a</sup>	0.70	6	-1.47	N	1
11.25	1.04 <sup>a</sup>	0.48	6	-0.86	N	1
11.50	0.82 <sup>b</sup>	0.31	7	non	N	0
11.75	1.01 <sup>b</sup>	0.39	7	non	N	0
12.00	1.19 <sup>b</sup>	0.32	7	non	N	0
12.25	1.09 <sup>b</sup>	0.21	7	non	N	0
12.50	1.33 <sup>b</sup>	0.41	7	non	N	0
12.75	0.60 <sup>b</sup>	0.44	7	non	N	0
13.00	0.61 <sup>a</sup>	0.32	6	-0.24	N	1
13.25	0.64	0.25	4	-0.26	0.03	3
13.50	0.49	0.17	5	-0.32	N	2
13.75	0.49	0.17	5	-0.33	N	2

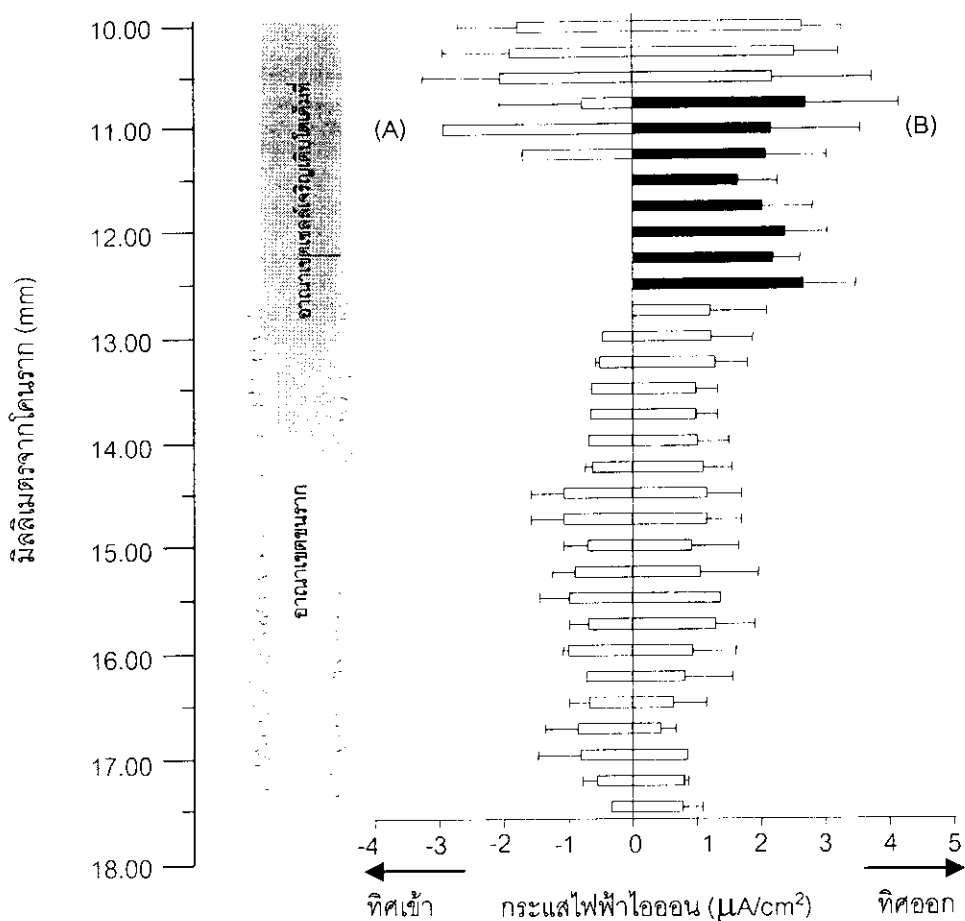
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
14.00	0.51	0.24	5	-0.35	N	2
14.25	0.55	0.22	4	-0.32	0.05	3
14.50	0.58	0.27	2	-0.54	0.26	5
14.75	0.58	0.27	3	-0.54	0.26	4
15.00	0.46	0.37	3	-0.35	0.18	4
15.25	0.53	0.45	3	-0.45	0.18	4
15.50	0.68	N	2	-0.50	0.23	5
15.75	0.65	0.31	3	-0.35	0.15	4
16.00	0.47	0.34	5	-0.50	0.04	2
16.25	0.41	0.37	5	-0.36	N	2
16.50	0.32	0.26	4	-0.34	0.16	3
16.75	0.22	0.12	4	-0.43	0.26	3
17.00	0.43	N	5	-0.41	0.33	2
17.25	0.40	0.03	3	-0.27	0.12	4
17.50	0.39	0.15	5	-0.17	N	2

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$       อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

     อาณาเขตโคนราก      แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ





ภาพประกอบ 43 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย 1.3 mM KCl pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) ตำแหน่งการวัดจากโคนรากในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนราก

(B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้า จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.4.3 ผลของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน

จากการวัดกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ไอออนโดยใช้หลักการแทนที่ของไอออน ที่ยังคงรักษาความเข้มข้นของไอออนตัวอื่นให้คงที่ จากผลการวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขรรากทั้งหมด 17 ขรราก จากราก 8 ราก พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขรรากจำนวน 9 ขรราก ด้วยขนาดอยู่ในช่วง 0.07 – 1.58 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีขนาดเฉลี่ย  $0.36 \pm 0.49$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 8 ขรราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขรราก ด้วยขนาด 0.07 – 1.40 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่พบว่ากระแสไฟฟ้าในบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออกจากราก ด้วยขนาด 0.26 – 3.11 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระแสไฟฟ้าที่รอบโคนของขรราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโคนขรราก ด้วยขนาดอยู่ในช่วง 0.10 – 1.70 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ภาพประกอบ 44)

เมื่อนำผลการทดลองมาทดสอบทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนด้วยวิธีทางสถิติที่ตำแหน่งต่างๆ ( ตาราง 13 และ ภาพประกอบ 45) พบว่า ที่ระยะตั้งแต่ 10.00 – 12.25 มิลลิเมตร จากโคนรากซึ่งเป็นบริเวณที่เซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ไม่สามารถระบุทิศทางเข้า – ออก ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ระยะ 12.70 – 13.25 และ 15.25 – 15.50 มิลลิเมตรซึ่งเป็นส่วนต้นโคนของขรราก กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้มีทิศออกจากโคนของขรรากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P < 0.05$ )



ตาราง 13 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลายไม่มีคลอไรด์ ไอออน pH  $6.00 \pm 0.05$

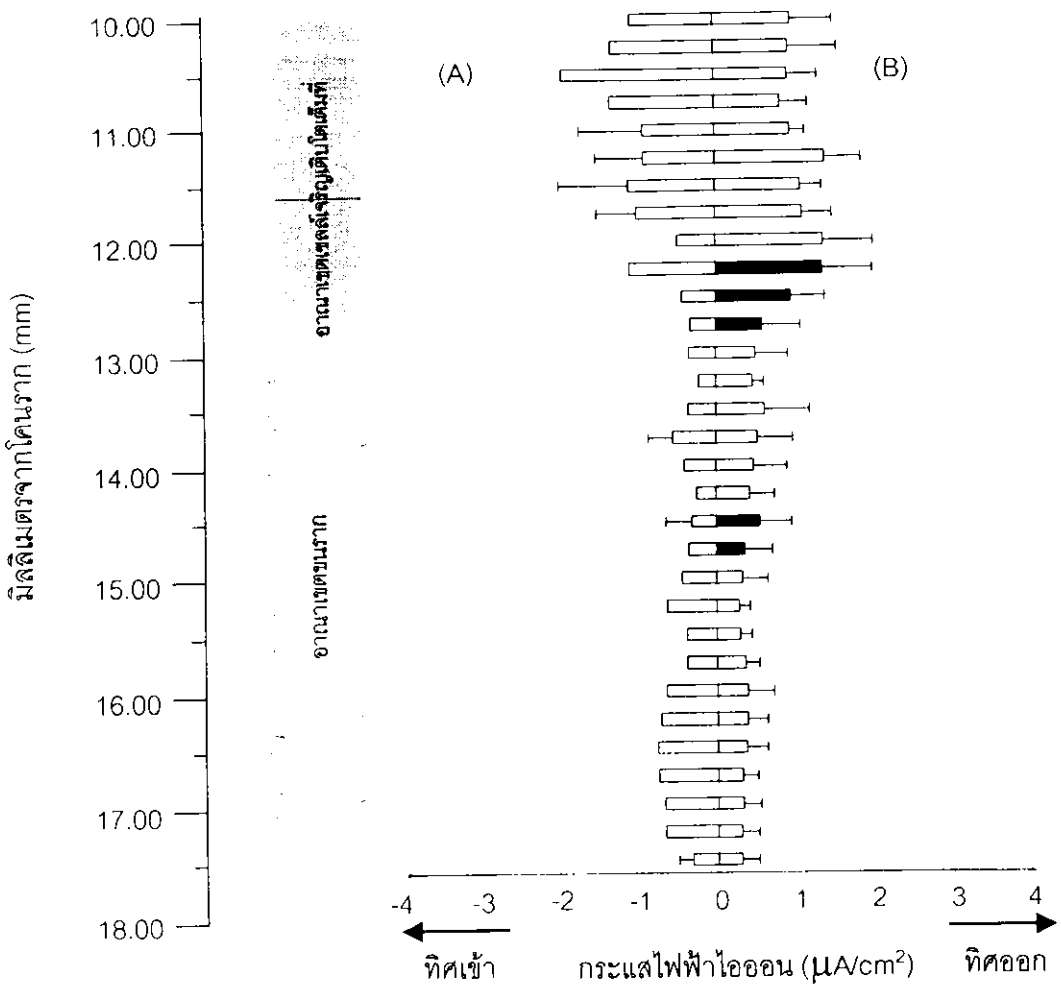
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
10.00	0.99	0.54	6	-1.06	N	2
10.25	0.96	0.62	6	-1.33	N	2
10.50	0.93	0.38	6	-1.96	N	2
10.75	0.84	0.35	6	-1.34	N	2
11.00	0.96	0.18	4	-0.92	0.82	4
11.25	1.40	0.47	4	-0.91	0.62	4
11.50	1.08	0.27	5	-1.11	0.90	3
11.75	1.10	0.37	5	-1.01	0.51	3
12.00	1.37	0.64	6	-0.49	N	2
12.25	1.36	0.64	6	-1.10	N	2
12.50	0.96	0.43	6	-0.43	N	2
12.75	0.59 <sup>a</sup>	0.48	7	-0.33	N	1
13.00	0.50 <sup>a</sup>	0.41	7	-0.35	N	1
13.25	0.47 <sup>a</sup>	0.14	7	-0.22	N	1
13.50	0.62	0.57	6	-0.35	N	2
13.75	0.53	0.44	5	-0.55	0.32	3

ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	SD	จำนวน
14.00	0.48	0.42	5	-0.41	N	3
14.25	0.43	0.31	5	-0.25	N	3
14.50	0.56	0.41	4	-0.31	0.33	4
14.75	0.36	0.35	6	-0.36	N	2
15.00	0.33 <sup>a</sup>	0.32	7	-0.45	N	1
15.25	0.29 <sup>a</sup>	0.13	7	-0.63	N	1
15.50	0.30	0.14	6	-0.38	N	2
15.75	0.36	0.18	6	-0.38	N	2
16.00	0.40	0.32	6	-0.65	N	2
16.25	0.38	0.25	6	-0.72	N	2
16.50	0.37	0.26	6	-0.77	N	2
16.75	0.32	0.19	6	-0.76	N	2
17.00	0.32	0.23	3	-0.68	N	5
17.25	0.30	0.21	4	-0.67	N	4
17.50	0.30	0.22	2	-0.32	0.18	6

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$    อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

  อาณาเขตขนราก   แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 45 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และโซนของขบวนการทางตะวันตกในสารละลายที่ไม่มี  $Cl^-$  ที่ตำแหน่งต่างๆ

(A) ตำแหน่งการวัดจากโคนรากในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และรอบโซนขบวนการ

(B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\pm SD$ ) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้า จากผลทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.5 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ

#### 3.5.1 กระแสไฟฟ้ารอบ ๆ ราก

จากการศึกษาผลของไอออนบางชนิดต่อกระแสไฟฟ้าไอออน ในสภาวะที่มีไอออนชนิดนั้นเพิ่มขึ้นโดยให้องค์ประกอบของไอออนอื่นๆ คงที่ เช่นเดียวกับสารละลายที่สภาวะปกติ (APW pH 6.00) พบว่า จากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลายที่มี  $Ca^{2+}$  ความเข้มข้น 0.65 mM  $K^+$  ความเข้มข้น 1.3 mM โดยให้ความเข้มข้นของ  $Cl^-$  คงที่เท่ากับสารละลายสภาวะปกติ และสารละลายที่ไม่มี  $Cl^-$  ขณะที่องค์ประกอบของไอออนชนิดอื่นๆ คงที่ และ pH เท่ากับ 6.00

เมื่อเปรียบเทียบทิศของกระแสไฟฟ้ารอบ ๆ ราก ทั้งบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และรอบโคนของขนราก จะเห็นได้ว่าที่แต่ละสภาวะของสารละลายกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) (ภาพประกอบ 46) มีอยู่ทั้งในบริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตและอาณาเขตขนราก โดยมีลักษณะแตกต่างกัน โดยใน APW ปกติ pH 6.00 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญในช่วงค่อนข้างกว้าง ในขณะที่มี  $Ca^{2+}$  สูง กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญเพียงบางตำแหน่งเฉพาะในอาณาเขตขนราก ส่วนเมื่อมี  $K^+$  สูง กระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ ส่วนกรณีที่ไม่มี  $Cl^-$  กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญเพียงบางตำแหน่งทั้งสองอาณาเขต

สำหรับการพิจารณาผลของไอออนต่อขนาดของกระแสไฟฟ้า นำกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งของทุกรากในสารละลายเดียวกันมาหาขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าใน จากนั้นนำมาทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ ของสารละลาย โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 คู่ (ตาราง 14) และสามารถสรุปผลได้ดังนี้

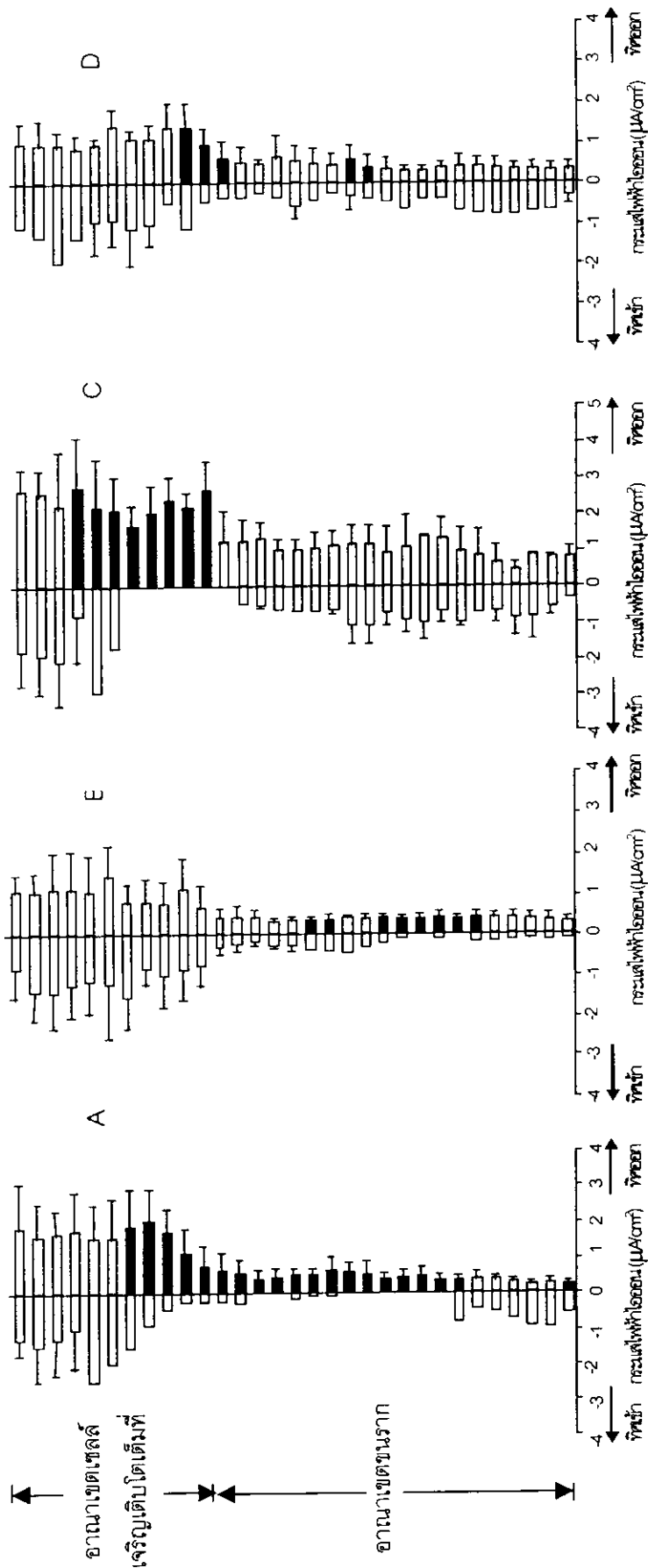
1) ระหว่าง APW กับ สภาวะที่มี  $Ca^{2+}$  เพิ่มขึ้น พบว่ากระแสไฟฟ้าใน APW มีขนาดมากกว่า สภาวะที่มี  $Ca^{2+}$  เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ที่ตำแหน่ง 1 5 และ 7 - 9 ซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และอาณาเขตขนรากที่ตำแหน่ง 15 - 19

2) ระหว่าง APW กับ สภาวะที่มี  $K^+$  เพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสไฟฟ้าใน APW มีขนาดมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.01$ ) บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโต คือ ที่ตำแหน่ง 5 - 8 ในขณะที่บริเวณอาณาเขตขนรากขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่ตำแหน่ง 11 และ 24 ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าใน APW มีขนาดน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.01$ )

3) ระหว่าง APW กับ สภาวะที่ไม่มี  $Cl^-$  พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าใน APW มีขนาดมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ ที่ตำแหน่ง 1 4 - 5

และ 7 - 8 ตามลำดับ ส่วนในอาณาเขตขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ใน APW มีขนาดมากกว่าสภาวะที่มีความเข้มข้นของ  $Ca^{2+}$   $K^+$  เพิ่มขึ้น และ ไม่มี  $Cl^-$  อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ในบริเวณเซลล์ที่เจริญเติบโตเท่านั้น ส่วนอาณาเขตของขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 46 ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน ( $\pm$  SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนขนราก ในสภาวะ ของสารละลาย

ต่าง ๆ ส่วนที่แรงแสดงทิศทางที่ค้ำดันกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

(A) สารละลายสภาพปกติ pH 6.00 (B) สารละลาย  $CaCl_2$  0.65 มิลลิโมลาร์ (C) สารละลาย KCl 1.3 มิลลิโมลาร์

(D) สารละลายที่ไม่มี  $Cl^-$



ตาราง 14 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรากเปรียบเทียบระหว่างรากในสารละลายสภาพปกติ (APW pH 6.00) กับ 0.65 mM  $\text{CaCl}_2$  1.3 mM KCl และสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ตามลำดับ

ตำแหน่ง	APW pH 6.0 กับ 0.65 mM $\text{Ca}^{2+}$		APW pH 6.0 กับ 1.30 mM $\text{K}^+$		APW pH 6.0 กับ สารละลายไม่มี $\text{Cl}^-$	
	t (df=14)	ผลการทดสอบ	t (df=13)	ผลการทดสอบ	t (df=14)	ผลการทดสอบ
1	1.563	APW pH 6.0 > $\text{Ca}^{2+}$ <sup>a</sup>	1.054	ไม่มีความแตกต่าง	1.549	APW pH 6.0 > non $\text{Cl}^-$ <sup>a</sup>
2	0.771	ไม่มีความแตกต่าง	1.147	ไม่มีความแตกต่าง	1.245	ไม่มีความแตกต่าง
3	0.474	ไม่มีความแตกต่าง	1.234	ไม่มีความแตกต่าง	0.825	ไม่มีความแตกต่าง
4	1.229	ไม่มีความแตกต่าง	1.131	ไม่มีความแตกต่าง	1.953	APW pH 6.0 > non $\text{Cl}^-$ <sup>b</sup>
5	1.444	APW pH 6.0 > $\text{Ca}^{2+}$ <sup>a</sup>	1.389	APW pH 6.0 > $\text{K}^+$ <sup>a</sup>	1.998	APW pH 6.0 > non $\text{Cl}^-$ <sup>b</sup>
6	0.643	ไม่มีความแตกต่าง	1.524	APW pH 6.0 > $\text{K}^+$ <sup>a</sup>	1.193	ไม่มีความแตกต่าง
7	1.709	APW pH 6.0 > $\text{Ca}^{2+}$ <sup>a</sup>	2.461	APW pH 6.0 > $\text{K}^+$ <sup>c</sup>	1.770	APW pH 6.0 > non $\text{Cl}^-$ <sup>b</sup>
8	2.836	APW pH 6.0 > $\text{Ca}^{2+}$ <sup>d</sup>	2.282	APW pH 6.0 > $\text{K}^+$ <sup>c</sup>	2.261	APW pH 6.0 > non $\text{Cl}^-$ <sup>c</sup>
9	1.955	APW pH 6.0 > $\text{Ca}^{2+}$ <sup>b</sup>	1.098	ไม่มีความแตกต่าง	1.058	ไม่มีความแตกต่าง
10	-0.065	ไม่มีความแตกต่าง	-0.362	ไม่มีความแตกต่าง	-0.923	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.10$     b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$     c แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.025$     d แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

e แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.005$     ตำแหน่งที่ 1-11 (10.00 - 12.50 มิลลิเมตร) คือ อานาเบตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่

ตำแหน่ง 11-41 (12.75 - 20.00 มิลลิเมตร) คือ อานาเบตของกระดูกไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย

ตำแหน่ง	APW pH 6.0 กับ 0.65 mM Ca <sup>2+</sup>		APW pH 6.0 กับ 1.30 mM K <sup>+</sup>		APW pH 6.0 กับ สารละลายไม่มี Cl <sup>-</sup>		
	t (df=14)	ผลการทดสอบ	t (df=13)	ผลการทดสอบ	t (df=14)	ผลการทดสอบ	
11	12:50	0.002	ไม่มี ความแตกต่าง	-2.460	APW pH 6.0 < K <sup>+</sup> c	-0.553	ไม่มี ความแตกต่าง
12	12:75	0.949	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.203	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.005	ไม่มี ความแตกต่าง
13	13:00	0.929	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.316	ไม่มี ความแตกต่าง	0.085	ไม่มี ความแตกต่าง
14	13:25	0.382	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.744	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.544	ไม่มี ความแตกต่าง
15	13:50	1.446	APW pH 6.0 > Ca <sup>2+</sup> a	-0.302	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.672	ไม่มี ความแตกต่าง
16	13:75	1.874	APW pH 6.0 > Ca <sup>2+</sup> b	0.172	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.497	ไม่มี ความแตกต่าง
17	14:00	1.421	APW pH 6.0 > Ca <sup>2+</sup> a	-0.142	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.063	ไม่มี ความแตกต่าง
18	14:25	1.365	APW pH 6.0 > Ca <sup>2+</sup> a	0.619	ไม่มี ความแตกต่าง	0.401	ไม่มี ความแตกต่าง
19	14:50	1.739	APW pH 6.0 > Ca <sup>2+</sup> b	0.541	ไม่มี ความแตกต่าง	0.710	ไม่มี ความแตกต่าง
20	14:75	0.867	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.380	ไม่มี ความแตกต่าง	0.675	ไม่มี ความแตกต่าง
21	15:00	0.276	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.181	ไม่มี ความแตกต่าง	0.245	ไม่มี ความแตกต่าง
22	15:25	0.878	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.513	ไม่มี ความแตกต่าง	0.744	ไม่มี ความแตกต่าง
23	15:50	0.934	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.630	ไม่มี ความแตกต่าง	1.233	ไม่มี ความแตกต่าง
24	15:75	-0.198	ไม่มี ความแตกต่าง	-1.445	APW pH 6.0 < K <sup>+</sup> a	-0.265	ไม่มี ความแตกต่าง
25	16:00	0.500	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.672	ไม่มี ความแตกต่าง	-0.449	ไม่มี ความแตกต่าง

ตำแหน่ง	APW pH 6.0 กับ 0.65 mM Ca <sup>2+</sup>		APW pH 6.0 กับ 1.30 mM K <sup>+</sup>		APW pH 6.0 กับ สารละลายไม่มี Cl <sup>-</sup>	
	t (df=14)	ผลการทดสอบ	t (df=13)	ผลการทดสอบ	t (df=14)	ผลการทดสอบ
26	0.309	ไม่มีความแตกต่าง	-0.040	ไม่มีความแตกต่าง	-0.510	ไม่มีความแตกต่าง
27	0.574	ไม่มีความแตกต่าง	0.550	ไม่มีความแตกต่าง	-0.508	ไม่มีความแตกต่าง
28	0.499	ไม่มีความแตกต่าง	0.561	ไม่มีความแตกต่าง	-0.185	ไม่มีความแตกต่าง
29	0.495	ไม่มีความแตกต่าง	-0.096	ไม่มีความแตกต่าง	-0.077	ไม่มีความแตกต่าง
30	0.761	ไม่มีความแตกต่าง	0.430	ไม่มีความแตกต่าง	0.105	ไม่มีความแตกต่าง
31	0.606	ไม่มีความแตกต่าง	-0.266	ไม่มีความแตกต่าง	-0.113	ไม่มีความแตกต่าง

### 3.5.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก

นำค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนที่วัดที่ปลายขนรากในสภาวะของสารละลายต่างๆ มาเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ pH 6.00 (ตาราง 15 และภาพประกอบ 47)

ในกรณีกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก พบว่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่สูงสุดในสารละลายที่มี  $Ca^{2+}$  เพิ่มขึ้น โดยมากกว่าใน pH 6.00 และในสารละลายที่มี  $K^+$  เพิ่มขึ้น และกรณีที่ไม่มี  $Cl^-$  อยู่ 1% 19% และ 58% ตามลำดับ แต่จำนวนของขนรากที่มีทิศเข้าสู่ปลายขนรากมีเพียง 11 ขนราก (จาก 26 ขนราก) ซึ่งผลจากการทดลองในรากทานตะวันนี้แตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาโดย Weisenseel และคณะ (1979) ที่ศึกษาโดยใช้เทคนิคเดียวกันกับการทดลองนี้ ที่พบว่ากระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายขนรากข้าวบาร์เลย์เท่านั้น อย่างไรก็ตามในขนรากทานตะวันที่มีกระแสไฟฟ้าเข้านี้พบว่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ามีขนาดมากกว่าใน APW pH 6.00 เล็กน้อย เช่นเดียวกับที่พบในข้าวบาร์เลย์ที่กระแสไฟฟ้ามีขนาดมากกว่าสภาวะปกติ (APW pH 5.7) อยู่ 28% ซึ่งคาดว่า น่าจะเป็นผลมาจากการที่  $Ca^{2+}$  เคลื่อนที่เข้าสู่ปลายของขนราก การเคลื่อนที่  $Ca^{2+}$  เข้าสู่เซลล์ของขนรากนี้มีการยืนยันจากการศึกษาโดย Wymer และคณะ (1997) ที่ใช้เทคนิคการเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์และพบว่าปริมาณของ  $Ca^{2+}$  ในไซโทพลาสซึมที่ปลายขนราก *Arabidopsis* จะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $Ca^{2+}$  ในสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้นซึ่งชี้ให้เห็นว่า  $Ca^{2+}$  มีการเคลื่อนที่เข้าสู่ปลายขนราก เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคไวเบรติงโพรมบด์กระแสไฟฟ้าสุทธิที่เกิดจากไอออนชนิดต่างๆ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่มี  $Ca^{2+}$  เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนหลายชนิดรวมกัน ผลที่ได้จึงเห็นไม่เด่นชัดเหมือนเทคนิคอื่นที่ใช้วิธีการวัดการเคลื่อนที่ของ  $Ca^{2+}$  เท่านั้น (Jones *et al.*, 1995; Fellie and Hepler, 1997; Véry and Davies, 2000; Bibikova *et al.*, 1997 and Wymer *et al.*, 1997)

ในการทำงานเดียวกันเมื่อ  $K^+$  เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ปลายขนรากกลับมีขนาดน้อยลงทั้งๆ ที่ควรจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากในขนราก  $K^+$  จะมีทิศเข้าสู่ปลายขนราก (Lew, 1991) ดังนั้นเมื่อ  $K^+$  ภายนอกเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากน่าจะเพิ่มขึ้น เหตุผลน่าจะเป็นเช่นเดียวกับในกรณีของ  $Ca^{2+}$  นั่นคือเป็นข้อจำกัดของเทคนิคการวัดชี้วัดกระแสไฟฟ้าสุทธิจากไอออนชนิดต่าง ๆ

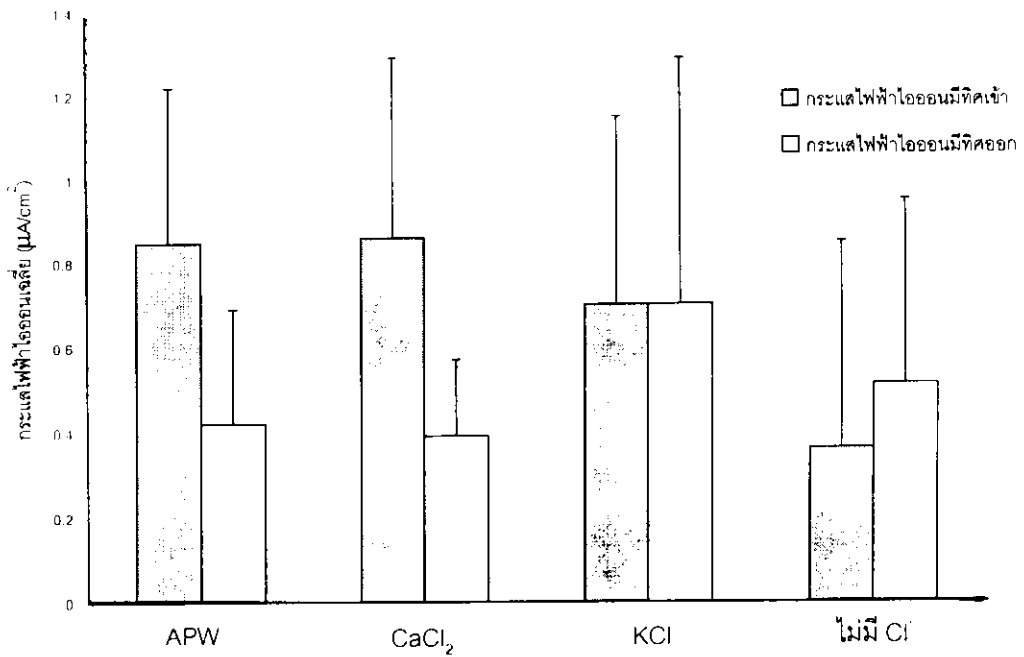
ในส่วนของสารละลายที่ไม่มี  $\text{Cl}^-$  มีขนาดน้อยกว่าในสารละลาย APW อยู่ 58% เป็นผลมาจาก  $\text{Cl}^-$  เป็นส่วนหนึ่งของแซนแนลซาเข้าของ โปรตอน - คลอไรด์ ซิมพอร์เตอร์ ( $2\text{H}^+/\text{Cl}^-$  symporter) (Buschmann *et al.*, 1996) โดยที่แซนแนลนี้จะนำ  $2\text{H}^+$  และ  $\text{Cl}^-$  เข้าสู่ขนรากพร้อมกัน ดังนั้นเมื่อไม่มี  $\text{Cl}^-$  จึงทำให้ไม่มี  $\text{H}^+$  เข้าที่แซนแนลนี้ทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง

ในกรณีที่ขนรากมีกระแสไฟฟ้าทิศออกจากราก ถึงแม้จะแตกต่างจากที่พบในขนรากในพืชอื่นๆ ซึ่งพบว่ามิติคเข้า (Jone *et al.*, 1995) ก็มีความเป็นไปได้เหมือนกัน ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Hermann และ Felle (1995) พบว่า  $\text{Ca}^{2+}$  ที่ปลายขนรากมิติคเข้า ส่วน  $\text{H}^+$  มิติคออก แต่ในบางขนราก  $\text{H}^+$  ก็มีรูปแบบอื่น ดังนั้นก็มีความเป็นไปได้ว่าในแต่ละขนรากในขณะทำการวัดนั้น กระแสไฟฟ้าสุทธิจากไอออนชนิดต่าง ๆ นั้น จะแตกต่างกันไป

เมื่อนำขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ามาเปรียบด้วยวิธีทางสถิติ (ตาราง 16) สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้า ที่ pH 6.00 มีขนาดมากกว่ากรณีที่มี  $\text{K}^+$  เพิ่มขึ้น และไม่มี  $\text{Cl}^-$  อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) กับกรณีที่มี  $\text{Ca}^{2+}$  เพิ่มขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกที่ pH 6.00 มีขนาดมากกว่ากรณีที่มี  $\text{K}^+$  เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กับกรณีที่มี  $\text{Ca}^{2+}$  เพิ่มขึ้นหรือไม่มี  $\text{Cl}^-$

ตาราง 15 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากในสภาวะต่างๆ

สารละลาย (pH 6.00)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปลายขนราก ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			
	ทิศเข้า	จำนวน (ขนราก)	ทิศออก	จำนวน (ขนราก)
APW	$0.85 \pm 0.37$	59	$0.42 \pm 0.29$	11
$\text{CaCl}_2$	$0.86 \pm 0.43$	11	$0.39 \pm 0.18$	15
KCl	$0.70 \pm 0.45$	21	$0.70 \pm 0.59$	9
ไม่มี $\text{Cl}^-$	$0.36 \pm 0.49$	9	$0.51 \pm 0.44$	8




ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00  
0.65 mM CaCl<sub>2</sub> 1.3 mM KCl และ สารละลายที่ไม่มี Cl<sup>-</sup>

ตาราง 16 ผลการทดสอบสถิติของขนาดเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่ APW pH 6.00 กับ  
สารละลายสภาวะต่าง ๆ

	กระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยที่ปลายขนราก			
	ทิศเข้า		ทิศออก	
	t (df)	ผลการทดสอบ	t (df)	ผลการทดสอบ
Ca <sup>2+</sup> เพิ่มขึ้นกับ APW	0.080 (68)	ไม่มีความแตกต่าง	0.34 (24)	ไม่มีความแตกต่าง
K <sup>+</sup> เพิ่มขึ้นกับ APW	-1.58 (79)	K <sup>+</sup> < pH 6.00 <sup>a</sup>	1.409 (18)	K <sup>+</sup> > pH 6.00 <sup>a</sup>
ไม่มี Cl <sup>-</sup> กับ APW	-3.380 (65)	ไม่มี Cl <sup>-</sup> < pH 6.00 <sup>e</sup>	0.553 (17)	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.1    b แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.05    c แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.025

d แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.01    e แสดงนัยสำคัญที่ P < 0.005     แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

### 3.6 อัตรายึดของขนรากในสภาวะของสารละลายต่างๆ

ตาราง 17 แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนรากในสารละลายสภาวะต่างๆ ของสารละลาย ในขนรากที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ปลายขนราก พบว่าใน APW มีขนาดกระแสไฟฟ้าและอัตรายึดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบอัตรายึดของขนรากกับขนาดของกระแสไฟฟ้าทั้งสามสภาวะไม่มีความสัมพันธ์อย่างเด่นชัด ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกจากปลายขนราก ขนรากมีอัตรายึดสูงสุดใน APW และในสารละลายที่มี  $Ca^{2+}$  เพิ่มขึ้น ขณะที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสารละลายที่ไม่มี  $Cl^-$  มีค่ามากที่สุด ขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไม่ได้แสดงความสัมพันธ์กับอัตรายึดเช่นกัน ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มหรือลดของกระแสไฟฟ้าสุทธิอาจไม่มีผลโดยตรงกับอัตรายึด

ตาราง 17 อัตรายึดของขนรากในสภาวะต่างๆ ของสารละลาย

สภาวะของ สารละลาย	กระแสไฟฟ้า					
	มีทิศเข้า			มีทิศออก		
	ขนาดกระแส ไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\mu A/cm^2$ )	อัตรายึด ( $\mu m/min$ )	จำนวน (ขนราก)	ขนาดกระแส ไฟฟ้าเฉลี่ย ( $\mu A/cm^2$ )	อัตรายึด ( $\mu m/min$ )	จำนวน (ขนราก)
APW	$0.75 \pm 0.36$	$0.73 \pm 0.25$	7	0.058	0.57	1
$Ca^{2+}$ เพิ่มขึ้น	$0.54 \pm 0.42$	$0.58 \pm 0.22$	4	$0.24 \pm 0.07$	$0.58 \pm 0.20$	4
$K^+$ เพิ่มขึ้น	$0.68 \pm 0.41$	$0.57 \pm 0.32$	5	$0.25 \pm 0.13$	$0.46 \pm 0.19$	2
ไม่มี $Cl^-$	$0.41 \pm 0.65$	$0.68 \pm 0.28$	5	$1.15 \pm 0.47$	$0.46 \pm 0.29$	2

### 3.7 ผลของอลูมิเนียม

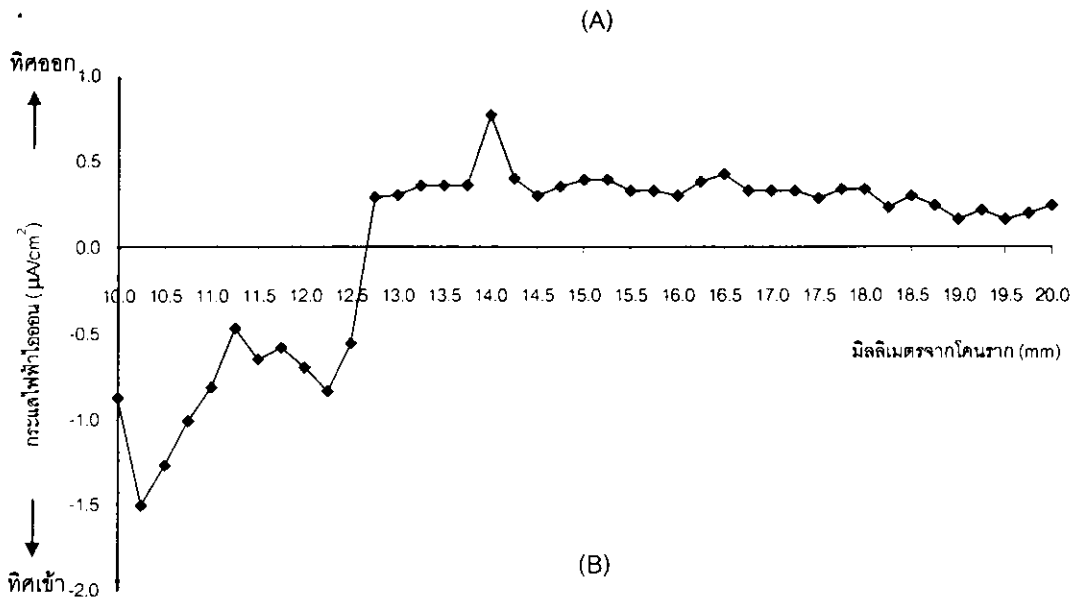
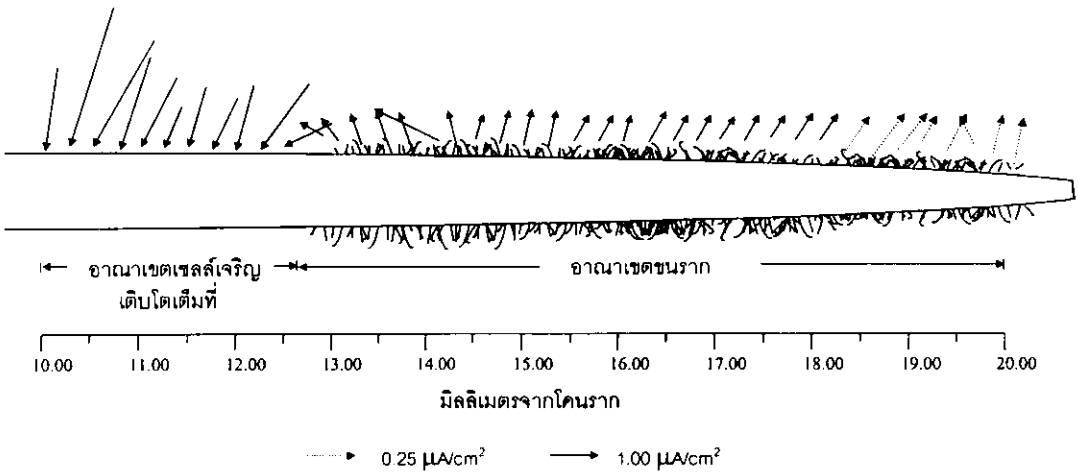
ในการศึกษาผลของอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) วัดกระแสไฟฟ้าไอออน ภายนอกอาณาเขตเซลล์ เจริญเติบโตเต็มที่ รอบโคนของขนราก และที่ปลายขนราก ในสารละลาย APW pH  $4.00 \pm 0.05$  ที่เติมอลูมิเนียมความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

วัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากจำนวน 30 ขนราก จาก 10 ราก พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากจำนวน 21 ขนรากด้วยขนาด  $0.11 - 0.46$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย  $0.29 \pm 0.10$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อีก 9 ขนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากปลายขนรากด้วยขนาด  $0.10 - 0.50$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยขนาดเฉลี่ย  $0.31 \pm 0.16$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ส่วนกระแสไฟฟ้าบริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ กระแสไฟฟ้าในบางรากมีทิศเข้า บางรากมีทิศออก และบางรากกระแสไฟฟ้าในบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออก โดยมีขนาดอยู่ในช่วง  $0.12 - 2.18$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีของกระแสไฟฟ้าบริเวณอาณาเขตขนราก ( $12.50-20.00$  มิลลิเมตรจากโคนราก) (ภาพประกอบ 48) กระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาด  $0.06 - 0.77$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ มาทดสอบสัดส่วนของทิศทางกระแสไฟฟ้า (ตาราง 17 และ ภาพประกอบ 49) พบว่าทิศของกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่บริเวณเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่ยกเว้นบางตำแหน่ง คือที่ระยะ  $10.00$  และ  $12.50$  มิลลิเมตรจากโคนราก กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ ) ส่วนกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตโคนของขนราก พบว่ากระแสไฟฟ้าบริเวณนี้มีทิศออกจากโคนของขนรากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P < 0.05$ )





ภาพประกอบ 48 ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และโซนขนรากใน APW pH 4.00 ที่เติม  $0.10 \text{ mA AlCl}_3$

(A) แสดงตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าแสดงทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า


(B) แสดงกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนขนราก (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร)

ตาราง 18 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโคนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ใน APW pH 4.00 ± 0.05 ที่เติม 0.10 mM  $AlCl_3$

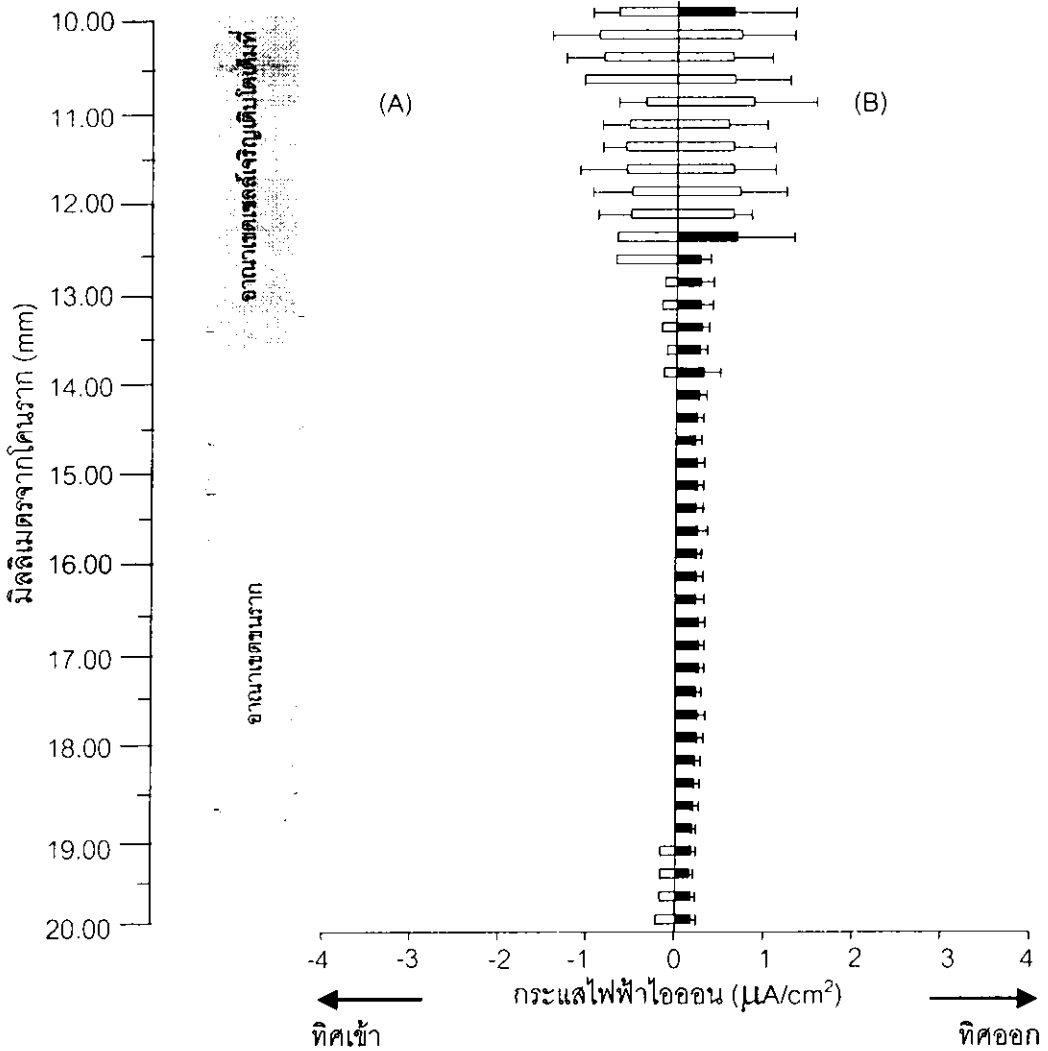
ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu A/cm^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน
10.00	0.65 <sup>a</sup>	0.69	8	-0.66	0.30	2
10.25	0.72	0.60	7	-0.88	0.54	3
10.50	0.63	0.44	7	-0.83	0.43	3
10.75	0.65	0.62	8	-1.05	0.00	2
11.00	0.87	0.70	6	-0.35	0.32	4
11.25	0.58	0.43	7	-0.54	0.30	3
11.50	0.64	0.47	6	-0.58	0.26	4
11.75	0.64	0.46	7	-0.57	0.53	3
12.00	0.71	0.52	6	-0.51	0.45	4
12.25	0.64	0.20	6	-0.52	0.38	4
12.50	0.68 <sup>a</sup>	0.64	8	-0.67	N	2
12.75	0.27 <sup>b</sup>	0.11	9	-0.69	N	1
13.00	0.27 <sup>b</sup>	0.15	9	-0.13	N	1
13.25	0.28 <sup>b</sup>	0.13	9	-0.16	N	1
13.50	0.29 <sup>a</sup>	0.08	8	-0.16	N	2
13.75	0.27 <sup>b</sup>	0.08	9	-0.11	N	1
14.00	0.31 <sup>b</sup>	0.19	9	-0.14	N	1
14.25	0.26 <sup>c</sup>	0.09	10	non	N	0
14.50	0.24 <sup>c</sup>	0.08	10	non	N	0
14.75	0.23 <sup>c</sup>	0.06	10	non	N	0
15.00	0.24 <sup>c</sup>	0.09	10	non	N	0

ระยะห่าง จากโคนราก (mm)	กระแสไฟฟ้า( $\mu A/cm^2$ )					
	มีทิศออก			มีทิศเข้า		
	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน	ค่า เฉลี่ย	SD	จำ นวน
15.25	0.24 <sup>c</sup>	0.07	10	non	N	0
15.50	0.23 <sup>c</sup>	0.08	10	non	N	0
15.75	0.25 <sup>c</sup>	0.11	10	non	N	0
16.00	0.24 <sup>b</sup>	0.06	9	-0.17	N	1
16.25	0.23 <sup>b</sup>	0.08	9	-0.14	N	1
16.50	0.23 <sup>b</sup>	0.10	9	-0.09	N	1
16.75	0.26 <sup>b</sup>	0.07	9	-0.14	N	1
17.00	0.26 <sup>b</sup>	0.07	9	-0.12	N	1
17.25	0.27 <sup>b</sup>	0.06	9	-0.14	N	1
17.50	0.24 <sup>b</sup>	0.06	9	-0.14	N	1
17.75	0.25 <sup>b</sup>	0.08	9	-0.12	N	1
18.00	0.24 <sup>b</sup>	0.07	9	-0.12	N	1
18.25	0.22 <sup>c</sup>	0.06	10	non	N	0
18.50	0.21 <sup>c</sup>	0.06	10	non	N	0
18.75	0.20 <sup>c</sup>	0.06	10	non	N	0
19.00	0.19 <sup>c</sup>	0.05	10	non	N	0
19.25	0.19 <sup>b</sup>	0.04	9	-0.17	N	1
19.50	0.16 <sup>b</sup>	0.04	9	-0.17	N	1
19.75	0.18 <sup>b</sup>	0.05	9	-0.18	N	1
20.00	0.18 <sup>b</sup>	0.05	9	-0.22	N	1

non คือไม่มีกระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ N คือ ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.05$  b แสดงนัยสำคัญที่  $P < 0.01$   อาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

 อาณาเขตราก  แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 49 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH 4.00 ที่เติม 0.10 mM Al<sup>3+</sup> ที่ตำแหน่งต่างๆ (A) ตำแหน่งการวัดจากโคนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และรอบโซนขนราก (B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (±SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าจากผลทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3.8 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี อลูมิเนียม

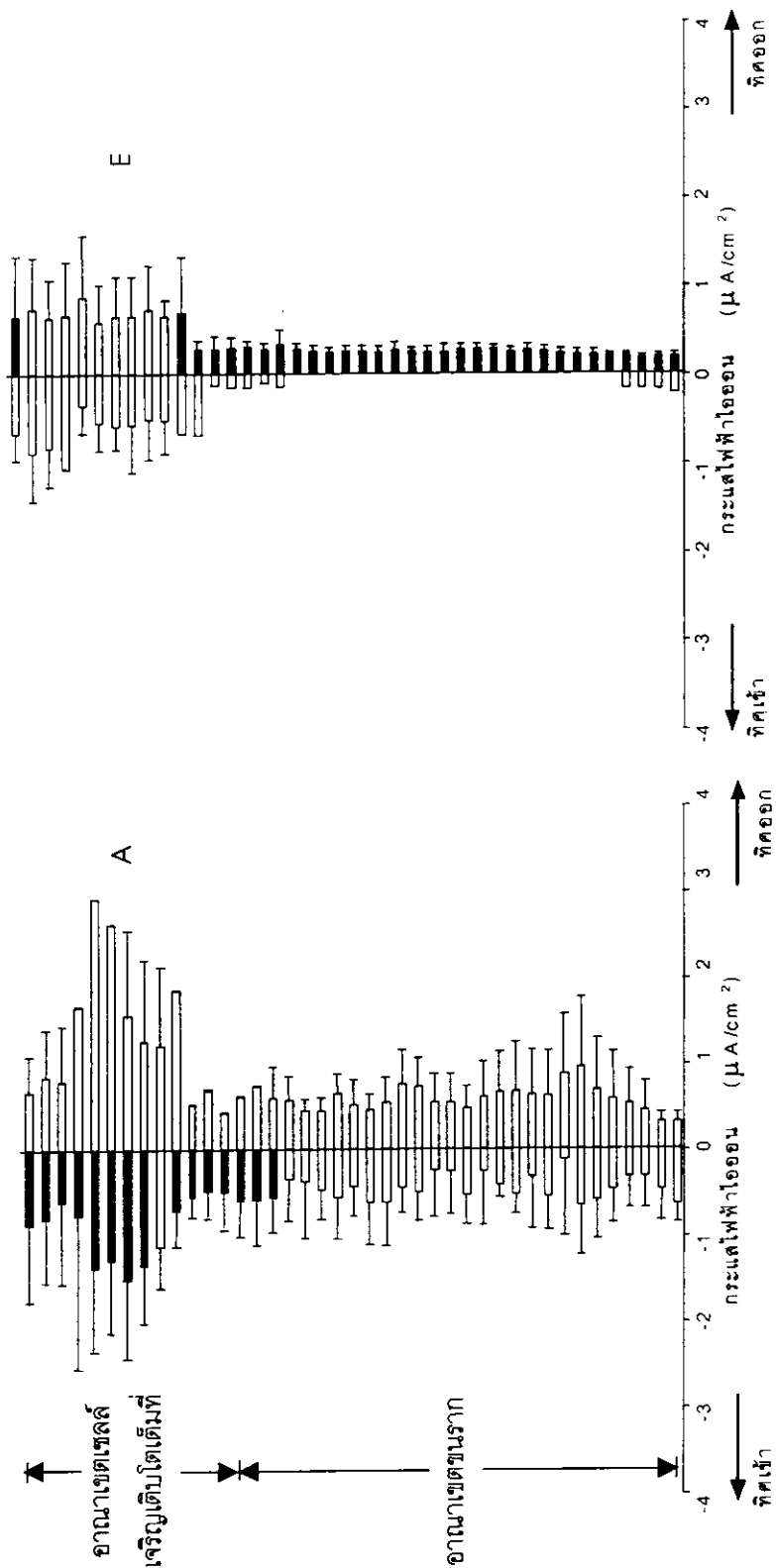
#### 3.8.1 กระแสไฟฟ้ารอบ ๆ ราก

เมื่อเปรียบเทียบทิศทางของกระแสไฟฟ้ารอบ ๆ ราก ใน APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี  
อลูมิเนียมความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ (ภาพประกอบ 50) จะเห็นว่าใน APW กระแสไฟฟ้ามีทิศ  
เข้าอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ แต่ใน APW ที่เติมอลูมิเนียม  
ทิศของกระแสไฟฟ้าในบริเวณนี้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนกระแสไฟฟ้าที่อาณาเขต  
ขนรากใน APW ที่เติมอลูมิเนียมมีทิศออกจากโคนของขนรากอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ตลอดทั้ง  
อาณาเขตขนราก

สำหรับการพิจารณาผลของอลูมิเนียมต่อขนาดของกระแสไฟฟ้า นำขนาดของกระแส  
ไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่งของแต่ละรากในสภาวะเดียวกัน มาหาค่าเฉลี่ยจากนั้นนำมาเปรียบเทียบ  
ด้วยวิธีทางสถิติ (ตาราง 19) พบว่าใน APW ที่เติมอลูมิเนียมกระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัย  
สำคัญ ( $P < 0.10$ ) เกือบทุกตำแหน่ง

#### 3.8.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก

เมื่อพิจารณาขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า ในสารละลาย APW กับ APW ที่เติม  
อลูมิเนียม 0.10 มิลลิโมลาร์ ที่ pH 4.00 (ตาราง 20) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่มีทิศเข้า  
และทิศออก ใน APW มีขนาดเฉลี่ยมากกว่า APW ที่เติมอลูมิเนียม อยู่ 61% และ 45% ตามลำดับ  
และเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีทางสถิติได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ pH 4.00 มีค่ามากกว่า APW เติม  
อลูมิเนียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.10$ ) ทั้งทิศเข้า ( $t = 3.649, df = 50$ ) และทิศออก ( $t = 1.713, df = 26$ )  
ดังกล่าวคาดว่าเกิดจากการที่  $Al^{3+}$  มีผลไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $Al^{3+}$   
จะไปยับยั้งการเคลื่อนที่เข้าของ  $K^+$  ขุนราก (Gassmann and Schroeder, 1994) และเข้าสู่  
เซลล์ (Liu and Luan, 2001) นอกจากนี้  $Al^{3+}$  ยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของ  $Ca^{2+}$  (Rout et al.,  
2001) ดังนั้นจึงทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง



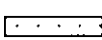
ภาพประกอบ 50 ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน ( $\pm$  SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบไซโทพลาสม ใน APW ส่วนที่แรงแสดงทิศทางที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

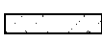
(A) APW pH 4.00    (B) APW pH 4.00 ที่เติมอลูมิเนียม 0.1 มิลลิโมลาร์

ตาราง 19 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรากเปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.00 กับ APW pH 4.00 ที่เติม 0.10 mM AlCl<sub>3</sub>

ตำแหน่ง	ระยะจากโคนราก	APW pH 4.00 กับ 0.1 mM Al <sup>3+</sup>	
		t (df)	ผลการทดสอบ
1	10.00	0.518	ไม่มีความแตกต่าง
2	10.25	0.120	ไม่มีความแตกต่าง
3	10.50	0.726	ไม่มีความแตกต่าง
4	10.75	1.512	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
5	11.00	2.103	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
6	11.25	2.651	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
7	11.50	2.975	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
8	11.75	2.747	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
9	12.00	2.141	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
10	12.25	1.361	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
11	12.50	-0.676	ไม่มีความแตกต่าง
12	12.75	1.799	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
13	13.00	1.798	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
14	13.25	2.341	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
15	13.50	2.165	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
16	13.75	2.489	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
17	14.00	1.947	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
18	14.25	1.632	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>
19	14.50	2.364	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
20	14.75	2.961	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+b</sup>

a แสดงเลขนัยสำคัญที่ P < 0.10    b แสดงเลขนัยสำคัญที่ P < 0.05    c แสดงเลขนัยสำคัญที่ P < 0.025  
 d แสดงเลขนัยสำคัญที่ P < 0.01    e แสดงเลขนัยสำคัญที่ P < 0.005

 ตำแหน่งที่ 1- 11 (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) คือ อาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่

 ตำแหน่ง 11- 41 (12.75 – 20.00 มิลลิเมตร) คือ อาณาเขตของขนราก

 แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

ตาราง 19 (ต่อ)

ตำ แหน่ง	ระยะ จาก โคนราก	APW pH 4.00 กับ 0.1 mM Al <sup>3+</sup>	
		t (df)	ผลการทดสอบ
21	15.00	2.105	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
22	15.25	2.405	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
23	15.50	2.597	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
24	15.75	2.626	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
25	16.00	3.309	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
26	16.25	3.109	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
27	16.50	3.049	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
28	16.75	2.661	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
29	17.00	2.789	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
30	17.25	2.376	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
31	17.50	2.634	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
32	17.75	2.434	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
33	18.00	2.420	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
34	18.25	2.581	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
35	18.50	2.608	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
36	18.75	2.539	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+d</sup>
37	19.00	2.237	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
38	19.25	2.245	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
39	19.50	2.202	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
40	19.75	2.420	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+c</sup>
41	20.00	2.933	nonAl <sup>3+</sup> > Al <sup>3+e</sup>

ตาราง 20 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากใน APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM Al<sup>3+</sup>

สารละลาย APW pH 4.00	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปลายขนราก ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			
	มีทิศเข้า	จำนวน (ขนราก)	มีทิศออก	จำนวน (ขนราก)
APW	$0.75 \pm 0.57$	31	$0.56 \pm 0.42$	19
APW ที่เติม 0.10 mM Al <sup>3+</sup>	$0.29 \pm 0.10$	21	$0.31 \pm 0.16$	9

### 3.9 อัตรายึดของขนรากในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM Al<sup>3+</sup>

วัดอัตรายึดของขนรากในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM Al<sup>3+</sup> (ตาราง 21) พบว่าอัตรายึดมีความสัมพันธ์กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าและสู่ปลายของขนรากโดยเมื่อกระแสไฟฟาลดลงในกรณีที่มี Al<sup>3+</sup> อัตรายึดก็ลดลงด้วย ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากการที่ Al<sup>3+</sup> มีผลยับยั้งการเคลื่อนที่เข้าสู่รากของ Ca<sup>2+</sup> (Rout et al., 2001) ซึ่งการลดลงของ Ca<sup>2+</sup> นี้ จะส่งผลให้อัตรายึดลดลง เนื่องจาก Ca<sup>2+</sup> เป็นไอออนที่สำคัญต่อการเติบโตของขนราก (Herrmann and Felle, 1995; Jones et al., 1995; Felle and Hepler, 1997)



ตาราง 21 อัตรายึดของชนรอกในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM Al<sup>3+</sup>

APW pH 4.00	กระแสไฟฟ้า					
	มีทิศเข้า			มีทิศออก		
	ขนาดกระแสไฟฟ้า เฉลี่ย ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	อัตรายึด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	จำนวน (ชนรอก)	ขนาดกระแสไฟฟ้า เฉลี่ย ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	อัตรายึด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	จำนวน (ชนรอก)
APW	$0.38 \pm 0.55$	$0.55 \pm 0.33$	6	$0.39 \pm 0.49$	$0.51 \pm 0.09$	4
0.10 mM Al <sup>3+</sup>	$0.28 \pm 0.09$	$0.39 \pm 0.14$	5	$0.39 \pm 0.24$	$0.35 \pm 0.13$	5