

### บทที่ 3

## ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.1 อาณาเขตของราก

จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพและเซลล์ภายในรากทานตะวันพันธุ์แปซิฟิก 33 อายุ 40 ชั่วโมง ยาวประมาณ 12 มิลลิเมตร สามารถกำหนดอาณาเขตของรากได้ดังนี้ อาณาเขตหมวกราก (region of root cap) มีลักษณะคล้ายหมวกอย่างชัดเจน ระยะ 0.0-0.3 มิลลิเมตรจากปลายราก เซลล์มีขนาดใหญ่กว่าบริเวณอื่น ถัดจากอาณาเขตหมวกรากเป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (region of cell division) หรือเนื้อเยื่อเจริญ อยู่ที่ระยะ 0.4-2.3 มิลลิเมตรจากปลายราก เมื่อสังเกตจากภายนอกรากจะมีสีขาวขุ่น เมื่อพิจารณาภาพตัดตามยาว จะเห็นเซลล์มีขนาดเล็กเรียงตัวกันหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ และจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะห่างจากปลายราก ถัดมาเป็นอาณาเขตเซลล์ยืดตัว (region of cell elongation) ระยะ 2.6-7.7 มิลลิเมตรจากปลายราก บริเวณนี้เมื่อมองจากภายนอกจะเห็นสีอ่อนกว่าบริเวณอื่น และเซลล์จะมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณเซลล์แบ่งตัวอย่างชัดเจน และถัดจาก 7.7 มิลลิเมตรจนถึงโคนรากเป็นอาณาเขตขนราก (region of root hair) บริเวณนี้จะสังเกตเห็นขนรากจำนวนมาก

### 3.2 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ

นำกล้าทานตะวันอายุ 38-42 ชั่วโมง ที่มีความยาวราก 11-18 มิลลิเมตร แช่ในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ pH  $6.00 \pm 0.05$  เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทั้งด้านใกล้ตัวและไกลตัวของผู้วัด จำนวน 49 ราก พบรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน 3 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปแบบที่ 1 (ภาพประกอบ 28) กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณหมวกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ในปริมาณที่มากกว่าอาณาเขตอื่น โดยมีขนาดสูงสุดของแต่ละรากอยู่ในช่วง 1.06 ถึง 7.66 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย  $3.71 \pm 2.81$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และพบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากรากบริเวณอาณาเขตเซลล์ยืดตัวและอาณาเขตขนรากด้วยขนาดที่ลดลง ด้วยค่าเฉลี่ย  $1.28 \pm 1.13$

ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร โดยมีลักษณะเช่นนี้ทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด พบลักษณะดังกล่าวใน 18 ราก

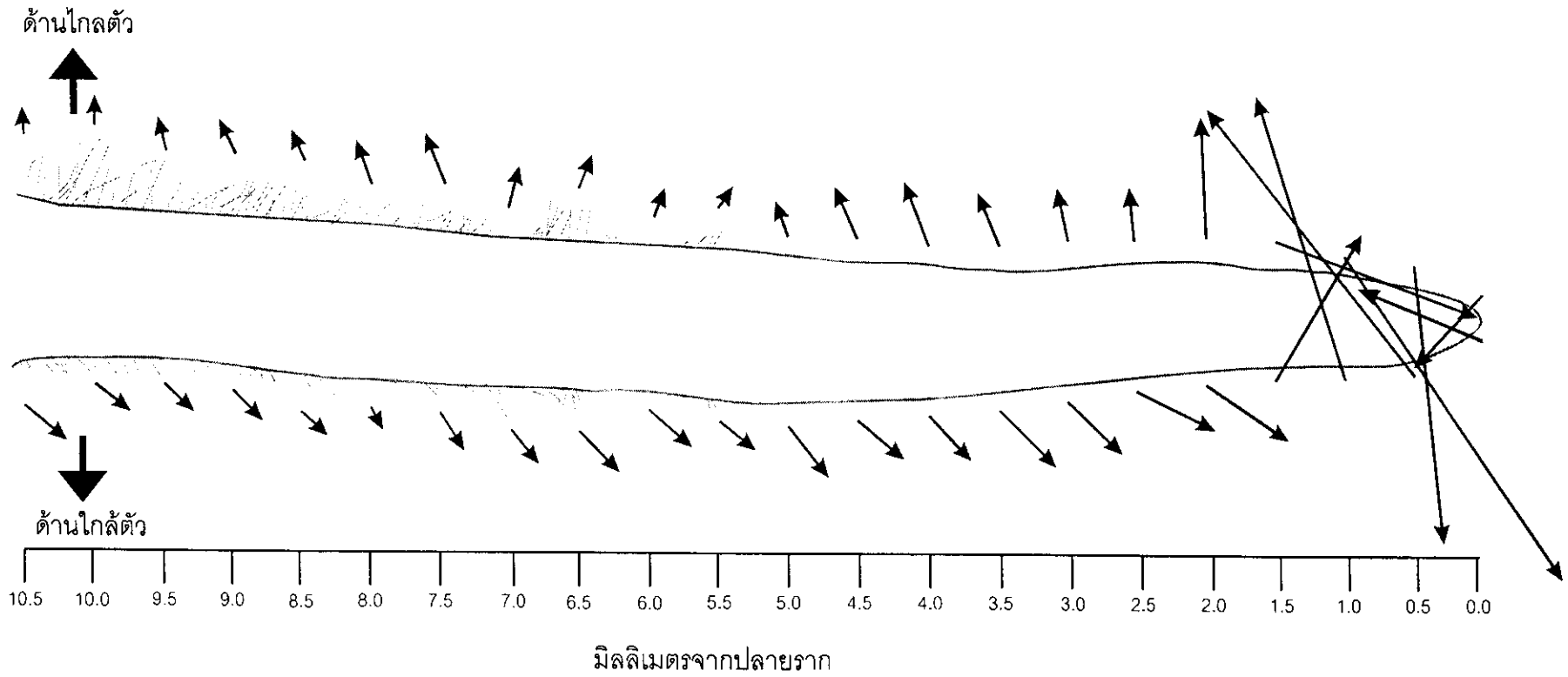
รูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบ 29) กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ในปริมาณที่มากกว่าอาณาเขตอื่นทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด ด้วยขนาดสูงสุดในแต่ละรากตั้งแต่ 1.10 ถึง 10.45 ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร โดยมีค่าเฉลี่ย  $3.87 \pm 3.05$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร บริเวณถัดมาในอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากรากเพียงด้านเดียวด้วยขนาดที่ลดลงด้วยค่าเฉลี่ย  $1.02 \pm 0.80$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร ส่วนอีกด้านหนึ่งของราก พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากรากบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากปริมาณน้อยๆ ด้วยค่าเฉลี่ย  $0.27 \pm 0.13$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตรบริเวณอาณาเขตขนราก พบลักษณะดังกล่าวจำนวน 18 ราก

รูปแบบที่ 3 (ภาพประกอบ 30) กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณหมวกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ในปริมาณที่มากกว่าบริเวณอื่น เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 และ 2 ด้วยขนาดสูงสุดในแต่ละรากตั้งแต่ 0.57 ถึง 7.51 ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร และมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย  $3.52 \pm 2.70$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร ส่วนบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก พบกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกด้วยค่าเฉลี่ย  $1.00 \pm 0.90$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร และในบริเวณถัดขึ้นไปกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากอีกด้วยค่าเฉลี่ย  $0.44 \pm 0.45$  ไมโครแอมป์เรตต์อัตรารางเซนติเมตร โดยมีลักษณะเช่นนี้ทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด ในปริมาณที่น้อยลง พบลักษณะดังกล่าวจำนวน 13 ราก

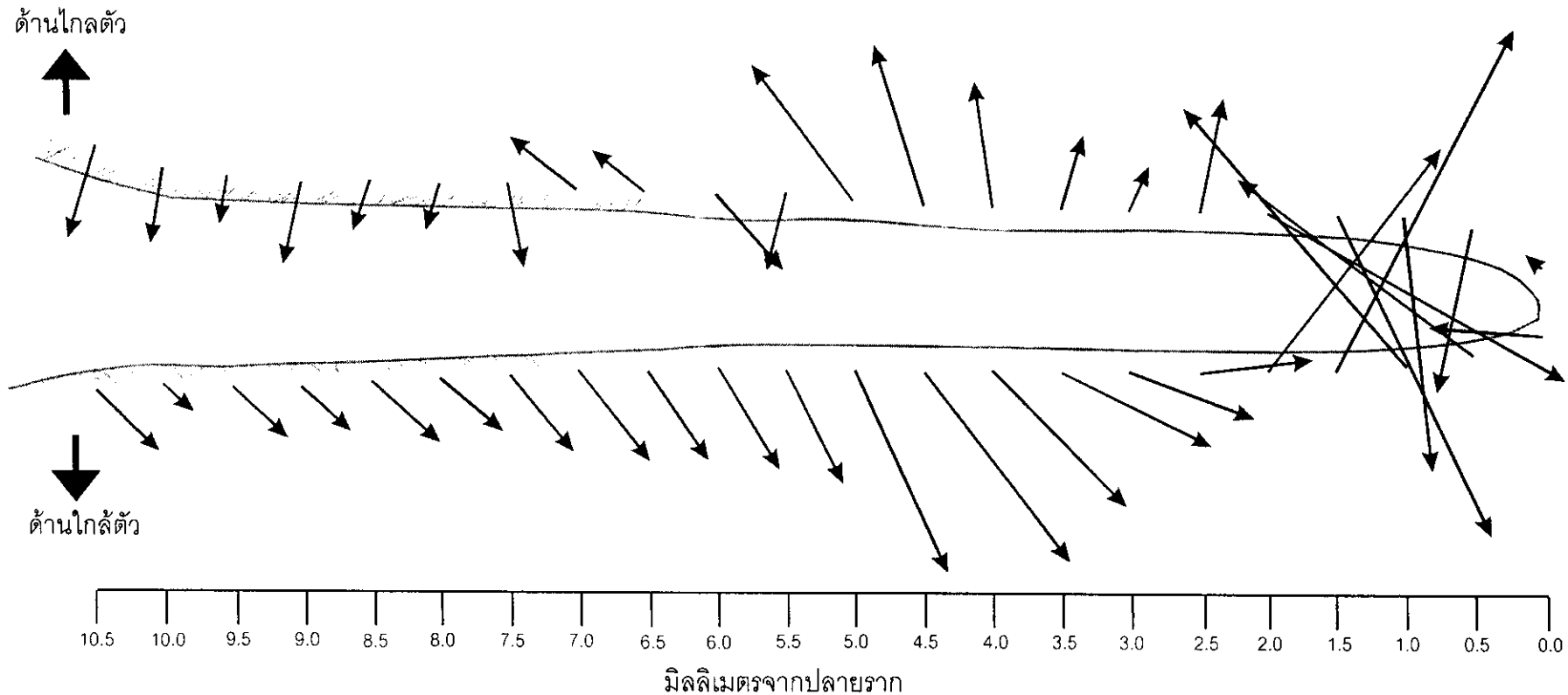
เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้งหมดมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่ง ทั้งด้านไกลตัวและด้านใกล้ตัวผู้วัด ให้ผลการทดสอบดังแสดงในตาราง 8 โดยภาพประกอบ 31 และ 32 แสดงตำแหน่งที่วัดกระแสไฟฟ้าพร้อมทั้งทิศของกระแสไฟฟ้าทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัดตามลำดับ จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าอย่างมีนัยสำคัญที่อาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและกระแสไฟฟ้ามีทิศออกด้วยขนาดที่น้อยกว่าที่อาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก เช่นเดียวกับที่พบในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) รากข้าวโพด (Miller, 1989) (Meyer and Weisenseel, 1997) และในรากพืชตระกูลถั่ว (Miller *et al.*, 1986)

เนื่องจากในรูปแบบที่ 3 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าบริเวณปลายราก หลังจากนั้นก็มีทิศออกในบริเวณถัดขึ้นไปและเข้าสู่รากอีกครั้งในบริเวณถัดขึ้นไปอีก จึงทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแส

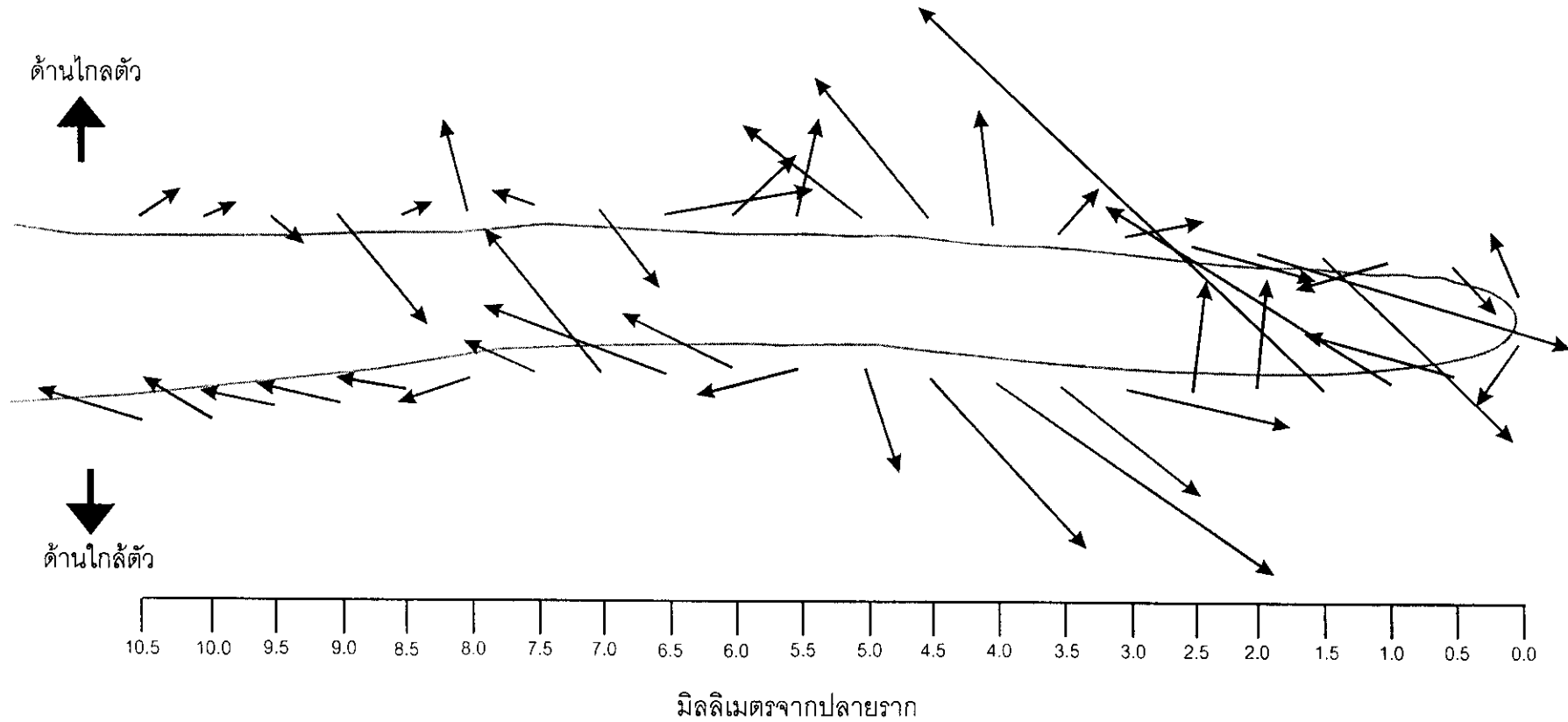
ไฟฟ้าในรูปแบบที่ 3 ทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวผู้วัด เพื่อดูว่าผลทางสถิติจะยืนยันรูปแบบดังกล่าวหรือไม่ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (ตาราง 9) เช่นเดียวกับผลการทดสอบของกระแสไฟฟ้าไอออนรวม (ตาราง 8) แต่ในบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนราก กระแสไฟฟ้าไม่แสดงทิศเข้าหรือออกอย่างมีนัยสำคัญทั้งด้านใกล้ตัวและด้านใกล้ตัวผู้วัด (ภาพประกอบ 33 และภาพประกอบ 34) ผลดังกล่าวน่าจะเนื่องจากในบริเวณดังกล่าวทิศเข้า-ออกของกระแสไฟฟ้าไม่ตรงกัน แต่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณหมวกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ส่วนอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากราก (18 รากจาก 49 ราก) ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน อัตราส่วน 1 เซนติเมตร : กระแสไฟฟ้า 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร




ภาพประกอบ 29 ตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรอกทานตะวัน กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รอกบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ส่วนอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนรอกกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรอกเพียงด้านเดียว (18 รากจาก 49 ราก) ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน อัตราส่วน 1 เซนติเมตร : กระแสไฟฟ้า 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

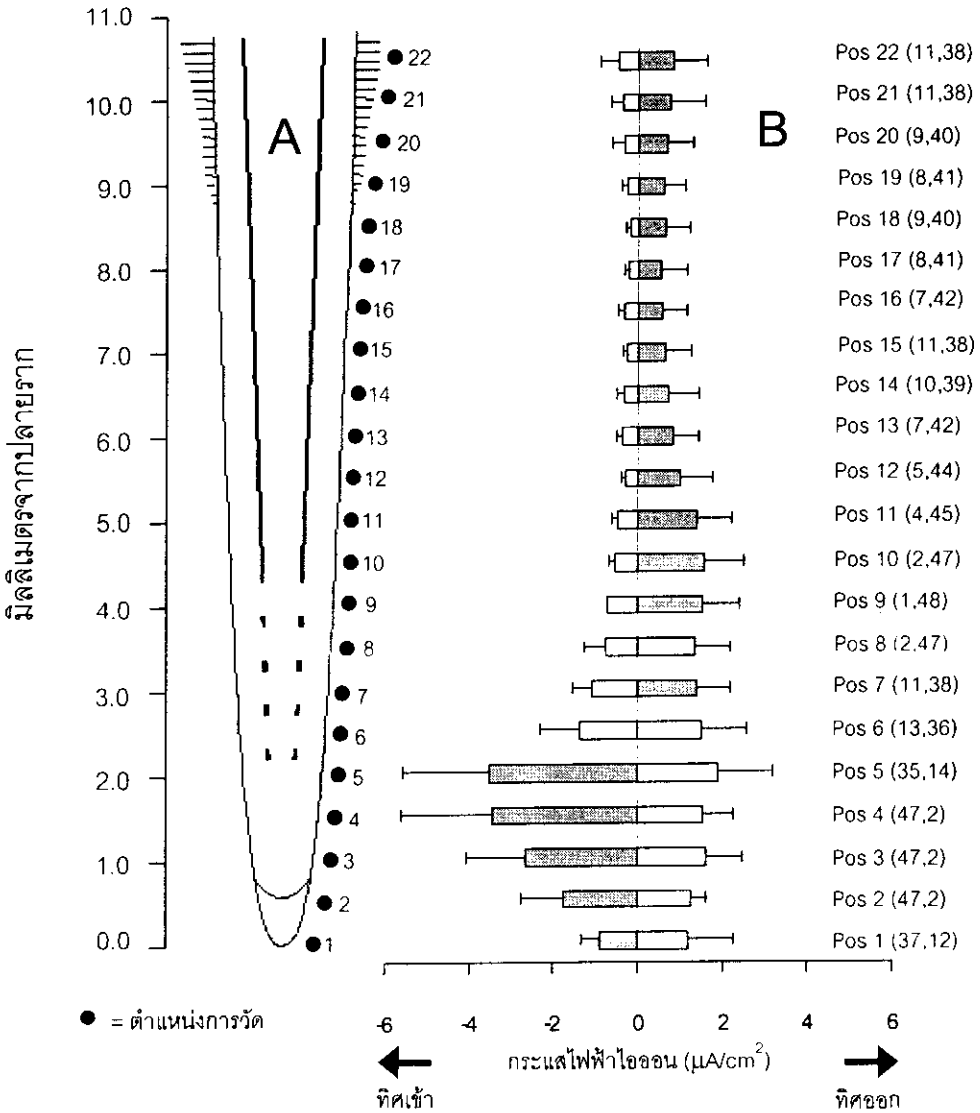


ภาพประกอบ 30 ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณหมวกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ส่วนอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกและเข้าสลับกัน (13 รากจาก 49 ราก) ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน อัตราส่วน 1 เซนติเมตร : กระแสไฟฟ้า 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันทั้งด้านใกล้ตัว และใกล้ตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนราก ใน APW pH 6.00

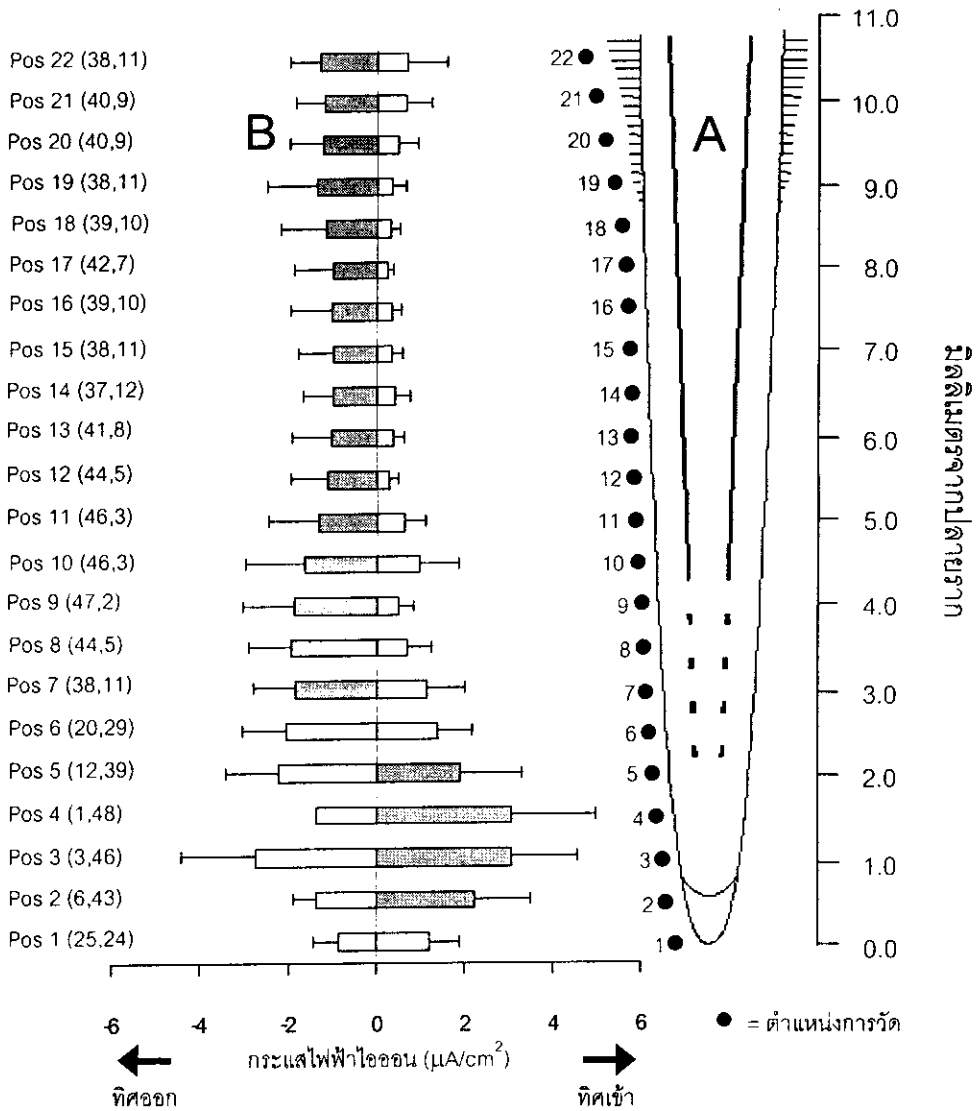
ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)							
		กระแสไฟฟ้าไอออนด้านใกล้ตัวผู้วัด				กระแสไฟฟ้าไอออนด้านใกล้ตัวผู้วัด			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.90	0.42	1.20	1.05	1.22	0.66	-0.87	0.56
2	0.5	-1.77	1.00	1.25	0.39	2.24	1.26	-1.37	0.53
3	1.0	-2.65	1.41	1.63	0.86	3.05	1.53	-2.76	1.67
4	1.5	-3.46	2.12	1.55	0.73	3.05	1.93	-1.36	nc
5	2.0	-3.53	2.02	1.89	1.31	1.90	1.38	-2.24	1.19
6	2.5	-1.36	0.94	1.51	1.09	1.38	0.78	-2.05	0.99
7	3.0	-1.09	0.46	1.39	0.80	1.13	0.84	-1.86	0.94
8	3.5	-0.77	0.49	1.38	0.80	0.70	0.53	-1.97	0.95
9	4.0	-0.71	nc	1.55	0.85	0.46	0.36	-1.88	1.18
10	4.5	-0.55	0.13	1.58	0.92	0.95	0.89	-1.66	1.32
11	5.0	-0.45	0.15	1.41	0.82	0.60	0.50	-1.35	1.12
12	5.5	-0.30	0.10	1.02	0.75	0.29	0.18	-1.13	0.84
13	6.0	-0.37	0.14	0.83	0.61	0.37	0.23	-1.04	0.86
14	6.5	-0.33	0.19	0.73	0.70	0.41	0.35	-0.98	0.71
15	7.0	-0.27	0.10	0.66	0.59	0.36	0.22	-1.00	0.77
16	7.5	-0.33	0.14	0.58	0.58	0.33	0.21	-1.03	0.93
17	8.0	-0.23	0.10	0.55	0.60	0.24	0.13	-0.98	0.89
18	8.5	-0.19	0.09	0.63	0.58	0.32	0.19	-1.16	1.03
19	9.0	-0.26	0.13	0.81	0.51	0.34	0.31	-1.36	1.14
20	9.5	-0.33	0.26	0.69	0.61	0.49	0.42	-1.22	0.78
21	10.0	-0.36	0.30	0.76	0.83	0.67	0.58	-1.19	0.66
22	10.5	-0.47	0.42	0.83	0.80	0.70	0.86	-1.30	0.69

 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )



ภาพประกอบ 31 ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกทรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก  
 A) ตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร เริ่มจากปลายถึงโคนราก  
 B) ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่ 2 แสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก



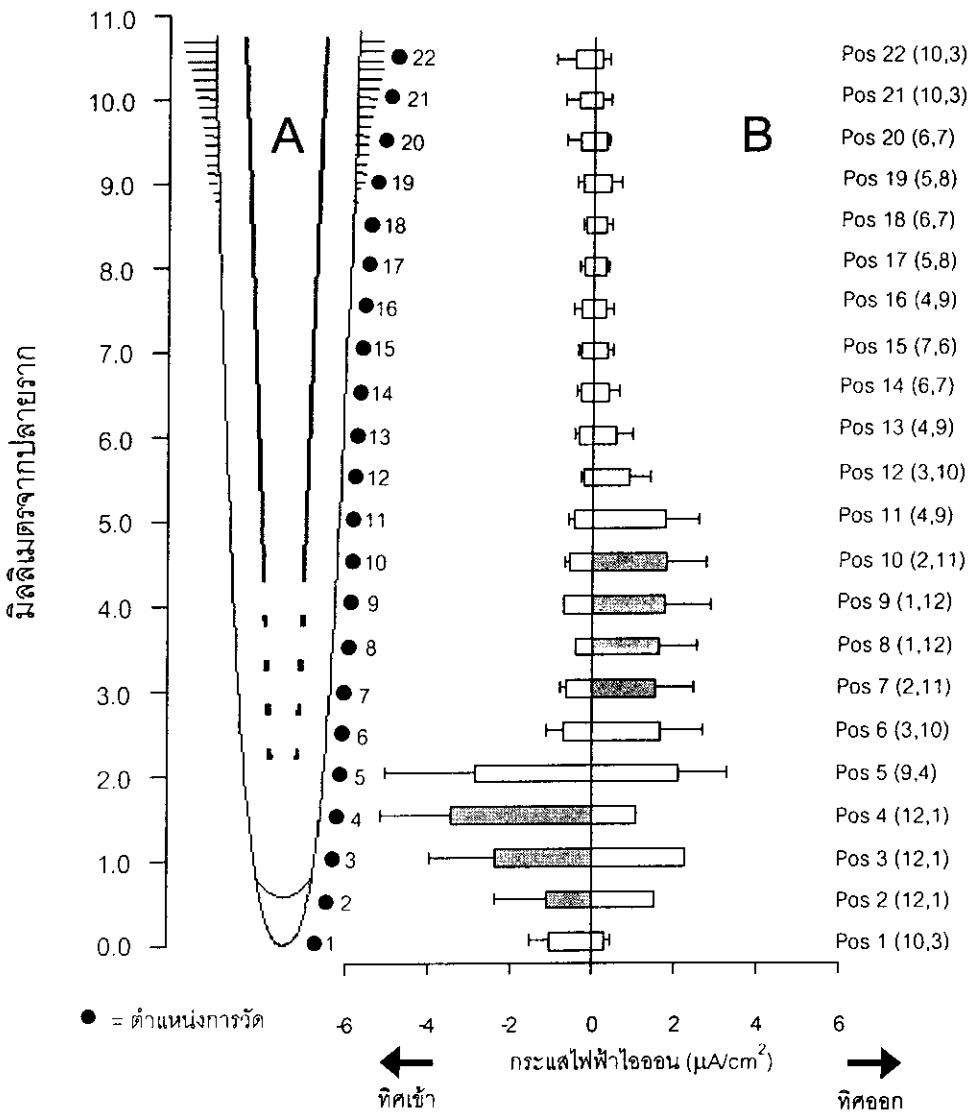


ภาพประกอบ 32 ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกกรากทวนตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก  
 A) ตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร เริ่มจากปลายถึงโคนราก  
 B) ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ส่วนที่แรงกว่าแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่ 2 แสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

ตาราง 9 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ตามความยาวของรากทานตะวัน ทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนราก ใน APW pH 6.00

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)							
		กระแสไฟฟ้าไอออนด้านใกล้ตัวผู้วัด				กระแสไฟฟ้าไอออนด้านใกล้ตัวผู้วัด			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-1.02	0.48	0.30	0.15	1.06	0.59	-0.47	0.44
2	0.5	-1.12	1.27	1.52	nc	1.64	1.15	-1.06	0.52
3	1.0	-2.37	1.59	2.24	nc	2.45	1.46	-1.79	0.00
4	1.5	-3.43	1.72	1.07	nc	2.45	1.33	-1.36	nc
5	2.0	-2.87	2.18	2.12	1.20	1.66	1.48	-2.36	1.63
6	2.5	-0.70	0.41	1.66	1.03	1.16	1.01	-2.01	0.84
7	3.0	-0.63	0.15	1.56	0.93	0.46	0.35	-1.76	0.94
8	3.5	-0.42	nc	1.63	0.94	0.38	0.37	-1.82	0.82
9	4.0	-0.71	nc	1.76	1.14	0.46	0.36	-1.83	1.11
10	4.5	-0.55	0.13	1.81	0.98	0.44	0.10	-1.46	0.87
11	5.0	-0.45	0.15	1.78	0.81	0.32	0.08	-1.03	0.66
12	5.5	-0.21	0.06	0.89	0.53	0.39	0.25	-0.75	0.65
13	6.0	-0.32	0.12	0.56	0.38	0.39	0.29	-0.67	0.57
14	6.5	-0.31	0.11	0.38	0.27	0.50	0.45	-0.75	0.51
15	7.0	-0.28	0.11	0.32	0.17	0.25	0.17	-0.58	0.27
16	7.5	-0.31	0.17	0.29	0.18	0.27	0.21	-0.34	0.12
17	8.0	-0.24	0.09	0.31	0.07	0.17	0.07	-0.28	0.21
18	8.5	-0.18	0.08	0.28	0.14	0.30	0.16	-0.40	0.21
19	9.0	-0.25	0.15	0.40	0.27	0.40	0.35	-0.52	0.29
20	9.5	-0.32	0.33	0.30	0.08	0.63	0.46	-0.48	0.29
21	10.0	-0.37	0.33	0.20	0.20	0.78	0.67	-0.56	0.47
22	10.5	-0.48	0.46	0.20	0.16	0.82	0.92	-0.69	0.51

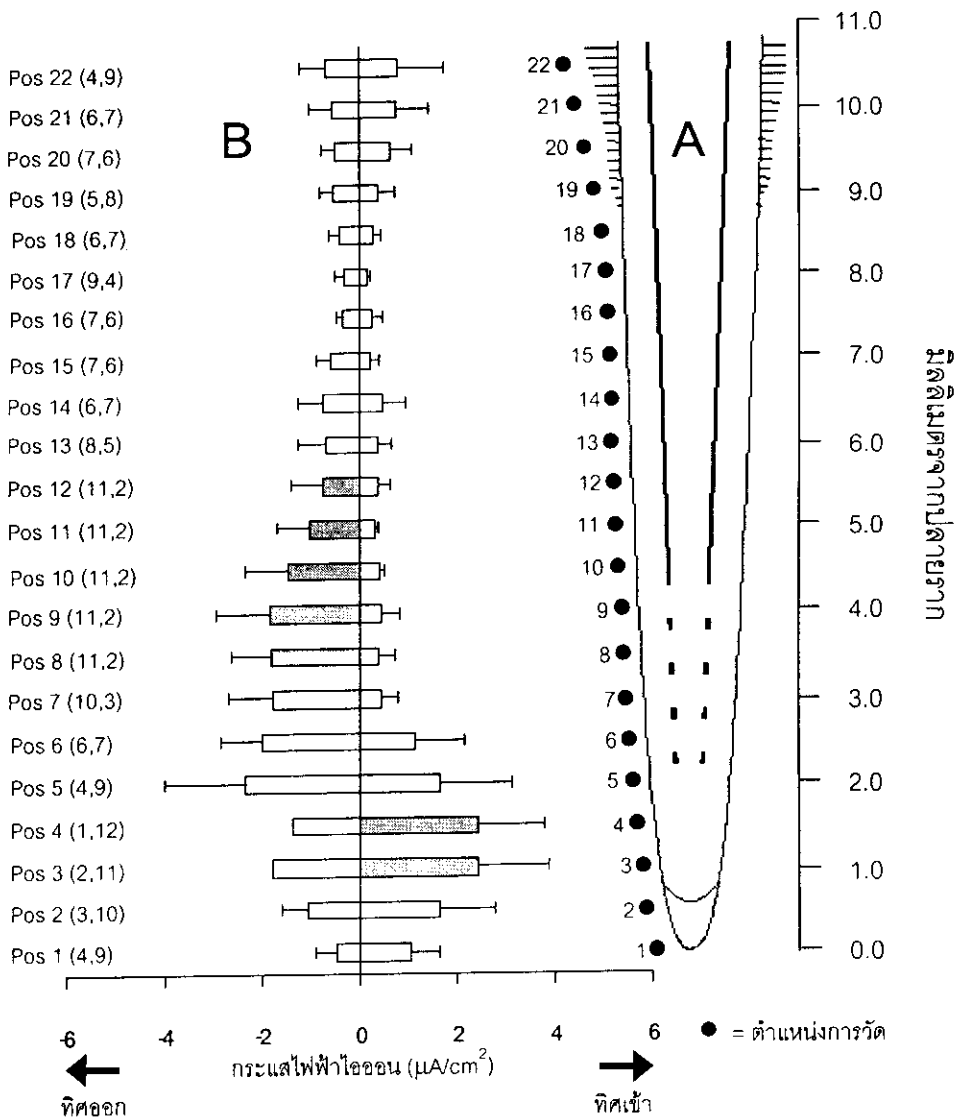
แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )



ภาพประกอบ 33 ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก

A) ตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร เริ่มจากปลายถึงโคนราก

B) ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่ 2 แสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก



ภาพประกอบ 34 ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก

A) ตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร เริ่มจากปลายถึงโคนราก

B) ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่ 2 แสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

### 3.3 อัตรายึดของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 ที่สภาวะปกติ

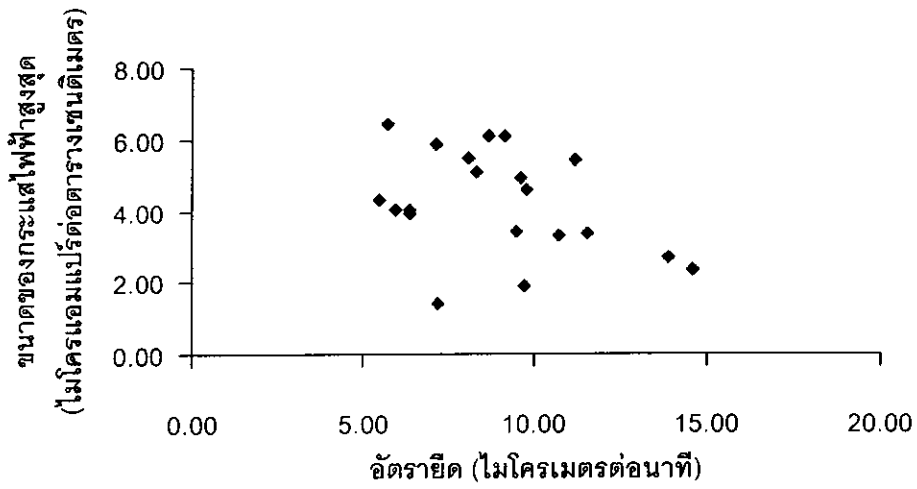
ในการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันจำนวน 49 ราก สามารถวัดอัตรายึดของรากทานตะวันได้ทั้งหมด 20 ราก การที่ไม่สามารถวัดอัตรายึดได้ทุกราก เนื่องจากในบางรากไม่มีจุดสังเกตที่เด่นชัด จึงไม่สามารถหาจุดอ้างอิงในการวัดได้ โดยรากทานตะวัน 20 รากนี้มีอายุ 38-42 ชั่วโมง ความยาวราก  $1.43 \pm 0.17$  เซนติเมตร มีอัตรายึดเฉลี่ย  $8.93 \pm 2.57$  ไมโครเมตรต่อนาที่ และมีขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย  $4.24 \pm 1.46$  ไมโครแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร (ตาราง 10)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายึดกับขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนสูงสุด (ภาพประกอบ 35) และความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากทานตะวันกับอัตรายึด (ภาพประกอบ 36) ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายึดกับขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แสดงทิศเข้าสู่รากและไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและอัตรายึดเช่นกัน

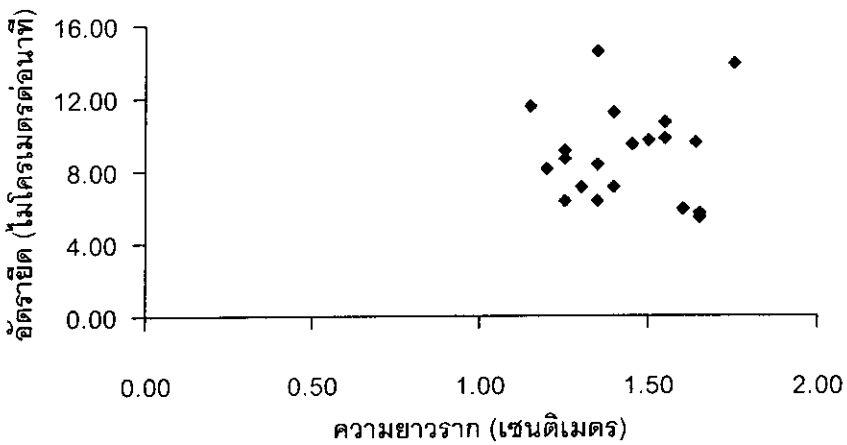
จากงานวิจัยของ Iwabushi และคณะ (1989) ที่พบว่า รากที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่บริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและอาณาเขตขนรากจะมีอัตรายึดมากกว่ารากที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าเฉพาะบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (รูปแบบที่ 3 ในงานวิจัยนี้) ดังนั้นจึงพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายึดและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนสูงสุด (ภาพประกอบ 37) และความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของรากทานตะวันกับอัตรายึดเฉพาะรูปแบบที่ 3 (ภาพประกอบ 38) พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนสูงสุดกับอัตรายึดในรูปแบบที่ 3 มีค่าไม่แตกต่างจากรูปแบบอื่นๆ (ภาพประกอบ 35 และภาพประกอบ 36)

ตาราง 10 อัตราയിดของรากทานตะวันอายุ 38-42 ชั่วโมง ในสภาวะปกติ APW pH 6.00

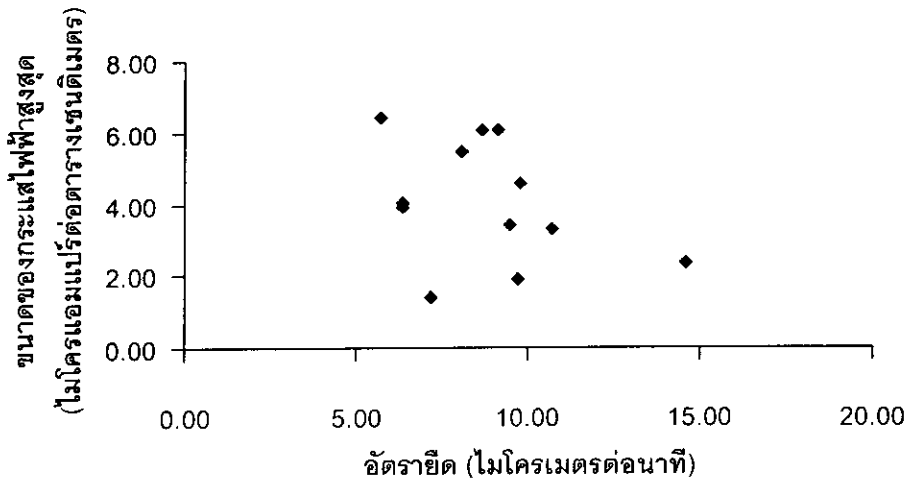
รากที่	รูปแบบ กระแสไฟฟ้า	ความยาวราก (เซนติเมตร)	อัตรายิด (ไมโครเมตรต่อนาที)	ขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุด (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
1	1	1.30	7.10	5.86
2	1	1.15	11.53	3.36
3	1	1.60	5.93	4.04
4	1	1.64	9.61	4.91
5	1	1.40	11.18	5.42
6	1	1.35	8.32	5.08
7	2	1.65	5.45	4.33
8	2	1.75	13.90	2.70
9	3	1.55	10.69	3.30
10	3	1.35	14.58	2.33
11	3	1.25	6.36	3.94
12	3	1.65	5.69	6.45
13	3	1.40	7.16	1.39
14	3	1.45	9.45	3.42
15	3	1.35	6.36	4.03
16	3	1.50	9.69	1.93
17	3	1.25	9.10	6.12
18	3	1.55	9.77	4.57
19	3	1.20	8.08	5.47
20	3	1.25	8.65	6.08
ค่าเฉลี่ย		1.43±0.17	8.93±2.57	4.24±1.46



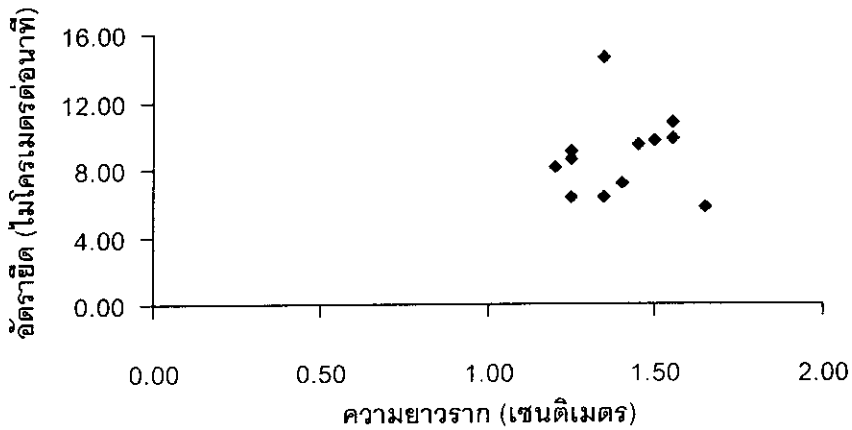
ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายัดของรากทานตะวันและขนาดของกระแสไฟฟ้สูงสุด



ภาพประกอบ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากกับอัตรายัดของรากทานตะวัน



ภาพประกอบ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายัดของรากทานตะวันและขนาดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดของรูปแบบที่ 3



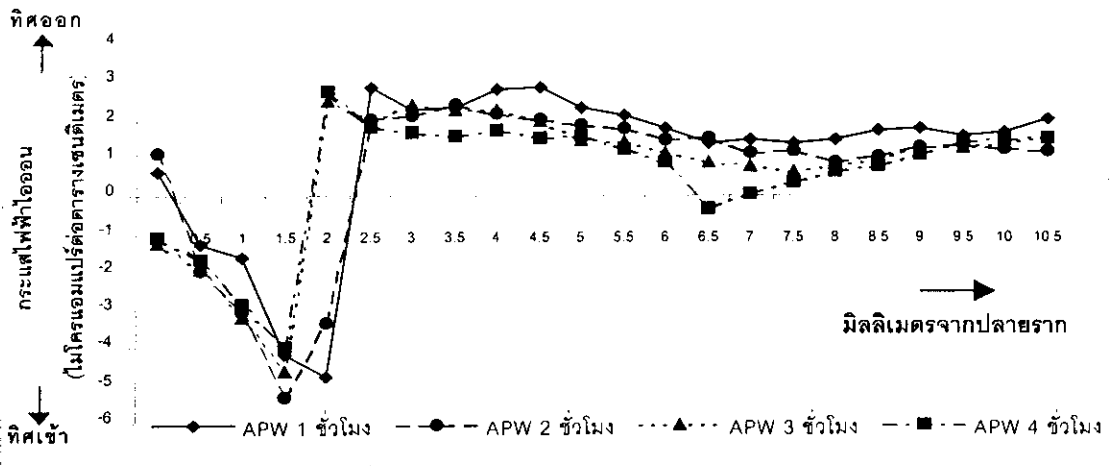
ภาพประกอบ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากกับอัตรายัดของรากทานตะวันของรูปแบบที่ 3



### 3.4 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 และ pH 4.50 เวลา 1-4 ชั่วโมง

ในการศึกษาผลของสารพิษที่มีต่อรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน นั้นคือศึกษาผลของ แคดเมียมและอาร์ซีนิกที่ pH 6.00 และผลของอลูมิเนียมที่ pH 4.50 ต้องใช้เวลาในการทดลอง แต่ละครั้งประมาณ 3 ชั่วโมง จึงได้ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนของรากในสารละลาย APW ที่ pH 6.00 และ pH 4.50 ในช่วงเวลาต่างๆ โดยวัดกระแสไฟฟ้าเมื่อรากอยู่ในสภาวะปกติ APW เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง เพื่อให้เปรียบเทียบกับผลของสารพิษที่จะศึกษาต่อไป

พบว่า ที่ pH 6.00 ในทุกๆ ชั่วโมง กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและมีทิศออกจากรากบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนรากด้วยขนาดที่น้อยกว่า (ภาพประกอบ 39)



ภาพประกอบ 39 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน สารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง

เมื่อนำขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนแต่ละรากมาทดสอบทางสถิติเพื่อดูผลของเวลา พบว่า ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในบางรากลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (ตาราง 11) โดยระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 2 ขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนลดลง 3 ราก ระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 3 ขนาดกระแสไฟฟ้าไอออน ลดลง 2 ราก และระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 4 ขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนลดลง 9 รากจากทั้งหมด 13 ราก และมี 3 รากที่กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 2 (ตาราง 11A) และชั่วโมงที่ 3 (ตาราง 11B)

เมื่อพิจารณาผลของเวลาที่มิต่ออาณาเขตต่างๆ ของราก โดยทดสอบแต่ละตำแหน่งวัด (ตาราง 12) พบว่าในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่า  $t$  เป็นบวก) ทั้ง 3 ชั่วโมง โดยเฉพาะในชั่วโมงที่ 3 ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตาราง 12B) ส่วนบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก กระแสไฟฟ้าไอออนมีแนวโน้มลดลง (ค่า  $t$  เป็นลบ) เกือบทุกตำแหน่งและลดลงอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 4 (ตาราง 12C)

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้ง 13 รากมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าและทดสอบทางสถิติเพื่อกำหนดทิศของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 13 และภาพประกอบ 40) พบว่าทั้งสี่ชั่วโมงกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากด้วยขนาดเฉลี่ยสูงสุดบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนบริเวณอื่นๆ กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากราก จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเวลาจะมีผลต่อขนาดของกระแสไฟฟ้า โดยจะมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญในอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนรากในชั่วโมงที่สี่ อย่างไรก็ตามเวลาไม่มีผลต่อทิศของกระแสไฟฟ้า

ตาราง 11 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00  
แต่ละราก เปรียบเทียบระหว่าง A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง  
B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-0.215	ไม่มีความแตกต่าง	-0.277	ไม่มีความแตกต่าง	-5.533	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>b</sup>
2	2.839	1 ชั่วโมง < 2 ชั่วโมง <sup>c</sup>	0.292	ไม่มีความแตกต่าง	-2.137	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
3	-2.747	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-0.357	ไม่มีความแตกต่าง	-1.890	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
4	0.882	ไม่มีความแตกต่าง	1.513	ไม่มีความแตกต่าง	-4.127	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>d</sup>
5	0.722	ไม่มีความแตกต่าง	2.024	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.284	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
6	2.175	1 ชั่วโมง < 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	4.197	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>d</sup>	0.931	ไม่มีความแตกต่าง
7	-1.491	ไม่มีความแตกต่าง	-2.284	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-4.133	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>d</sup>
8	-1.135	ไม่มีความแตกต่าง	-0.166	ไม่มีความแตกต่าง	-0.611	ไม่มีความแตกต่าง
9	-5.762	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>d</sup>	-4.311	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>d</sup>	-4.668	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>d</sup>
10	2.333	1 ชั่วโมง < 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-1.449	ไม่มีความแตกต่าง	-4.612	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>d</sup>
11	-0.209	ไม่มีความแตกต่าง	0.003	ไม่มีความแตกต่าง	-2.453	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
12	-3.700	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>d</sup>	3.544	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>d</sup>	0.978	ไม่มีความแตกต่าง
13	1.550	ไม่มีความแตกต่าง	0.360	ไม่มีความแตกต่าง	1.360	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 12 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00  
แต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่าง A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง  
B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง

ตำแหน่ง ที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	0.026	ไม่มีความแตกต่าง	0.939	ไม่มีความแตกต่าง	0.379	ไม่มีความแตกต่าง
2	1.386	ไม่มีความแตกต่าง	1.950	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	1.587	ไม่มีความแตกต่าง
3	1.364	ไม่มีความแตกต่าง	2.087	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	2.109	1 ชั่วโมง < 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
4	1.091	ไม่มีความแตกต่าง	1.713	ไม่มีความแตกต่าง	0.211	ไม่มีความแตกต่าง
5	0.995	ไม่มีความแตกต่าง	2.828	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-1.548	ไม่มีความแตกต่าง
6	1.476	ไม่มีความแตกต่าง	3.224	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>c</sup>	-0.851	ไม่มีความแตกต่าง
7	-0.093	ไม่มีความแตกต่าง	1.805	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.192	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
8	-1.601	ไม่มีความแตกต่าง	0.624	ไม่มีความแตกต่าง	-3.255	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
9	-3.832	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-0.899	ไม่มีความแตกต่าง	-4.967	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
10	-4.046	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.135	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.216	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
11	-3.952	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.267	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.639	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
12	-3.785	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>c</sup>	-1.548	ไม่มีความแตกต่าง	-4.853	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
13	-1.697	ไม่มีความแตกต่าง	-1.474	ไม่มีความแตกต่าง	-5.145	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
14	0.766	ไม่มีความแตกต่าง	-0.441	ไม่มีความแตกต่าง	-2.338	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
15	2.207	1 ชั่วโมง < 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-0.064	ไม่มีความแตกต่าง	-1.953	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
16	1.598	ไม่มีความแตกต่าง	-0.947	ไม่มีความแตกต่าง	-3.756	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>c</sup>
17	0.944	ไม่มีความแตกต่าง	-0.514	ไม่มีความแตกต่าง	-4.504	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
18	-1.499	ไม่มีความแตกต่าง	-1.550	ไม่มีความแตกต่าง	-4.058	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
19	-1.447	ไม่มีความแตกต่าง	-1.728	ไม่มีความแตกต่าง	-4.050	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
20	-1.727	ไม่มีความแตกต่าง	-1.933	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.356	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
21	-2.034	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-1.935	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-6.109	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
22	-2.620	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-3.047	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-6.522	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก




ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



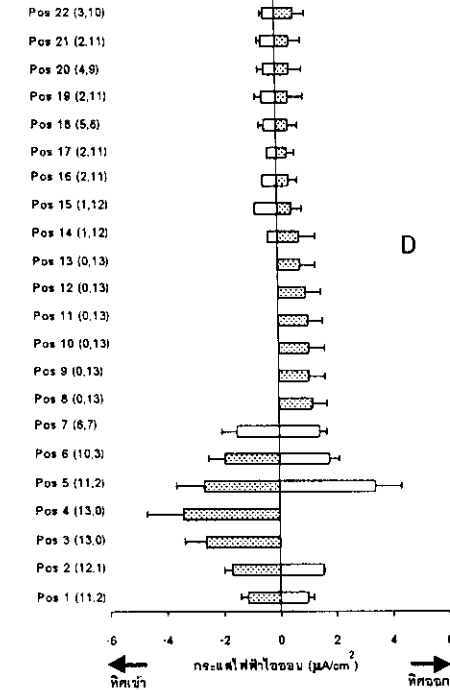
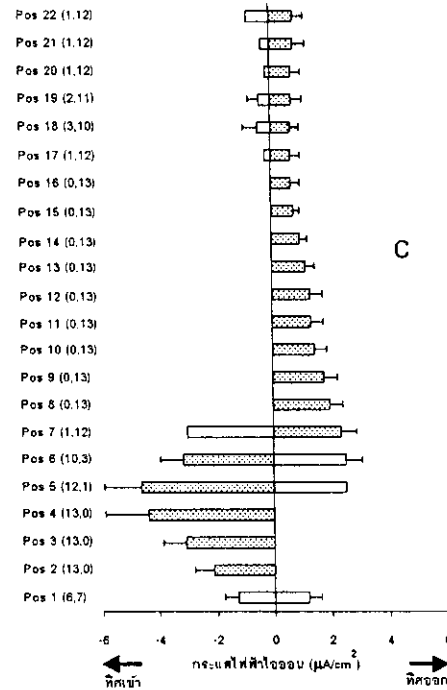
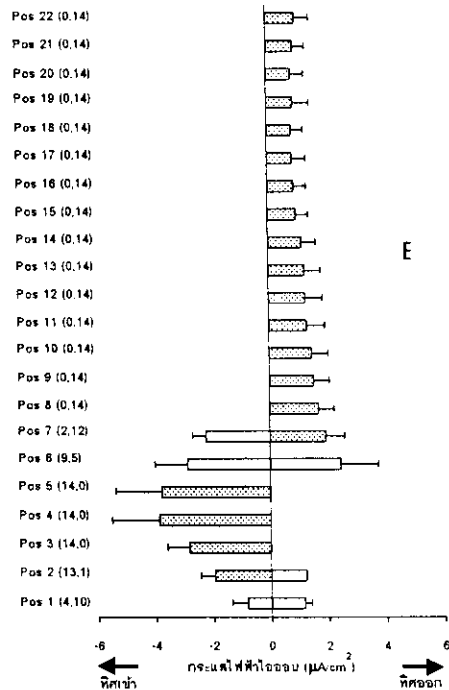
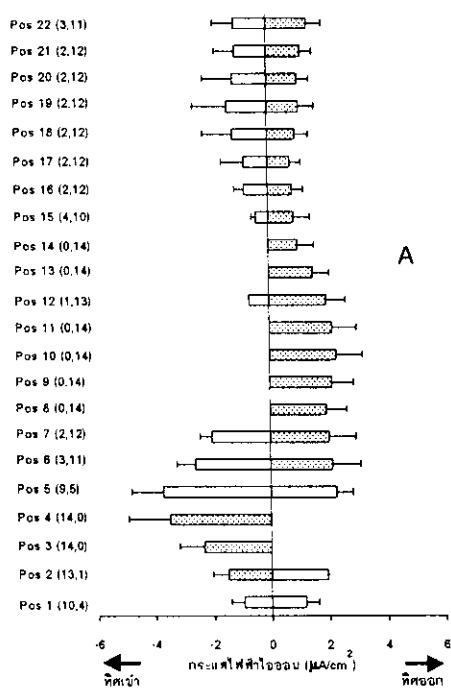
ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 13 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 6.00 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียว จากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิสนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า  แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จากราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง				ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.96	0.44	1.19	0.43	-0.84	0.54	1.17	0.22	-1.27	0.46	1.19	0.40	-1.15	0.25	0.99	0.19
2	0.5	-1.51	0.53	1.95	nc	-1.96	0.48	1.24	nc	-2.10	0.68	n	nc	-1.71	0.28	1.55	nc
3	1.0	-2.33	0.85	n	nc	-2.82	0.78	n	nc	-3.08	0.80	n	nc	-2.62	0.76	n	nc
4	1.5	-3.50	1.42	n	nc	-3.87	1.62	n	nc	-4.36	1.52	n	nc	-3.41	1.26	n	nc
5	2.0	-3.72	1.10	2.29	0.54	-3.77	1.61	n	nc	-4.62	1.29	2.55	nc	-2.68	0.97	3.41	0.91
6	2.5	-2.59	0.65	2.16	0.92	-2.87	1.13	2.47	1.26	-3.15	0.79	2.54	0.55	-1.92	0.58	1.78	0.34
7	3.0	-2.04	0.40	2.04	0.90	-2.23	0.48	1.96	0.64	-2.99	nc	2.39	0.52	-1.50	0.53	1.44	0.23
8	3.5	n	nc	1.95	0.69	n	nc	1.72	0.50	n	nc	2.00	0.43	n	nc	1.19	0.49
9	4.0	n	nc	2.15	0.72	n	nc	1.55	0.53	n	nc	1.79	0.45	n	nc	1.09	0.54
10	4.5	n	nc	2.31	0.86	n	nc	1.48	0.56	n	nc	1.48	0.41	n	nc	1.10	0.53
11	5.0	n	nc	2.17	0.82	n	nc	1.33	0.59	n	nc	1.37	0.40	n	nc	1.07	0.49
12	5.5	-0.69	nc	1.98	0.64	n	nc	1.28	0.59	n	nc	1.33	0.40	n	nc	1.00	0.48
13	6.0	n	nc	1.51	0.57	n	nc	1.26	0.54	n	nc	1.18	0.29	n	nc	0.81	0.51
14	6.5	n	nc	1.01	0.56	n	nc	1.16	0.48	n	nc	1.00	0.23	-0.33	nc	0.77	0.54
15	7.0	-0.42	0.15	0.90	0.52	n	nc	1.00	0.39	n	nc	0.79	0.19	-0.80	nc	0.52	0.34
16	7.5	-0.82	0.35	0.84	0.36	n	nc	0.92	0.41	n	nc	0.69	0.30	-0.49	0.03	0.44	0.28
17	8.0	-0.83	0.79	0.75	0.36	n	nc	0.88	0.44	-0.19	nc	0.71	0.31	-0.33	nc	0.38	0.26
18	8.5	-1.20	1.04	0.97	0.43	n	nc	0.84	0.40	-0.45	0.50	0.71	0.29	-0.42	0.18	0.44	0.30
19	9.0	-1.39	1.17	1.09	0.52	n	nc	0.93	0.53	-0.39	0.39	0.75	0.37	-0.49	0.26	0.44	0.51
20	9.5	-1.18	1.04	1.07	0.37	n	nc	0.84	0.43	-0.15	nc	0.74	0.33	-0.41	0.21	0.50	0.42
21	10.0	-1.09	0.70	1.19	0.37	n	nc	0.95	0.38	-0.29	nc	0.85	0.37	-0.49	0.13	0.50	0.41
22	10.5	-1.12	0.71	1.41	0.49	n	nc	1.02	0.47	-0.80	nc	0.83	0.35	-0.40	0.12	0.69	0.37

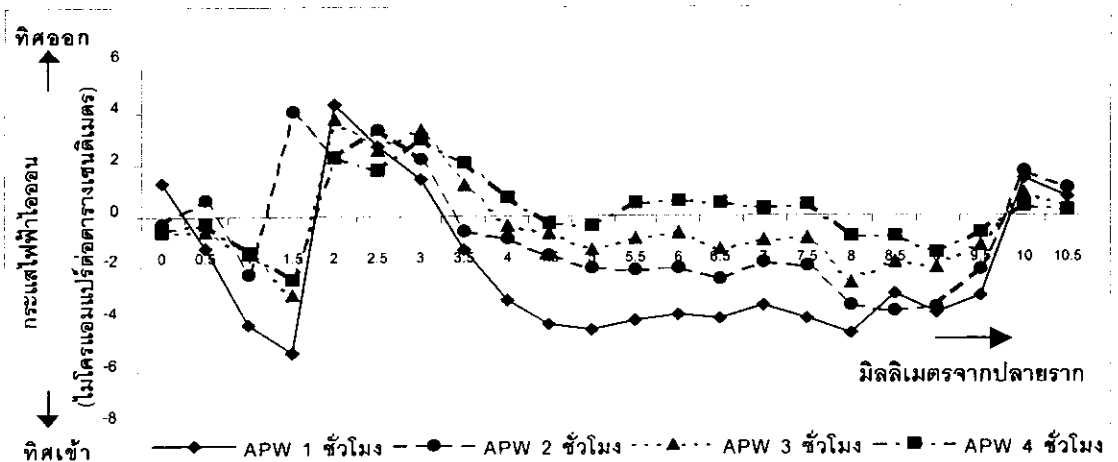


ภาพประกอบ 40 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) ชั่วโมงที่ 1  
(C) ชั่วโมงที่ 3

(B) ชั่วโมงที่ 2  
(D) ชั่วโมงที่ 4

เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 4.50 พบว่าบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงตามเวลา (ภาพประกอบ 41)



ภาพประกอบ 41 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง

เมื่อนำขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนแต่ละรากมาทดสอบทางสถิติเพื่อดูผลของเวลา (ตาราง 14) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 2 กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลง 6 ราก ระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 3 กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลง 5 ราก และระหว่างชั่วโมงที่ 1 กับ 4 กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลง 7 รากจากทั้งหมด 11 ราก ในขณะเดียวกัน กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้น 3 รากและ 2 รากในชั่วโมงที่ 3 และชั่วโมงที่ 4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของเวลาที่มิต้ออาณาเขตต่างๆ ของราก โดยทดสอบแต่ละตำแหน่งวัด (ตาราง 15) พบว่า กระแสไฟฟ้าไอออนมีแนวโน้มลดลงเกือบทุกตำแหน่งทั้งในชั่วโมงที่ 2, 3 และ 4 และบริเวณส่วนกลางของอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 จนถึงชั่วโมงที่ 4 ส่วนอาณาเขตชนรากกระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 3 (ตาราง 15B) และชั่วโมงที่ 4 (ตาราง 15C)

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้ง 11 รากมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 16 และภาพประกอบ 42) พบว่า กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 1 (ภาพประกอบ 42A) และตำแหน่งที่แสดงระดับนัยสำคัญของทิศเข้าสู่รากมีจำนวนลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

โดยสรุปแล้วผลของเวลาใน pH 4.50 จะแตกต่างจากใน pH 6.00 คือมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางเมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยขนาดจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าเป็นส่วนมากในช่วงแรก มีบางส่วนโดยเฉพาะในบริเวณเซลล์ยัดตัวที่มีการเปลี่ยนทิศเป็นทิศออกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการพิจารณาผลจากสารพิษจึงต้องพิจารณาผลของเวลาควบคู่กันไปด้วย

ตาราง 14 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.50

แต่ละราก เปรียบเทียบระหว่าง A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง

B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.352	ไม่มีความแตกต่าง	1.944	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	4.091	1 ชั่วโมง < 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
2	-4.382	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.451	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-6.314	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
3	-4.904	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.451	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-6.314	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
4	-0.289	ไม่มีความแตกต่าง	1.813	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-0.861	ไม่มีความแตกต่าง
5	-3.498	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.306	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-5.263	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
6	-0.960	ไม่มีความแตกต่าง	-1.645	ไม่มีความแตกต่าง	-3.937	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
7	-2.528	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.485	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-3.584	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
8	-3.306	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-4.418	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-4.504	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
9	1.317	ไม่มีความแตกต่าง	2.464	1 ชั่วโมง < 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	2.412	1 ชั่วโมง < 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
10	-1.020	ไม่มีความแตกต่าง	-1.500	ไม่มีความแตกต่าง	-1.621	ไม่มีความแตกต่าง
11	-3.154	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	0.432	ไม่มีความแตกต่าง	-4.959	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตาราง 15 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.50  
แต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่าง A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง  
B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง

ตำแหน่ง ที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 2 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 3 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ APW 4 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-1.180	ไม่มีความแตกต่าง	-1.904	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-0.594	ไม่มีความแตกต่าง
2	-3.000	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-2.885	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>b</sup>	1.940	1 ชั่วโมง < 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
3	-2.398	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-1.511	ไม่มีความแตกต่าง	0.914	ไม่มีความแตกต่าง
4	-1.166	ไม่มีความแตกต่าง	-0.360	ไม่มีความแตกต่าง	-1.412	ไม่มีความแตกต่าง
5	-1.434	ไม่มีความแตกต่าง	-0.169	ไม่มีความแตกต่าง	-1.733	ไม่มีความแตกต่าง
6	0.516	ไม่มีความแตกต่าง	1.251	ไม่มีความแตกต่าง	-1.521	ไม่มีความแตกต่าง
7	0.320	ไม่มีความแตกต่าง	1.433	ไม่มีความแตกต่าง	-0.410	ไม่มีความแตกต่าง
8	-0.974	ไม่มีความแตกต่าง	0.775	ไม่มีความแตกต่าง	0.444	ไม่มีความแตกต่าง
9	-2.105	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-1.391	ไม่มีความแตกต่าง	-2.618	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
10	-3.154	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-2.653	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.169	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
11	-3.080	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-2.591	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.409	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
12	-2.857	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-2.520	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-3.355	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
13	-2.493	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.622	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.748	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
14	-1.781	ไม่มีความแตกต่าง	-2.028	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.982	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
15	-2.059	1 ชั่วโมง > 2 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.007	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-3.197	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
16	-1.254	ไม่มีความแตกต่าง	-1.559	ไม่มีความแตกต่าง	-2.547	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
17	-1.302	ไม่มีความแตกต่าง	-1.929	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.307	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
18	-0.132	ไม่มีความแตกต่าง	-1.604	ไม่มีความแตกต่าง	-2.203	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
19	-0.588	ไม่มีความแตกต่าง	-2.071	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.787	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
20	-0.837	ไม่มีความแตกต่าง	-2.550	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-3.854	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
21	0.216	ไม่มีความแตกต่าง	-2.907	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>b</sup>	-3.467	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>
22	0.252	ไม่มีความแตกต่าง	-1.918	1 ชั่วโมง > 3 ชั่วโมง <sup>a</sup>	-2.389	1 ชั่วโมง > 4 ชั่วโมง <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



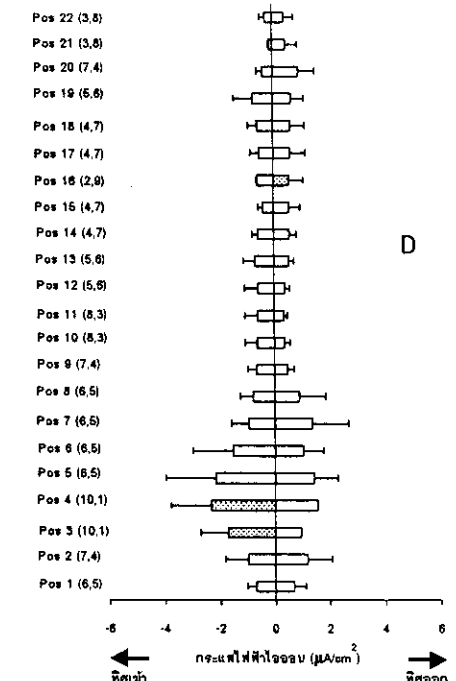
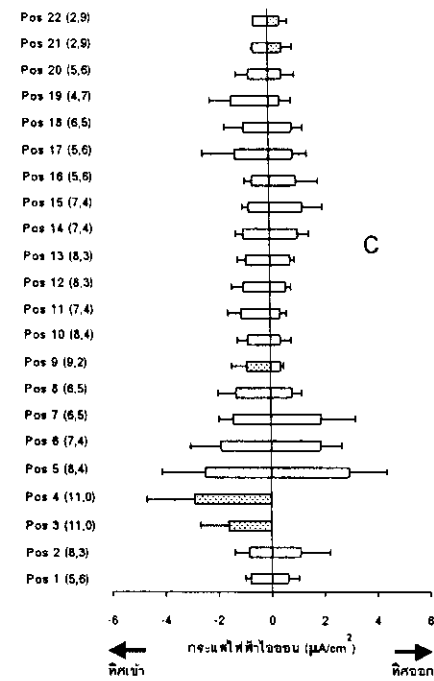
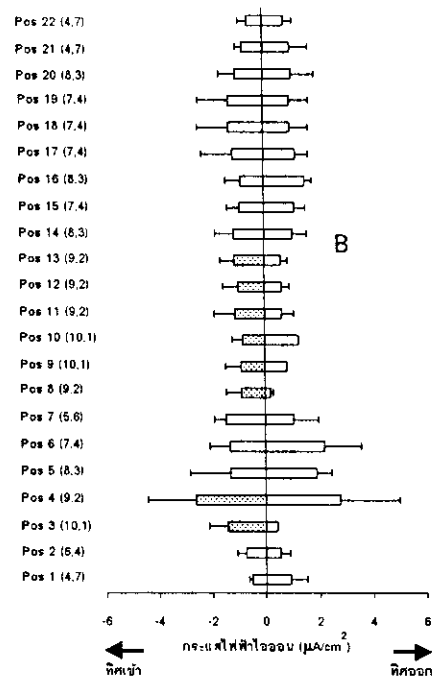
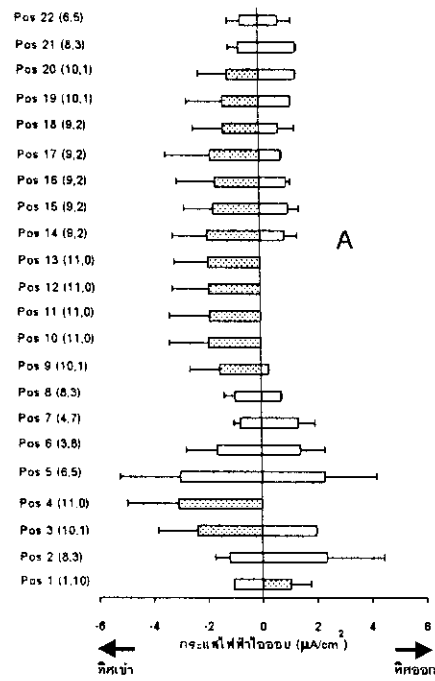
ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 16 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 4.50 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียว จากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิสนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง				ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-1.06	nc	1.05	0.72	-0.52	0.13	0.93	0.60	-0.80	0.20	0.64	0.38	-0.68	0.33	0.68	0.40
2	0.5	-1.22	0.52	2.38	2.07	-0.75	0.34	0.58	0.32	-0.85	0.53	1.12	1.09	-1.00	0.83	1.19	0.88
3	1.0	2.38	1.46	2.01	nc	-1.43	0.69	0.44	nc	-1.62	1.04	n	nc	-1.72	0.98	0.96	nc
4	1.5	-3.06	1.88	n	nc	-2.62	1.79	2.81	2.19	-2.88	1.79	n	nc	-2.31	1.47	1.55	nc
5	2.0	-2.99	2.23	2.33	1.87	-1.34	1.50	1.93	0.54	-2.47	1.65	2.98	1.40	-2.17	1.80	1.44	0.84
6	2.5	-1.65	1.13	1.44	0.87	-1.34	0.73	2.24	1.33	-1.87	1.17	1.89	0.79	-1.52	1.46	1.05	0.70
7	3.0	-0.79	0.24	1.37	0.59	-1.46	0.44	1.09	0.90	-1.40	0.54	1.94	1.26	-0.94	0.63	1.37	1.29
8	3.5	-0.97	0.42	0.74	0.00	-0.88	0.56	0.24	0.06	-1.31	0.67	0.81	0.36	-0.78	0.47	0.91	0.92
9	4.0	-1.52	1.11	0.28	nc	-0.90	0.57	0.84	m	-0.89	0.56	0.40	0.09	-0.64	0.33	0.48	0.23
10	4.5	-1.94	1.41	n	nc	-0.81	0.43	1.28	m	-0.86	0.39	0.39	0.40	-0.63	0.43	0.38	0.17
11	5.0	-1.87	1.48	n	nc	-1.12	0.76	0.67	0.40	-1.09	0.49	0.39	0.23	-0.60	0.47	0.38	0.10
12	5.5	-1.91	1.32	n	nc	-0.99	0.56	0.67	0.27	-1.00	0.44	0.62	0.17	-0.58	0.48	0.42	0.14
13	6.0	-1.92	1.24	n	nc	-1.14	0.50	0.64	0.23	-0.90	0.31	0.79	0.14	-0.69	0.43	0.55	0.18
14	6.5	-1.95	1.26	0.89	0.47	-1.13	0.70	1.08	0.51	-0.99	0.27	1.10	0.39	-0.58	0.22	0.57	0.25
15	7.0	-1.73	1.06	1.05	0.37	-0.92	0.47	1.16	0.37	-0.77	0.24	1.27	0.76	-0.39	0.16	0.57	0.38
16	7.5	-1.63	1.42	0.97	0.15	-0.85	0.58	1.55	0.24	-0.66	0.27	1.05	0.81	-0.58	0.05	0.57	0.49
17	8.0	-1.80	1.66	0.81	0.01	-1.16	1.16	1.21	0.45	-1.26	1.22	0.92	0.51	-0.51	0.33	0.62	0.53
18	8.5	-1.33	-1.33	0.72	0.56	-1.30	1.18	1.02	0.64	-0.94	0.71	0.89	0.41	-0.58	0.33	0.65	0.48
19	9.0	-1.33	1.33	1.16	nc	-1.31	1.13	1.01	0.68	-1.39	0.81	0.45	0.42	-0.74	0.67	0.66	0.44
20	9.5	-1.16	1.05	1.36	nc	-1.03	0.62	1.08	0.83	-0.76	0.45	0.52	0.48	-0.37	0.21	0.94	0.57
21	10.0	-0.74	0.39	1.35	0.04	-0.77	0.25	1.03	0.67	-0.56	0.03	0.56	0.37	-0.12	0.05	0.49	0.41
22	10.5	-0.67	0.48	0.74	0.44	-0.57	0.34	0.82	0.29	-0.52	0.01	0.47	0.27	-0.27	0.18	0.45	0.33



ภาพประกอบ 42 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) ชั่วโมงที่ 1

(B) ชั่วโมงที่ 2

(C) ชั่วโมงที่ 3

(D) ชั่วโมงที่ 4

### 3.5 ผลของสารพิษต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน

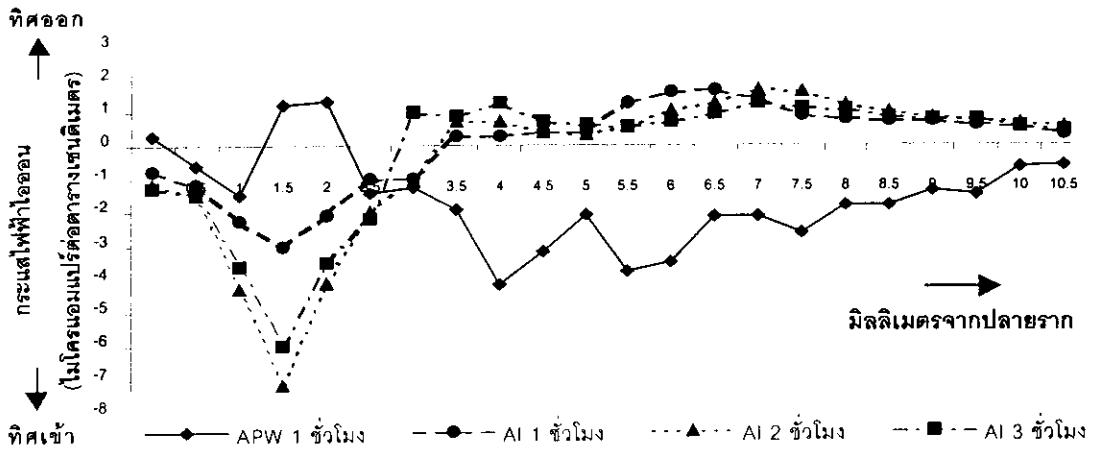
งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอลูมิเนียม แคดเมียมและอาร์ซีนิก ที่มีต่อการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน และรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวัน โดยวัดอัตรายี่สิบของรากทานตะวัน และกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะที่มีสารพิษ

#### 3.5.1 ผลของอลูมิเนียม

ในการศึกษาผลของอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) วัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 4.50 ที่ไม่มีอลูมิเนียม จากนั้นเปลี่ยนสารละลาย APW เป็นสารละลายอลูมิเนียม ความเข้มข้น 1, 10 หรือ 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 จำนวนรากที่ทดลองกับอลูมิเนียม ความเข้มข้น 1, 10 และ 100 ไมโครโมลาร์ เป็น 11, 20 และ 20 รากตามลำดับ

##### 3.5.1.1 อลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์

เมื่อพิจารณาผลของอลูมิเนียมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่มีต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน พบว่าในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวกระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่อาณาเขตเซลล์ยึดตัวกระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลง (ภาพประกอบ 43) เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละรากมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงของขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนหลังจากได้รับอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ พบว่า รากทานตะวัน 1 จากทั้งหมด 11 ราก ขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และ 3 จากทั้งหมด 11 ราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งในช่วงเวลาที่ 1, 2 และ 3 (ตาราง 17)



ภาพประกอบ 43 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทันทันวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอุณหภูมิความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

ตาราง 17 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอุณหภูมิความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอุณหภูมิความเข้มข้น 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอุณหภูมิความเข้มข้น 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอุณหภูมิความเข้มข้น 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.560	ไม่มีความแตกต่าง	2.696	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	3.074	Non AI < AI 3 Hr <sup>c</sup>
2	3.822	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	1.550	ไม่มีความแตกต่าง	0.819	ไม่มีความแตกต่าง
3	-0.238	ไม่มีความแตกต่าง	0.420	ไม่มีความแตกต่าง	0.480	ไม่มีความแตกต่าง
4	-0.193	ไม่มีความแตกต่าง	-1.909	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-1.464	ไม่มีความแตกต่าง
5	-0.642	ไม่มีความแตกต่าง	-0.763	ไม่มีความแตกต่าง	-1.250	ไม่มีความแตกต่าง
6	0.343	ไม่มีความแตกต่าง	1.258	ไม่มีความแตกต่าง	0.330	ไม่มีความแตกต่าง
7	-5.028	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-4.250	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-2.804	Non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
8	0.208	ไม่มีความแตกต่าง	0.343	ไม่มีความแตกต่าง	-0.774	ไม่มีความแตกต่าง
9	-2.741	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-0.593	ไม่มีความแตกต่าง	-0.997	ไม่มีความแตกต่าง
10	-1.818	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.950	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-2.492	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
11	0.011	ไม่มีความแตกต่าง	-2.016	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-1.925	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 18) พบว่า ตำแหน่งที่ 1-4 หรือระยะ 0.0-2.0 มิลลิเมตรจากปลายรากซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และที่ตำแหน่ง 10-15 หรือระยะ 4.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายรากซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตาราง 18 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงมีจำนวนมากกว่าตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวน่าจะเป็นคำอธิบายว่าทำไมเมื่อพิจารณารวมทั้งรากแต่ละราก (ตาราง 17) จึงพบว่า รากทานตะวันที่ขนาดกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงมีจำนวนเพียง 3, 4 และ 3 รากจากทั้งหมด 11 รากในช่วงเวลาที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ แต่พบว่า กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นเพียงรากเดียว

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนจากทุกรากมาหาค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง และทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 19 และ ภาพประกอบ 44) พบว่าหลังจากรากทานตะวันได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตำแหน่งที่ 1-4 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากอย่างมีนัยสำคัญ (ภาพประกอบ 44B) ส่วนตำแหน่งอื่นๆ ไม่สามารถระบุทิศอย่างมีนัยสำคัญได้ ยกเว้นตำแหน่งที่ 21 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยแตกต่างจากรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนเมื่อรากทานตะวันอยู่ในสารละลาย APW pH 4.50 (ภาพประกอบ 44A) ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าที่ตำแหน่ง 7-17 และ 20-22 แต่หลังจากได้รับอลูมิเนียมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 44C) ตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าเข้ามีจำนวนเพิ่มขึ้น คือมีทิศเข้าที่ตำแหน่ง 1-5 และบริเวณอาณาเขตขนรากตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าออกก็มีจำนวนเพิ่มขึ้น คือมีทิศออกที่ตำแหน่ง 16-21 และพบลักษณะดังกล่าวเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่ 3 ด้วยเช่นกัน (ภาพประกอบ 44D) เมื่อพิจารณาเฉพาะทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนในช่วงเวลาที่ 3 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนที่พบในสารละลาย APW pH 6.00

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของรากใน pH 4.50 (ภาพประกอบ 42) กล่าวคือ ขนาดกระแสไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และกระแสไฟฟ้าในช่วงเซลล์ยึดตัวจะเปลี่ยนทิศจากเข้าเป็นออก ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุได้ว่าอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) 1 ไมโครโมลาร์นี้มีผลกับกระแสไฟฟ้าไอออนหรือไม่

ตาราง 18 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	2.723	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	3.204	non AI < AI 2 Hr <sup>c</sup>	-1.244	ไม่มีความแตกต่าง
2	2.248	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	1.516	ไม่มีความแตกต่าง	-0.614	ไม่มีความแตกต่าง
3	2.489	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	3.208	non AI < AI 2 Hr <sup>c</sup>	0.565	ไม่มีความแตกต่าง
4	1.743	ไม่มีความแตกต่าง	2.247	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	0.585	ไม่มีความแตกต่าง
5	1.505	ไม่มีความแตกต่าง	1.642	ไม่มีความแตกต่าง	0.025	ไม่มีความแตกต่าง
6	-0.751	ไม่มีความแตกต่าง	-1.153	ไม่มีความแตกต่าง	-0.041	ไม่มีความแตกต่าง
7	-0.698	ไม่มีความแตกต่าง	-0.523	ไม่มีความแตกต่าง	-0.534	ไม่มีความแตกต่าง
8	-0.802	ไม่มีความแตกต่าง	-0.499	ไม่มีความแตกต่าง	0.200	ไม่มีความแตกต่าง
9	-1.491	ไม่มีความแตกต่าง	-1.022	ไม่มีความแตกต่าง	0.219	ไม่มีความแตกต่าง
10	-1.874	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-1.560	ไม่มีความแตกต่าง	0.627	ไม่มีความแตกต่าง
11	-2.075	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.372	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	0.222	ไม่มีความแตกต่าง
12	-3.144	non AI > AI 1 Hr <sup>b</sup>	-3.267	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-0.894	ไม่มีความแตกต่าง
13	-3.563	non AI > AI 1 Hr <sup>c</sup>	-4.307	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-2.340	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
14	-2.060	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-3.375	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-1.981	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
15	-1.985	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-3.056	non AI > AI 2 Hr <sup>b</sup>	-1.875	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
16	-1.109	ไม่มีความแตกต่าง	-1.748	ไม่มีความแตกต่าง	-1.835	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
17	0.145	ไม่มีความแตกต่าง	-0.836	ไม่มีความแตกต่าง	-1.998	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
18	0.078	ไม่มีความแตกต่าง	-0.651	ไม่มีความแตกต่าง	-2.535	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
19	1.227	ไม่มีความแตกต่าง	0.345	ไม่มีความแตกต่าง	-2.091	Non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
20	0.866	ไม่มีความแตกต่าง	0.805	ไม่มีความแตกต่าง	-0.540	ไม่มีความแตกต่าง
21	1.120	ไม่มีความแตกต่าง	1.452	ไม่มีความแตกต่าง	-0.227	ไม่มีความแตกต่าง
22	0.317	ไม่มีความแตกต่าง	0.292	ไม่มีความแตกต่าง	-0.576	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว

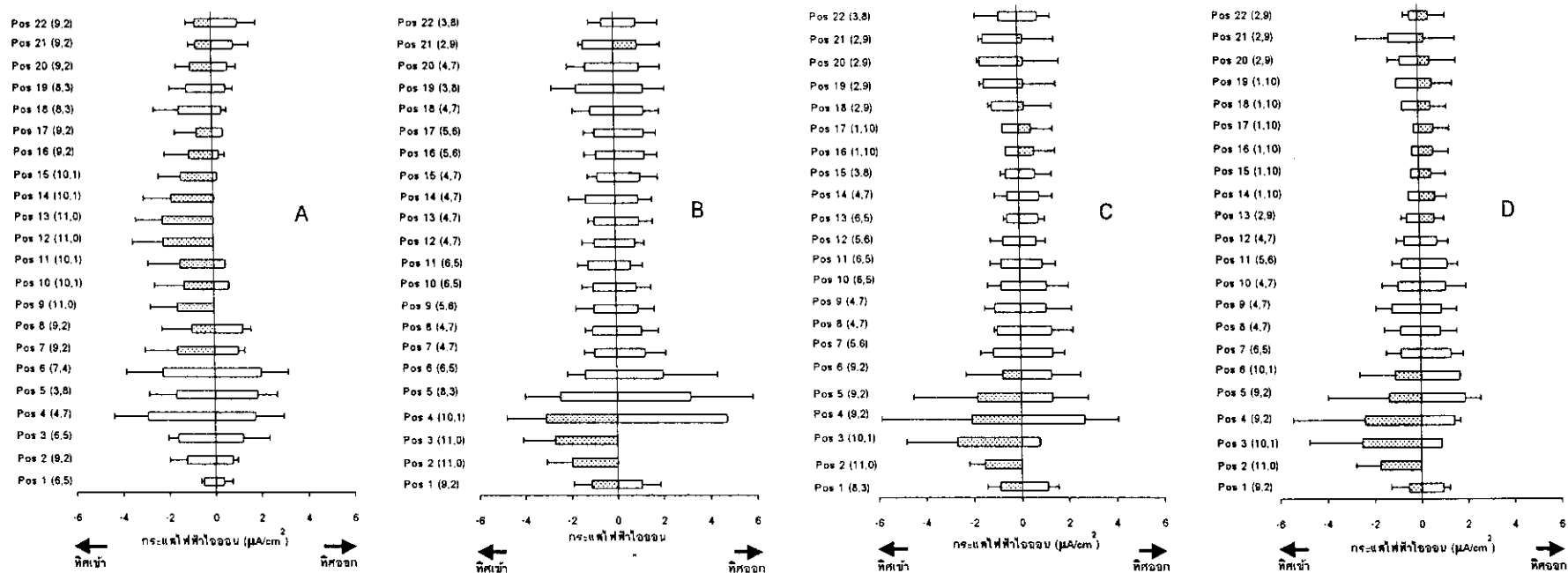


ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตชนราก

ตาราง 19 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทวนตะวันใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทศนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสน้ำน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.50	0.12	0.39	0.33	-1.13	0.80	1.05	0.79	-0.89	0.55	1.10	0.44	-0.54	0.75	0.97	0.24
2	0.5	-1.24	0.73	0.76	0.20	-1.96	1.13	n	nc	-1.54	0.65	n	nc	-1.74	1.03	n	nc
3	1.0	-1.60	0.42	1.25	1.11	-2.70	1.37	n	nc	-2.69	2.11	0.79	nc	-2.52	2.20	0.88	nc
4	1.5	-2.91	1.46	1.77	1.21	-3.11	1.70	4.75	nc	-2.07	3.80	2.68	1.39	-2.41	3.03	1.43	0.26
5	2.0	-1.66	1.18	1.88	0.82	-2.45	1.52	3.20	2.62	-1.82	2.68	1.36	1.47	-1.38	2.58	1.90	0.64
6	2.5	-2.26	1.56	2.04	1.14	-1.38	0.75	2.03	2.29	-0.75	1.55	1.29	1.23	-1.10	1.51	1.67	nc
7	3.0	-1.60	1.40	1.04	0.27	-0.97	0.42	1.25	0.87	-1.13	0.55	1.37	0.48	-0.85	0.61	1.30	0.51
8	3.5	-0.97	1.29	1.26	0.32	-1.03	0.33	1.10	0.73	-0.96	0.14	1.33	0.87	-0.85	0.70	0.88	0.66
9	4.0	-1.57	1.19	n	nc	-0.95	0.79	0.97	0.69	-1.05	0.45	1.12	1.03	-1.20	0.71	0.91	0.62
10	4.5	-1.28	1.28	0.68	nc	-0.97	0.51	0.89	0.62	-0.78	0.57	1.14	0.90	-0.95	0.65	1.11	0.85
11	5.0	-1.47	1.37	0.53	nc	-1.20	0.44	0.68	0.48	-0.78	0.45	0.96	0.53	-0.78	0.39	1.19	0.43
12	5.5	-2.16	1.34	n	nc	-0.91	0.53	0.86	0.38	-0.68	0.53	0.72	0.36	-0.67	0.32	0.76	0.44
13	6.0	-2.20	1.15	n	nc	-0.90	0.27	1.03	0.57	-0.51	0.14	0.83	0.23	-0.54	0.23	0.65	0.38
14	6.5	-1.79	1.20	0.07	nc	-1.27	0.73	1.01	0.57	-0.48	0.52	0.87	0.52	-0.45	nc	0.69	0.46
15	7.0	-1.39	0.97	0.22	nc	-0.75	0.42	1.09	0.75	-0.53	0.22	0.71	0.66	-0.32	nc	0.54	0.59
16	7.5	-1.01	1.05	0.32	0.22	-0.81	0.50	1.31	0.53	-0.53	nc	0.68	0.85	-0.26	nc	0.63	0.65
17	8.0	-0.67	0.95	0.47	0.00	-0.85	0.47	1.28	0.52	-0.65	nc	0.56	0.88	-0.19	nc	0.67	0.63
18	8.5	-1.44	1.09	0.43	0.19	-1.03	0.76	1.29	0.65	-1.09	0.14	0.27	1.13	-0.67	nc	0.54	0.68
19	9.0	-1.10	0.73	0.63	0.29	-1.65	1.05	1.27	0.92	-1.42	0.18	0.26	1.34	-0.91	nc	0.61	0.84
20	9.5	-0.92	0.62	0.72	0.34	-1.22	0.81	1.11	0.88	-1.59	0.08	0.24	1.48	-0.75	0.53	0.51	1.11
21	10.0	-0.67	0.33	0.97	0.66	-1.32	0.19	1.02	0.99	-1.45	0.15	0.23	1.28	-1.23	1.35	0.30	1.29
22	10.5	-0.69	0.40	1.16	0.80	-0.51	0.58	0.99	0.94	-0.77	0.99	0.87	0.50	-0.32	0.27	0.49	0.69





ภาพประกอบ 44 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 (A) และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง

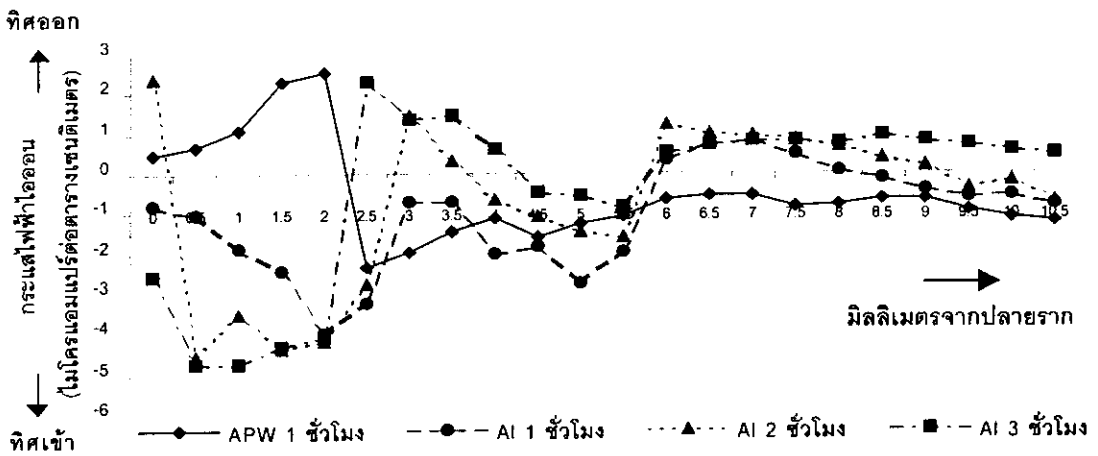
(B) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง

(C) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง

(D) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

### 3.5.1.2 อลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์

เมื่อพิจารณาผลของอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวมีขนาดเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนทิศจากทิศออกรากเป็นทิศเข้าสู่รากดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

เมื่อนำขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละรากมาทดสอบทางสถิติ (ตาราง 20) พบว่า ในรากทานตะวัน 5 จาก 20 ราก กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่ชั่วโมงแรกที่ได้รับอลูมิเนียม และให้ผลชัดเจนขึ้นในชั่วโมงที่ 2 และ 3 คือกระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 9 ราก แต่ในขณะเดียวกัน มีรากทานตะวัน 2 รากที่กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับอลูมิเนียมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 21) พบว่าตำแหน่งที่ 2-4 หรือระยะ 0.5-2.0 มิลลิเมตรจากรากปลายราก กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 1 (ค่า t เป็นบวก) และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 2 และ 3 หลังจากได้รับอลูมิเนียม และตำแหน่งที่ 6-22 ขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง (ค่า t เป็นลบ) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 (ตาราง 21A) และตำแหน่งที่ขนาดกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเพิ่มจำนวนมากขึ้นในชั่วโมงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้ง 20 รากมาหาค่าเฉลี่ยขนาดกระแสไฟฟ้าและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 22 และภาพประกอบ 46) พบว่า

ในขณะที่รากทานตะวันอยู่ในสารละลาย APW pH 4.50 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญที่ตำแหน่ง 1, 3-5 และ 22 และมีทิศเข้าอย่างมีนัยสำคัญที่ตำแหน่ง 11-15 (ภาพประกอบ 46A) หลังจากรากทานตะวันได้รับอนุมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 46B) ที่ตำแหน่ง 2-4 กระแสไฟฟ้าไอออนเปลี่ยนจากทิศออกจากรากเป็นทิศเข้าสู่รากเช่นเดียวกับที่ตำแหน่ง 10-12 นอกจากนี้ตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าทิศเข้าบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนรากมีจำนวนลดลงในชั่วโมงที่ 2 (ภาพประกอบ 46C) และเปลี่ยนเป็นทิศออกจากรากในชั่วโมงที่ 3 (ภาพประกอบ 46D)

ตาราง 20 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-0.866	ไม่มีความแตกต่าง	-3.211	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	1.227	ไม่มีความแตกต่าง
2	-1.608	ไม่มีความแตกต่าง	-1.868	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-0.550	ไม่มีความแตกต่าง
3	1.005	ไม่มีความแตกต่าง	1.569	ไม่มีความแตกต่าง	-0.413	ไม่มีความแตกต่าง
4	-1.918	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.404	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.766	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
5	-0.001	ไม่มีความแตกต่าง	-0.402	ไม่มีความแตกต่าง	-0.071	ไม่มีความแตกต่าง
6	0.417	ไม่มีความแตกต่าง	-2.816	non AI > AI 2 Hr <sup>b</sup>	-0.771	ไม่มีความแตกต่าง
7	1.465	ไม่มีความแตกต่าง	4.251	non AI < AI 2 Hr <sup>d</sup>	-0.065	ไม่มีความแตกต่าง
8	0.808	ไม่มีความแตกต่าง	1.092	ไม่มีความแตกต่าง	0.990	ไม่มีความแตกต่าง
9	0.411	ไม่มีความแตกต่าง	-0.402	ไม่มีความแตกต่าง	0.473	ไม่มีความแตกต่าง
10	0.880	ไม่มีความแตกต่าง	1.509	ไม่มีความแตกต่าง	2.894	non AI < AI 3 Hr <sup>c</sup>
11	1.305	ไม่มีความแตกต่าง	2.205	non AI < AI 2 Hr <sup>b</sup>	1.146	ไม่มีความแตกต่าง
12	-3.418	non AI > AI 1 Hr <sup>c</sup>	-3.644	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-2.433	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
13	0.850	ไม่มีความแตกต่าง	-0.872	ไม่มีความแตกต่าง	-3.079	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
14	-2.776	non AI > AI 1 Hr <sup>b</sup>	-2.745	non AI > AI 2 Hr <sup>b</sup>	-2.276	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
15	-0.343	ไม่มีความแตกต่าง	0.275	ไม่มีความแตกต่าง	-5.136	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
16	0.812	ไม่มีความแตกต่าง	-4.601	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-0.973	ไม่มีความแตกต่าง
17	-5.492	non AI > AI 1 Hr <sup>d</sup>	-2.004	non AI > AI 2 Hr <sup>b</sup>	-2.935	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
18	1.832	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-1.152	ไม่มีความแตกต่าง	-2.066	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
19	-0.400	ไม่มีความแตกต่าง	-1.184	ไม่มีความแตกต่าง	-2.268	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
20	0.619	ไม่มีความแตกต่าง	1.459	ไม่มีความแตกต่าง	1.357	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 21 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.427	ไม่มีความแตกต่าง	1.514	ไม่มีความแตกต่าง	1.601	ไม่มีความแตกต่าง
2	1.369	ไม่มีความแตกต่าง	2.181	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	2.485	non AI < AI 3 Hr <sup>a</sup>
3	1.683	ไม่มีความแตกต่าง	2.677	non AI < AI 2 Hr <sup>b</sup>	3.294	non AI < AI 3 Hr <sup>c</sup>
4	1.789	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	3.013	non AI < AI 2 Hr <sup>c</sup>	2.680	non AI < AI 3 Hr <sup>b</sup>
5	1.178	ไม่มีความแตกต่าง	0.978	ไม่มีความแตกต่าง	-0.389	ไม่มีความแตกต่าง
6	-0.618	ไม่มีความแตกต่าง	-1.715	ไม่มีความแตกต่าง	-3.292	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
7	-0.751	ไม่มีความแตกต่าง	-2.155	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.463	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
8	-0.152	ไม่มีความแตกต่าง	-1.607	ไม่มีความแตกต่าง	-0.483	ไม่มีความแตกต่าง
9	-0.436	ไม่มีความแตกต่าง	-2.148	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.328	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
10	-0.065	ไม่มีความแตกต่าง	-1.552	ไม่มีความแตกต่าง	-1.763	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
11	0.498	ไม่มีความแตกต่าง	-1.351	ไม่มีความแตกต่าง	-2.317	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
12	-0.799	ไม่มีความแตกต่าง	-0.943	ไม่มีความแตกต่าง	-1.958	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
13	-2.383	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.078	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-1.814	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
14	-3.449	non AI > AI 1 Hr <sup>c</sup>	-3.733	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.776	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
15	-2.469	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-3.484	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-1.490	ไม่มีความแตกต่าง
16	-2.604	non AI > AI 1 Hr <sup>b</sup>	-3.013	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-2.675	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
17	-1.263	ไม่มีความแตกต่าง	-3.345	non AI > AI 2 Hr <sup>c</sup>	-3.214	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
18	-1.231	ไม่มีความแตกต่าง	-2.518	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-1.895	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
19	-1.409	ไม่มีความแตกต่าง	-2.018	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.259	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
20	-0.452	ไม่มีความแตกต่าง	-1.880	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.156	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
21	-0.984	ไม่มีความแตกต่าง	-2.061	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.343	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
22	-0.961	ไม่มีความแตกต่าง	-1.541	ไม่มีความแตกต่าง	-2.744	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



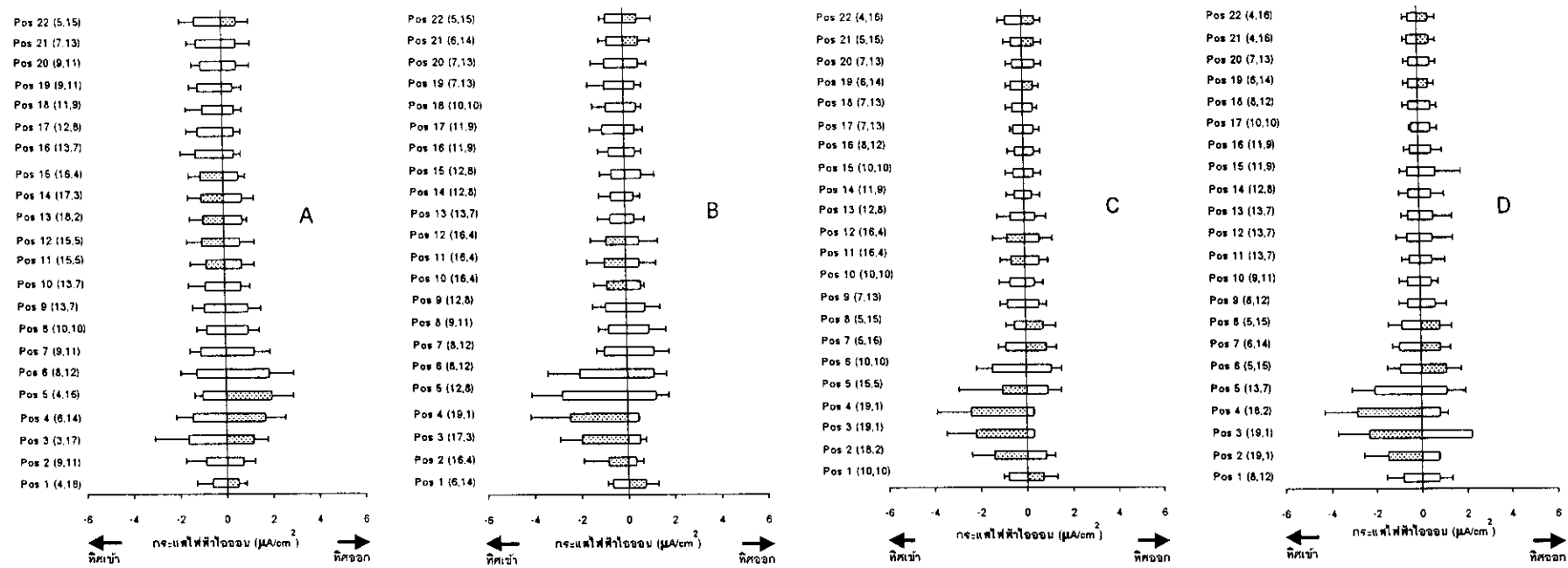
ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 22 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.62	0.68	0.53	0.30	-0.65	0.25	0.75	0.55	-0.79	0.22	0.72	0.57	-0.83	0.72	0.77	0.55
2	0.5	-0.90	0.87	0.75	0.48	0.85	1.04	0.38	0.28	1.42	0.96	0.86	0.37	1.49	1.07	0.79	nc
3	1.0	-1.65	1.44	1.21	0.57	1.94	0.95	0.54	0.26	2.18	1.29	0.34	nc	2.32	1.37	2.22	nc
4	1.5	-1.44	0.71	1.71	0.85	2.43	1.69	0.50	nc	2.40	1.47	0.34	nc	2.85	1.41	0.84	0.31
5	2.0	-1.01	0.34	2.01	0.89	2.78	1.31	1.25	0.53	1.06	1.85	0.96	0.55	2.05	1.01	1.13	0.80
6	2.5	-1.25	0.68	1.90	1.03	2.01	1.37	1.18	0.49	1.46	0.71	1.10	0.45	-0.93	0.56	1.13	0.62
7	3.0	-1.08	0.46	1.25	0.68	-0.95	0.34	1.17	0.63	-0.87	0.33	0.90	0.42	-0.97	0.29	0.86	0.40
8	3.5	-0.79	0.43	1.02	0.46	-0.77	0.42	0.98	0.71	-0.49	0.38	0.77	0.53	-0.82	0.61	0.87	0.48
9	4.0	-0.88	0.52	1.00	0.54	-0.89	0.55	0.81	0.64	-0.77	0.33	0.61	0.33	-0.57	0.39	0.67	0.46
10	4.5	-0.84	0.73	0.71	0.40	0.82	0.55	0.64	0.15	-0.66	0.46	0.44	0.34	-0.57	0.35	0.49	0.29
11	5.0	-0.79	0.69	0.77	0.52	0.91	0.75	0.59	0.71	0.58	0.47	0.66	0.34	-0.45	0.36	0.55	0.52
12	5.5	-0.97	0.64	0.69	0.62	0.85	0.65	0.58	0.81	0.74	0.63	0.68	0.52	-0.57	0.46	0.57	0.87
13	6.0	-0.88	0.58	0.81	0.18	-0.65	0.53	0.39	0.41	-0.61	0.56	0.49	0.45	-0.52	0.28	0.62	0.81
14	6.5	-0.97	0.57	0.82	0.48	-0.59	0.51	0.39	0.26	-0.40	0.35	0.37	0.33	-0.50	0.37	0.54	0.53
15	7.0	-0.99	0.51	0.67	0.27	-0.58	0.48	0.74	0.52	-0.44	0.35	0.45	0.29	-0.50	0.33	0.74	1.09
16	7.5	-1.18	0.63	0.49	0.27	-0.67	0.46	0.48	0.27	-0.36	0.32	0.48	0.23	-0.38	0.25	0.56	0.45
17	8.0	-1.09	0.49	0.51	0.27	-0.94	0.52	0.47	0.33	-0.43	0.14	0.47	0.24	-0.31	0.11	0.54	0.26
18	8.5	-0.87	0.69	0.52	0.31	-0.76	0.59	0.55	0.21	-0.46	0.27	0.46	0.17	-0.41	0.29	0.55	0.25
19	9.0	-1.06	0.37	0.48	0.37	-0.81	0.73	0.50	0.26	-0.50	0.23	0.49	0.21	-0.42	0.21	0.48	0.24
20	9.5	-0.91	0.39	0.65	0.56	-0.81	0.56	0.66	0.35	-0.44	0.27	0.56	0.26	-0.39	0.21	0.55	0.24
21	10.0	-1.08	0.43	0.66	0.57	-0.70	0.33	0.69	0.45	-0.47	0.32	0.56	0.29	-0.44	0.20	0.53	0.26
22	10.5	-1.15	0.64	0.66	0.53	-0.73	0.26	0.66	0.56	-0.69	0.32	0.57	0.25	-0.39	0.24	0.50	0.28



ภาพประกอบ 46 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกภาชนะตะวันด้านโกลด์ตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 (A) และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง

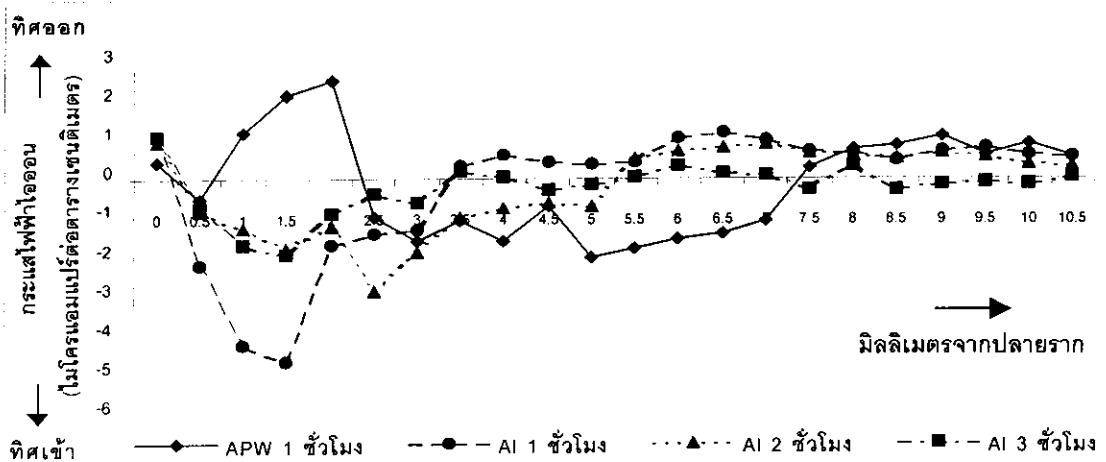
(B) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง

(C) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง

(D) หลังจากได้รับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

### 3.5.1.3 อลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์

เมื่อพิจารณาผลของอลูมิเนียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ พบว่าที่ปลายรากในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนมีการเปลี่ยนแปลง และในบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัว ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนลดลงอย่างชัดเจน ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละรากมาทดสอบทางสถิติ (ตาราง 23) พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าในรากทานตะวันที่ได้รับอลูมิเนียมมีทั้งขนาดลดลงและเพิ่มขึ้น โดยในชั่วโมงที่ 1, 2 และ 3 กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงใน 5, 7 และ 8 รากตามลำดับ จากทั้งหมด 20 ราก และกระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นใน 5, 3 และ 1 ราก หลังจากได้อลูมิเนียม 1, 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้ง 20 รากมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขนาดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 24) พบว่าตำแหน่งที่ 1-2 หรือระยะ 0.0-1.0 มิลลิเมตรจากปลายราก ขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่า t เป็นบวก) ในชั่วโมงที่ 1 และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 3 ส่วนที่ตำแหน่ง 3-4 หรือระยะ 1.0-2.0 มิลลิเมตรจากปลายราก ในชั่วโมงที่ 1 กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ 1 ตำแหน่ง (ตาราง 24A) และมีแนวโน้มลดลงในชั่วโมงที่ 2 และลดลงอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 3 ที่



ตำแหน่ง 5-11 หรือระยะ 2.5-5.0 มิลลิเมตรจากปลายราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ที่ตำแหน่ง 12-16 กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยในบางตำแหน่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 และแสดงผลชัดเจนขึ้นในชั่วโมงที่ 2 และ 3 เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 17-22

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 25 และภาพประกอบ 48) จะเห็นว่า ในชั่วโมงแรกที่รากทานตะวันได้รับอนุมินิยม กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากบริเวณตำแหน่งที่ 2-8 และมีทิศออกจากรากบริเวณตำแหน่งที่ 9-19 และ 21-22 อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพประกอบ 48B) ส่วนตำแหน่งที่เหลือไม่สามารถบอกทิศของกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญได้ ซึ่งแตกต่างกับรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 4.50 ขณะที่ไม่มีอนุมินิยมอย่างชัดเจน (ภาพประกอบ 48A) ในทำนองเดียวกัน ทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนในชั่วโมงที่ 2 และ 3 มีลักษณะคล้ายกับในชั่วโมงที่ 1 ยกเว้นตำแหน่งที่ 1 และเมื่อพิจารณาโดยรวมจะเห็นว่า รากทานตะวันเมื่อได้รับอนุมินิยม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนมีลักษณะคล้ายกับทิศของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW สภาวะปกติ pH 6.00 (ภาพประกอบ 40) นั่นคือมีทิศเข้าบริเวณปลายรากและมีทิศออกในบริเวณถัดขึ้นมาแต่แตกต่างกันที่จำนวนตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้าแสดงทิศเข้าสู่รากมีจำนวนมากกว่าและกระแสไฟฟ้ามีขนาดน้อยกว่า

ตาราง 23 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอนุมูลิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอนุมูลิเนียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอนุมูลิเนียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอนุมูลิเนียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	0.912	ไม่มีความแตกต่าง	1.462	ไม่มีความแตกต่าง	1.400	ไม่มีความแตกต่าง
2	0.237	ไม่มีความแตกต่าง	1.490	ไม่มีความแตกต่าง	1.172	ไม่มีความแตกต่าง
3	1.023	ไม่มีความแตกต่าง	1.127	ไม่มีความแตกต่าง	0.540	ไม่มีความแตกต่าง
4	2.712	non AI < AI 1 Hr <sup>b</sup>	1.421	ไม่มีความแตกต่าง	-1.150	ไม่มีความแตกต่าง
5	-0.619	ไม่มีความแตกต่าง	-1.217	ไม่มีความแตกต่าง	-1.025	ไม่มีความแตกต่าง
6	2.908	non AI < AI 1 Hr <sup>c</sup>	0.185	ไม่มีความแตกต่าง	0.012	ไม่มีความแตกต่าง
7	-2.353	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-1.117	ไม่มีความแตกต่าง	-1.529	ไม่มีความแตกต่าง
8	-3.844	non AI > AI 1 Hr <sup>d</sup>	-4.298	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-2.933	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
9	-2.799	non AI > AI 1 Hr <sup>b</sup>	-2.383	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-3.889	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
10	-1.757	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-3.840	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-3.146	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
11	2.898	non AI < AI 1 Hr <sup>c</sup>	-0.215	ไม่มีความแตกต่าง	-2.232	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
12	-0.076	ไม่มีความแตกต่าง	-1.120	ไม่มีความแตกต่าง	-0.481	ไม่มีความแตกต่าง
13	-2.423	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.468	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-2.911	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
14	-0.445	ไม่มีความแตกต่าง	-2.090	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-4.990	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
15	2.693	non AI < AI 1 Hr <sup>b</sup>	1.797	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	1.455	ไม่มีความแตกต่าง
16	3.555	non AI < AI 1 Hr <sup>d</sup>	2.822	non AI < AI 2 Hr <sup>d</sup>	2.114	non AI < AI 3 Hr <sup>a</sup>
17	-0.485	ไม่มีความแตกต่าง	-2.617	non AI > AI 2 Hr <sup>b</sup>	-3.907	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
18	-1.400	ไม่มีความแตกต่าง	-5.336	non AI > AI 2 Hr <sup>d</sup>	-4.209	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
19	1.260	ไม่มีความแตกต่าง	1.747	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	-0.057	ไม่มีความแตกต่าง
20	1.536	ไม่มีความแตกต่าง	1.246	ไม่มีความแตกต่าง	0.276	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 24 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ AI 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	0.547	ไม่มีความแตกต่าง	2.150	non AI < AI 2 Hr <sup>a</sup>	2.435	non AI < AI 3 Hr <sup>a</sup>
2	1.510	ไม่มีความแตกต่าง	1.516	ไม่มีความแตกต่าง	2.242	non AI < AI 3 Hr <sup>a</sup>
3	2.129	non AI < AI 1 Hr <sup>a</sup>	-1.476	ไม่มีความแตกต่าง	-1.881	non AI > AI 3 Hr <sup>a</sup>
4	0.151	ไม่มีความแตกต่าง	-2.504	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-3.112	non AI > AI 3 Hr <sup>c</sup>
5	-0.374	ไม่มีความแตกต่าง	-0.962	ไม่มีความแตกต่าง	-1.567	ไม่มีความแตกต่าง
6	0.178	ไม่มีความแตกต่าง	-0.022	ไม่มีความแตกต่าง	-0.882	ไม่มีความแตกต่าง
7	1.134	ไม่มีความแตกต่าง	1.518	ไม่มีความแตกต่าง	0.184	ไม่มีความแตกต่าง
8	0.779	ไม่มีความแตกต่าง	1.179	ไม่มีความแตกต่าง	0.525	ไม่มีความแตกต่าง
9	0.757	ไม่มีความแตกต่าง	0.830	ไม่มีความแตกต่าง	0.829	ไม่มีความแตกต่าง
10	1.237	ไม่มีความแตกต่าง	1.471	ไม่มีความแตกต่าง	1.656	ไม่มีความแตกต่าง
11	0.253	ไม่มีความแตกต่าง	0.996	ไม่มีความแตกต่าง	0.039	ไม่มีความแตกต่าง
12	-1.849	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.192	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-3.628	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
13	-1.930	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-1.692	ไม่มีความแตกต่าง	-3.613	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
14	-1.790	non AI > AI 1 Hr <sup>a</sup>	-2.387	non AI > AI 2 Hr <sup>a</sup>	-3.735	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
15	-0.960	ไม่มีความแตกต่าง	-1.587	ไม่มีความแตกต่าง	-3.823	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
16	-1.229	ไม่มีความแตกต่าง	-1.507	ไม่มีความแตกต่าง	-4.215	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
17	-0.895	ไม่มีความแตกต่าง	-1.344	ไม่มีความแตกต่าง	-4.423	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
18	-0.927	ไม่มีความแตกต่าง	-1.304	ไม่มีความแตกต่าง	-3.887	non AI > AI 3 Hr <sup>d</sup>
19	-0.386	ไม่มีความแตกต่าง	-1.227	ไม่มีความแตกต่าง	-2.644	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
20	-0.346	ไม่มีความแตกต่าง	-1.159	ไม่มีความแตกต่าง	-2.042	non AI > AI 3 Hr <sup>b</sup>
21	0.117	ไม่มีความแตกต่าง	-0.746	ไม่มีความแตกต่าง	-1.532	ไม่มีความแตกต่าง
22	1.022	ไม่มีความแตกต่าง	0.546	ไม่มีความแตกต่าง	-0.604	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



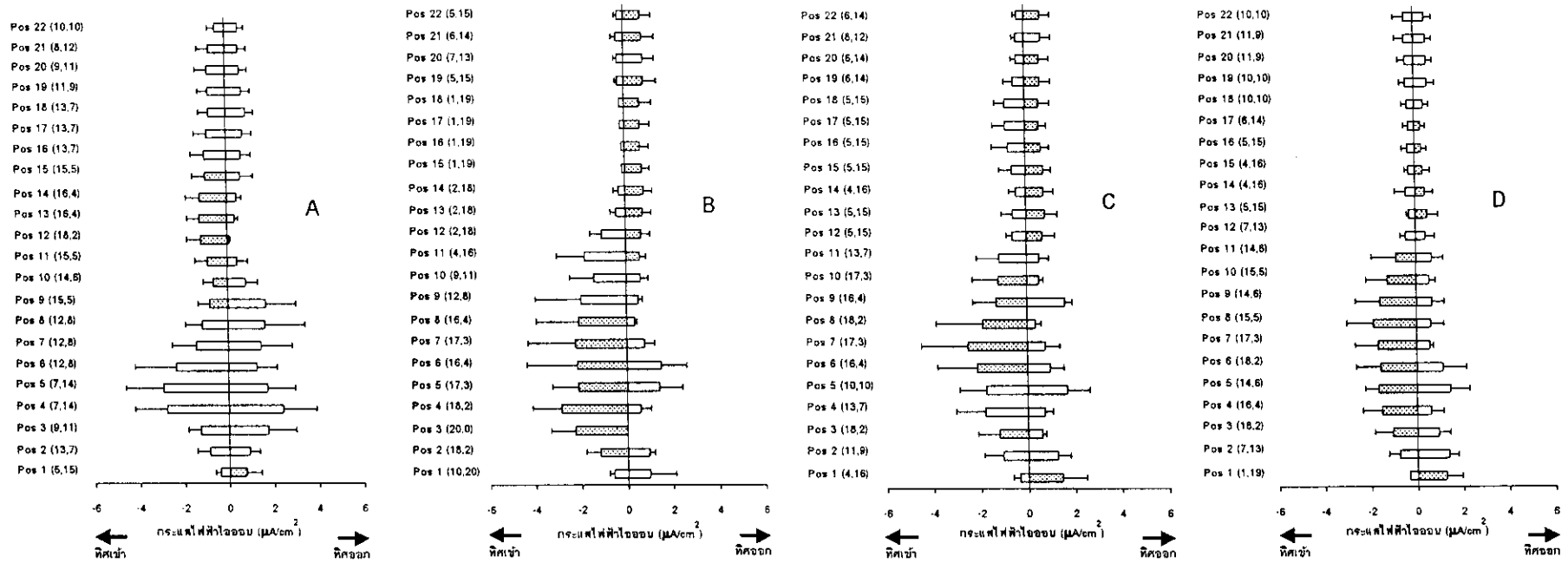
ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 25 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิสัน nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีลูมิเนียม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.41	0.21	0.77	0.66	-0.61	0.20	0.99	1.09	-0.36	0.29	1.46	1.02	-0.35	nc	1.28	0.68
2	0.5	-0.88	0.58	0.92	0.43	-1.19	0.61	0.96	0.23	-1.06	0.80	1.26	0.53	-0.77	0.49	1.39	0.40
3	1.0	-1.28	0.55	1.78	1.23	-2.26	1.07	0.00	nc	-1.22	0.90	0.63	0.14	-1.05	0.80	0.95	0.50
4	1.5	-2.79	1.42	2.44	1.46	-2.87	1.26	0.59	0.46	-1.81	1.23	0.74	0.32	-1.52	0.84	0.62	0.53
5	2.0	-2.91	1.69	1.74	1.23	-2.11	1.16	1.42	0.99	-1.76	1.14	1.69	0.94	-1.64	0.61	1.46	0.81
6	2.5	-2.35	1.85	1.29	0.88	-2.16	2.21	1.50	1.10	-2.14	1.65	0.98	0.55	-1.55	1.09	1.15	0.99
7	3.0	-1.45	1.08	1.46	1.39	-2.24	2.06	0.79	0.42	-2.51	1.98	0.77	0.59	-1.69	0.98	0.58	0.14
8	3.5	-1.18	0.74	1.64	1.79	-2.10	1.85	0.37	0.08	-1.88	1.97	0.35	0.22	-1.88	1.14	0.62	0.56
9	4.0	-0.83	0.53	1.69	1.33	-1.96	2.02	0.56	0.14	-1.31	1.00	1.63	0.28	-1.58	1.05	0.69	0.51
10	4.5	-0.66	0.44	0.83	0.49	-1.41	1.05	0.65	0.32	-1.21	1.11	0.53	0.15	-1.26	0.94	0.57	0.27
11	5.0	-0.91	0.56	0.46	0.44	-1.80	1.21	0.61	0.25	-1.18	0.95	0.56	0.38	-0.86	1.05	0.69	0.49
12	5.5	-1.19	0.63	0.10	0.02	-1.03	0.52	0.70	0.36	-0.59	0.27	0.69	0.49	-0.44	0.24	0.44	0.38
13	6.0	-1.24	0.56	0.36	0.15	-0.40	0.25	0.76	0.36	-0.58	0.47	0.61	0.49	-0.28	0.11	0.54	0.45
14	6.5	-1.23	0.61	0.45	0.19	-0.29	0.22	0.81	0.36	-0.43	0.29	0.75	0.40	-0.42	0.48	0.43	0.34
15	7.0	-0.97	0.59	0.62	0.55	-0.11	nc	0.76	0.32	-0.59	0.52	0.76	0.32	-0.28	0.18	0.37	0.28
16	7.5	-1.00	0.59	0.67	0.44	-0.13	nc	0.70	0.38	-0.75	0.68	0.68	0.32	-0.31	0.24	0.31	0.20
17	8.0	-0.88	0.57	0.74	0.41	-0.19	nc	0.70	0.43	-0.86	0.53	0.60	0.30	-0.27	0.20	0.28	0.17
18	8.5	-0.78	0.45	0.89	0.34	-0.20	nc	0.70	0.49	-0.87	0.42	0.60	0.45	-0.31	0.24	0.41	0.23
19	9.0	-0.80	0.44	0.74	0.35	-0.28	0.09	0.86	0.56	-0.50	0.37	0.67	0.42	-0.38	0.24	0.57	0.31
20	9.5	-0.82	0.56	0.64	0.34	-0.28	0.16	0.88	0.46	-0.36	0.22	0.65	0.41	-0.38	0.29	0.56	0.24
21	10.0	-0.75	0.54	0.60	0.36	-0.32	0.20	0.83	0.50	-0.35	0.17	0.72	0.39	-0.41	0.40	0.56	0.24
22	10.5	-0.45	0.32	0.59	0.25	-0.27	0.10	0.76	0.45	-0.32	0.13	0.68	0.41	-0.42	0.44	0.51	0.29



ภาพประกอบ 48 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 (A) และเมื่อรากได้รับอุณหภูมิ 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

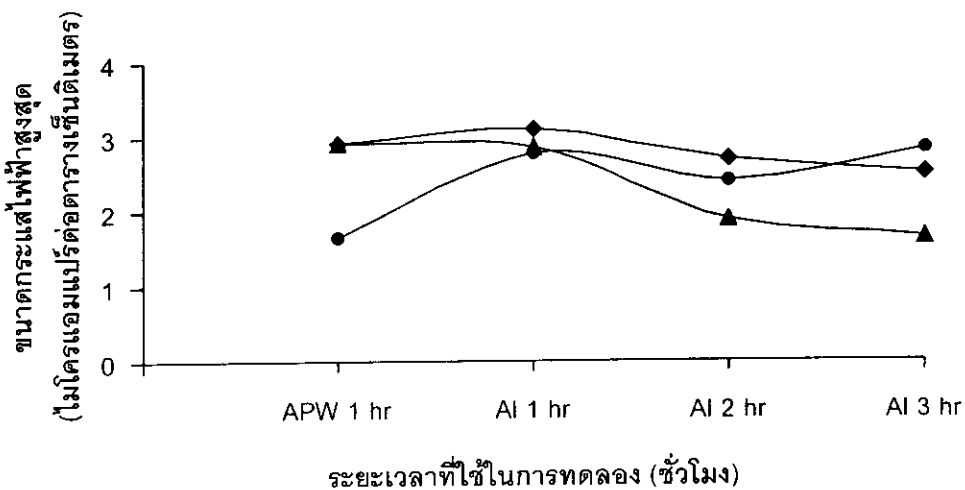
(A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง

(B) หลังจากได้รับอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง

(C) หลังจากได้รับอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง

(D) หลังจากได้รับอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง

จากการศึกษาของ Silva และคณะ (2000) พบว่า อลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) จะสะสมอยู่ในนิวเคลียสของเซลล์บริเวณเนื้อเยื่อเจริญ ดังนั้นอลูมิเนียมน่าจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากในบริเวณนี้ ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยที่สูงสุดของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ นั่นคือในตำแหน่งที่ 2-5 จะเห็นว่าในสารละลายที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้นสูง (100 ไมโครโมลาร์) กระแสไฟฟ้าลดลงตามเวลามากกว่าในสารละลายที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้นต่ำ



◆ Al 1 ไมโครโมลาร์    ● Al 10 ไมโครโมลาร์    ▲ Al 100 ไมโครโมลาร์

ภาพประกอบ 49 ค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าของตำแหน่งที่ 2-5 สูงสุด ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่รากทานตะวันได้รับสารพิษที่อลูมิเนียมความเข้มข้นต่างกัน

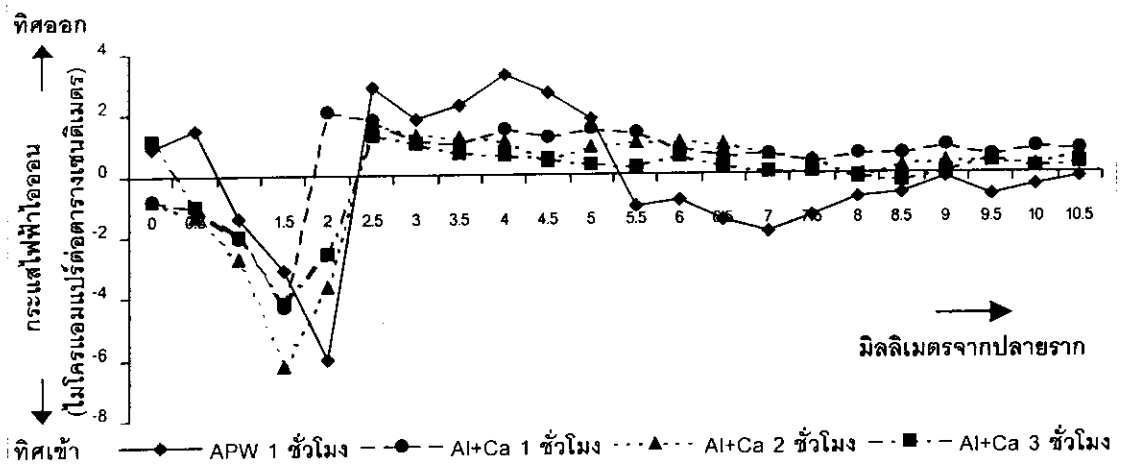
จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อลูมิเนียมมีผลยับยั้งกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากทานตะวันอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวหรือเนื้อเยื่อเจริญ การลดลงของกระแสไฟฟ้าไอออนคาดว่าเกิดจากการที่อลูมิเนียมไปขัดขวางการเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ของ  $H^+$  (Ryan *et al.*, 1992),  $K^+$  (Liu and Luan, 2001) และ  $Ca^{2+}$  (Nichol *et al.*, 1993) โดยการลดลงของกระแสไฟฟ้าไอออนนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของอลูมิเนียมในสารละลายภายนอกเซลล์

#### 3.5.1.4 ผลของแคลเซียมต่อความเป็นพิษของอลูมิเนียม

ในการพิจารณาผลของแคลเซียมที่มีต่อความเป็นพิษของอลูมิเนียม ได้เพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลาย APW อีก 0.1 มิลลิโมลาร์ เป็น 0.2 มิลลิโมลาร์ โดยเริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 4.50 จากนั้นเปลี่ยนสารละลาย

เป็นสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ที่เพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมเป็น 0.2 มิลลิโมลาร์

ภาพประกอบ 50 แสดงรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนในสภาวะที่มีอลูมิเนียมและเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียม จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนทิศของกระแสไฟฟ้าในบริเวณอาณาเขตขรราก



ภาพประกอบ 50 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ที่มีแคลเซียมความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละราก (ตาราง 26) พบว่าจากทั้งหมด 10 ราก กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับอลูมิเนียมที่เพิ่มแคลเซียมเป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง จำนวน 3 และ 2 รากตามลำดับ แต่มีรากที่กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลง 1 และ 6 ราก หลังจากได้รับอลูมิเนียมและแคลเซียมเป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 27) พบว่า ในอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวของรากที่ตำแหน่ง 2-5 หรือระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากราก กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 1 และ 2 แต่ในชั่วโมงที่ 3 ขนาดกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง (ค่า t เป็นลบ) มีเพียงตำแหน่งที่ 5 เท่านั้นที่แสดงนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 27C) ในอาณาเขตเซลล์ยึดตัวที่ตำแหน่ง 6-16 หรือระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากราก กระแสไฟฟ้า

มีแนวโน้มลดลงเกือบทุกตำแหน่งทั้งสามชั่วโมงและแสดงผลอย่างมีนัยสำคัญในชั่วโมงที่ 3 สำหรับในอาณาเขตชนรากที่ตำแหน่ง 17-22 หรือระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 1 แล้วค่อยลดขนาดลงในชั่วโมงที่ 2 และกระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเกือบทุกตำแหน่งในชั่วโมงที่ 3

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนมาหาค่าเฉลี่ยขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 28 และภาพประกอบ 51) พบว่า ในชั่วโมงแรกที่ได้รับอุณหภูมิเย็นที่เพิ่มแคลเซียม ในบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว กระแสไฟฟ้าแสดงทิศเข้าอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิเย็น 10 ไมโครโมลาร์ที่ไม่เพิ่มแคลเซียม และพบลักษณะดังกล่าวในชั่วโมงที่ 2 และ 3 ด้วยเช่นกัน ส่วนอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนรากตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้าแสดงทิศเข้าและออกจากรากมีจำนวนใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาของ Nichol และคณะ (1993) และ Reid และคณะ (1995) พบว่า อุณหภูมิเย็นเป็นพิษต่อพืชโดยไปยับยั้งการไหลเข้าของแคลเซียมหรือทำให้แคลเซียมไม่สามารถจับตัวกับผนังเซลล์ได้ ดังนั้นถ้าเพิ่มปริมาณแคลเซียมในสารละลายอุณหภูมิเย็น คาดว่าผลของอุณหภูมิเย็นที่มีต่อแคลเซียมควรจะลดลง นั่นคือรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนควรจะต่างจากรูปแบบในสารละลายอุณหภูมิเย็น 10 ไมโครโมลาร์แต่การทดลองนี้ไม่พบผลดังกล่าว ซึ่งอาจจะเนื่องจากปริมาณของอุณหภูมิเย็นเพียง 10 ไมโครโมลาร์ ยังมีความเข้มข้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เห็นผลชัดเจน และ/หรือการเพิ่มปริมาณแคลเซียมยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เห็นผล เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของสารพิษชนิดอื่นๆ ด้วยจึงไม่ได้ดำเนินการศึกษาต่อในหัวข้อนี้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวเป็นหัวข้อที่น่าสนใจที่ควรจะมีการศึกษาต่อไป



ตาราง 26 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างราก ใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ ที่มีแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียมที่มีแคลเซียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียมที่มีแคลเซียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียม ที่มีแคลเซียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 1 ชั่วโมง		B)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 2 ชั่วโมง		C)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.116	ไม่มีความแตกต่าง	-0.146	ไม่มีความแตกต่าง	0.171	ไม่มีความแตกต่าง
2	3.687	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>d</sup>	2.275	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>a</sup>	-2.937	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
3	0.824	ไม่มีความแตกต่าง	-1.012	ไม่มีความแตกต่าง	-2.770	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>b</sup>
4	2.236	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>a</sup>	2.089	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>a</sup>	0.817	ไม่มีความแตกต่าง
5	-0.914	ไม่มีความแตกต่าง	0.520	ไม่มีความแตกต่าง	-3.577	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
6	2.097	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>a</sup>	0.851	ไม่มีความแตกต่าง	-0.734	ไม่มีความแตกต่าง
7	-0.945	ไม่มีความแตกต่าง	-0.841	ไม่มีความแตกต่าง	-2.223	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>a</sup>
8	0.476	ไม่มีความแตกต่าง	0.767	ไม่มีความแตกต่าง	-0.445	ไม่มีความแตกต่าง
9	0.740	ไม่มีความแตกต่าง	-0.101	ไม่มีความแตกต่าง	-3.165	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
10	-0.317	ไม่มีความแตกต่าง	-2.427	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>a</sup>	-3.602	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 27 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ที่มีแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียมที่มีแคลเซียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียมที่มีแคลเซียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอลูมิเนียมที่มีแคลเซียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 1 ชั่วโมง		B)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 2 ชั่วโมง		C)APW 1 ชั่วโมงกับAl+Ca 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	0.372	ไม่มีความแตกต่าง	0.751	ไม่มีความแตกต่าง	0.421	ไม่มีความแตกต่าง
2	2.467	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>a</sup>	2.523	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>a</sup>	-1.031	ไม่มีความแตกต่าง
3	1.888	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>a</sup>	4.333	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>d</sup>	-1.295	ไม่มีความแตกต่าง
4	3.089	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>b</sup>	4.642	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>b</sup>	-1.256	ไม่มีความแตกต่าง
5	2.622	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>b</sup>	3.007	APW < Al+Ca 2 Hr <sup>b</sup>	-1.950	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>a</sup>
6	-0.443	ไม่มีความแตกต่าง	-0.885	ไม่มีความแตกต่าง	-3.578	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
7	1.785	ไม่มีความแตกต่าง	-0.985	ไม่มีความแตกต่าง	-5.653	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>d</sup>
8	-0.792	ไม่มีความแตกต่าง	-1.083	ไม่มีความแตกต่าง	-3.070	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>d</sup>
9	-0.783	ไม่มีความแตกต่าง	-0.534	ไม่มีความแตกต่าง	-2.315	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>d</sup>
10	-0.854	ไม่มีความแตกต่าง	-1.042	ไม่มีความแตกต่าง	-2.691	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>d</sup>
11	-0.822	ไม่มีความแตกต่าง	-1.357	ไม่มีความแตกต่าง	-2.885	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>b</sup>
12	-1.673	ไม่มีความแตกต่าง	-0.684	ไม่มีความแตกต่าง	-0.060	ไม่มีความแตกต่าง
13	-2.506	APW > Al+Ca 1 Hr <sup>b</sup>	-2.289	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>b</sup>	-0.392	ไม่มีความแตกต่าง
14	-2.663	APW > Al+Ca 1 Hr <sup>b</sup>	-3.662	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>c</sup>	-1.601	ไม่มีความแตกต่าง
15	-4.503	APW > Al+Ca 1 Hr <sup>d</sup>	-3.639	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>c</sup>	-1.874	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>a</sup>
16	-0.430	ไม่มีความแตกต่าง	-2.156	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>b</sup>	-2.883	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>b</sup>
17	0.411	ไม่มีความแตกต่าง	-1.892	APW > Al+Ca 2 Hr <sup>b</sup>	-2.937	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>b</sup>
18	1.052	ไม่มีความแตกต่าง	-0.492	ไม่มีความแตกต่าง	-1.794	ไม่มีความแตกต่าง
19	1.202	ไม่มีความแตกต่าง	0.031	ไม่มีความแตกต่าง	-3.713	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
20	1.381	ไม่มีความแตกต่าง	0.378	ไม่มีความแตกต่าง	-4.179	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
21	1.998	APW < Al+Ca 1 Hr <sup>b</sup>	0.245	ไม่มีความแตกต่าง	-3.253	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>
22	1.048	ไม่มีความแตกต่าง	-1.180	ไม่มีความแตกต่าง	-3.384	APW > Al+Ca 3 Hr <sup>c</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

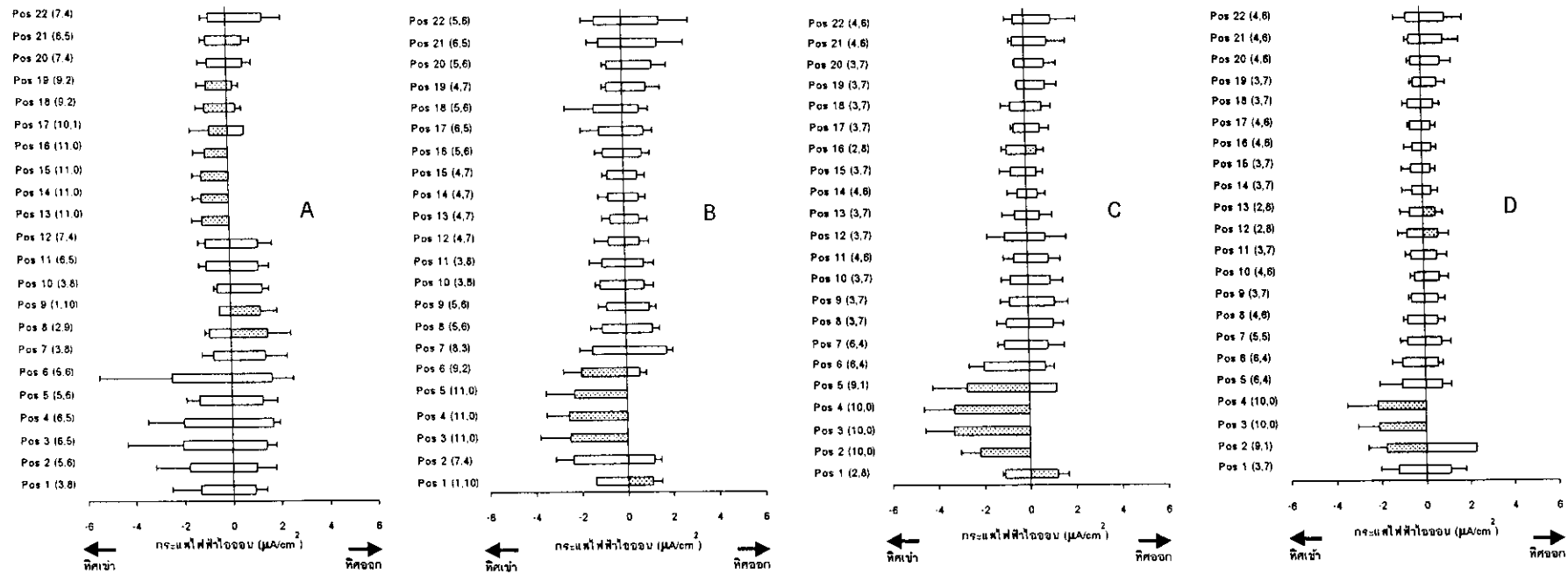
ตาราง 28 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์

และแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก

n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า

แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลาย ราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มี Al และ Ca เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มี Al และ Ca เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มี Al และ Ca เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-1.34	1.17	0.95	0.47	-1.40	Nc	1.10	0.41	-1.12	0.12	1.21	0.43	-1.25	0.76	1.13	0.67
2	0.5	-1.78	1.40	1.02	0.76	-2.36	0.77	1.17	0.32	-2.17	0.85	n	nc	-1.77	0.81	2.29	nc
3	1.0	-2.05	2.29	1.42	0.38	-2.49	1.29	n	nc	-3.30	1.25	n	nc	-2.10	0.93	n	nc
4	1.5	-2.00	1.46	1.71	0.26	-2.53	0.98	n	nc	-3.28	1.32	n	nc	-2.13	1.37	n	nc
5	2.0	-1.34	0.54	1.28	0.59	-2.29	1.24	n	nc	-2.71	1.51	1.18	nc	-1.04	1.02	0.75	0.41
6	2.5	-2.47	3.00	1.70	0.84	-1.96	0.80	0.57	0.28	-1.98	0.65	0.71	0.38	-1.02	0.45	0.61	0.18
7	3.0	-0.73	0.48	1.43	0.88	-1.48	0.57	1.79	0.25	-1.06	0.31	0.85	0.69	-0.76	0.32	0.76	0.40
8	3.5	-0.89	0.20	1.52	0.95	-1.03	0.53	1.18	0.30	-0.96	0.41	1.08	0.42	-0.73	0.21	0.62	0.26
9	4.0	-0.47	nc	1.23	0.67	-0.83	0.38	1.05	0.28	-0.82	0.40	1.16	0.57	-0.58	0.11	0.64	0.28
10	4.5	-0.54	0.14	1.33	0.28	-1.09	0.21	0.86	0.35	-0.77	0.40	0.98	0.52	-0.41	0.21	0.72	0.37
11	5.0	-0.99	0.30	1.16	0.44	-1.00	0.55	0.83	0.43	-0.59	0.46	0.91	0.48	-0.56	0.25	0.61	0.42
12	5.5	-1.01	0.29	1.16	0.57	-0.70	0.61	0.66	0.38	-0.99	0.75	0.80	0.89	-0.70	0.43	0.69	0.45
13	6.0	-1.13	0.41	n	nc	-0.61	0.36	0.65	0.34	-0.51	0.58	0.58	0.51	-0.58	0.43	0.68	0.28
14	6.5	-1.13	0.36	n	nc	-0.68	0.44	0.65	0.29	-0.40	0.42	0.50	0.31	-0.47	0.45	0.42	0.26
15	7.0	-1.12	0.39	n	nc	-0.71	0.22	0.61	0.31	-0.66	0.50	0.47	0.24	-0.48	0.45	0.38	0.20
16	7.5	-0.96	0.50	n	nc	-0.88	0.35	0.84	0.31	-0.85	0.20	0.49	0.29	-0.42	0.37	0.43	0.20
17	8.0	-0.75	0.83	0.68	nc	-1.03	0.82	0.94	0.32	-0.53	0.11	0.65	0.37	-0.51	0.09	0.44	0.20
18	8.5	-0.93	0.38	0.34	0.23	-1.25	1.26	0.73	0.37	-0.63	0.42	0.74	0.37	-0.59	0.26	0.57	0.23
19	9.0	-0.87	0.38	0.24	0.22	-0.69	0.19	1.06	0.59	-0.32	0.05	0.90	0.49	-0.37	0.11	0.71	0.35
20	9.5	-0.79	0.40	0.68	0.33	-0.66	0.20	1.33	0.61	-0.41	0.05	0.87	0.48	-0.45	0.15	0.90	0.46
21	10.0	-0.85	0.23	0.65	0.28	-0.99	0.50	1.57	1.13	-0.52	0.16	1.00	0.77	-0.51	0.18	1.04	0.68
22	10.5	-0.73	0.33	1.51	0.74	-1.16	0.59	1.67	1.25	-0.46	0.37	1.18	1.09	-0.61	0.55	1.12	0.76



ภาพประกอบ 51 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 (A) และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์และแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง

(B) หลังจากได้รับ AI และ Ca 1 ชั่วโมง

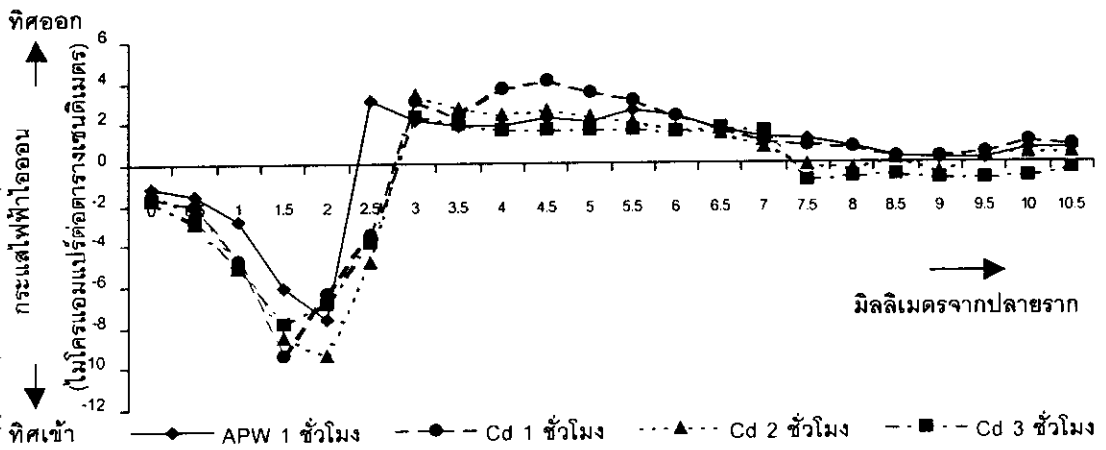
(C) หลังจากได้รับ AI และ Ca 2 ชั่วโมง

(D) หลังจากได้รับ AI และ Ca 3 ชั่วโมง

### 3.5.2 ผลของแคดเมียม

ศึกษาผลของแคดเมียมในสารละลาย APW pH 6.00 และ pH 4.50 โดยใช้แคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) 1 ไมโครโมลาร์ (14 ราก) และ 100 ไมโครโมลาร์ (11 ราก) ใน pH 6.00 และ 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 (11 ราก) โดยเริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 6.00 หรือ 4.50 หลังจากนั้นเปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลาย APW ที่มีแคดเมียม

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ใน APW pH 6.00 พบว่าบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก) และอาณาเขตเซลล์ยึดตัว (ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก) กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมที่มีต่อกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละราก จำนวน 14 ราก หลังจากรากทานตะวันได้รับแคดเมียมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ตาราง 29) พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จำนวน 9 ราก และในชั่วโมงที่ 2 และ 3 ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น 6 และ 2 ราก ตามลำดับ ส่วนรากที่มีขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลงมี 1, 3 และ 4 รากในชั่วโมงที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 30) พบว่าหลังจากรอกทานตะวันได้รับแคดเมียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกือบทุกตำแหน่งและเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและอาณาเขตเซลล์ยึดตัว ส่วนในชั่วโมงที่ 2 ที่ตำแหน่ง 1-3 ซึ่งเป็นอาณาเขตหวมกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับชั่วโมงที่ 1 แต่บริเวณตอนกลางของอาณาเขตเซลล์ยึดตัวขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ตำแหน่ง 10-11 และในชั่วโมงที่ 3 ในบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนรอกขนาดกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเกือบทุกตำแหน่ง (ค่า  $t$  เป็นลบ) ส่วนอาณาเขตหวมกรากและอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ตำแหน่ง 1-2

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 31 และภาพประกอบ 53) พบว่า รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันทั้งก่อนและหลังได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รอกบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและมีทิศออกจากรอกบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัว โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนเพียงเล็กน้อยบริเวณอาณาเขตชนรอก

ตาราง 29 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างราก  
 ใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง  
 A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง  
 C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	3.692	non Cd < Cd 1 Hr <sup>d</sup>	2.934	non Cd < Cd 2 Hr <sup>c</sup>	3.337	non Cd < Cd 3 Hr <sup>c</sup>
2	3.207	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-0.070	ไม่มีความแตกต่าง	0.288	ไม่มีความแตกต่าง
3	1.824	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	3.204	non Cd < Cd 2 Hr <sup>c</sup>	1.719	ไม่มีความแตกต่าง
4	3.673	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	5.275	non Cd < Cd 2 Hr <sup>d</sup>	4.341	non Cd < Cd 3 Hr <sup>d</sup>
5	-0.184	ไม่มีความแตกต่าง	-0.547	ไม่มีความแตกต่าง	-0.279	ไม่มีความแตกต่าง
6	1.014	ไม่มีความแตกต่าง	-0.475	ไม่มีความแตกต่าง	-5.709	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
7	2.725	non Cd < Cd 1 Hr <sup>i</sup>	1.940	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	1.147	ไม่มีความแตกต่าง
8	-2.166	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-2.183	non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-2.713	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
9	-1.347	ไม่มีความแตกต่าง	1.809	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.858	ไม่มีความแตกต่าง
10	4.850	non Cd < Cd 1 Hr <sup>d</sup>	0.584	ไม่มีความแตกต่าง	-0.503	ไม่มีความแตกต่าง
11	2.998	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-1.670	ไม่มีความแตกต่าง	-1.260	ไม่มีความแตกต่าง
12	3.110	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	2.137	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	1.642	ไม่มีความแตกต่าง
13	1.946	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-1.849	non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-4.852	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
14	0.378	ไม่มีความแตกต่าง	-2.712	non Cd > Cd 2 Hr <sup>b</sup>	-3.409	non Cd > Cd 3 Hr <sup>c</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 30 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับที่ได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	3.252	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	2.481	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	1.806	Non Cd < Cd 3 Hr <sup>a</sup>
2	3.003	non Cd < Cd 1 Hr <sup>b</sup>	3.673	non Cd < Cd 2 Hr <sup>c</sup>	2.760	Non Cd < Cd 3 Hr <sup>b</sup>
3	2.616	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	2.218	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	1.658	ไม่มีความแตกต่าง
4	1.990	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	0.844	ไม่มีความแตกต่าง	0.332	ไม่มีความแตกต่าง
5	1.114	ไม่มีความแตกต่าง	0.536	ไม่มีความแตกต่าง	-0.627	ไม่มีความแตกต่าง
6	2.633	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	2.261	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.082	ไม่มีความแตกต่าง
7	2.586	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	1.465	ไม่มีความแตกต่าง	-0.350	ไม่มีความแตกต่าง
8	0.380	ไม่มีความแตกต่าง	-0.605	ไม่มีความแตกต่าง	-1.632	ไม่มีความแตกต่าง
9	0.129	ไม่มีความแตกต่าง	-1.748	ไม่มีความแตกต่าง	-1.472	ไม่มีความแตกต่าง
10	0.968	ไม่มีความแตกต่าง	-2.482	non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-1.564	ไม่มีความแตกต่าง
11	1.689	ไม่มีความแตกต่าง	-2.089	non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-2.617	Non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
12	2.529	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-0.605	ไม่มีความแตกต่าง	-2.022	Non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
13	3.259	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	0.685	ไม่มีความแตกต่าง	-0.026	ไม่มีความแตกต่าง
14	2.991	non Cd < Cd 1 Hr <sup>b</sup>	1.812	non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	1.609	ไม่มีความแตกต่าง
15	1.654	ไม่มีความแตกต่าง	0.278	ไม่มีความแตกต่าง	0.787	ไม่มีความแตกต่าง
16	1.903	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	0.451	ไม่มีความแตกต่าง	0.117	ไม่มีความแตกต่าง
17	1.554	ไม่มีความแตกต่าง	-0.131	ไม่มีความแตกต่าง	-0.821	ไม่มีความแตกต่าง
18	1.323	ไม่มีความแตกต่าง	-0.015	ไม่มีความแตกต่าง	-0.149	ไม่มีความแตกต่าง
19	1.119	ไม่มีความแตกต่าง	-0.114	ไม่มีความแตกต่าง	0.130	ไม่มีความแตกต่าง
20	-0.679	ไม่มีความแตกต่าง	-0.803	ไม่มีความแตกต่าง	-0.719	ไม่มีความแตกต่าง
21	0.012	ไม่มีความแตกต่าง	-1.438	ไม่มีความแตกต่าง	-1.070	ไม่มีความแตกต่าง
22	0.754	ไม่มีความแตกต่าง	-1.181	ไม่มีความแตกต่าง	-1.420	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว

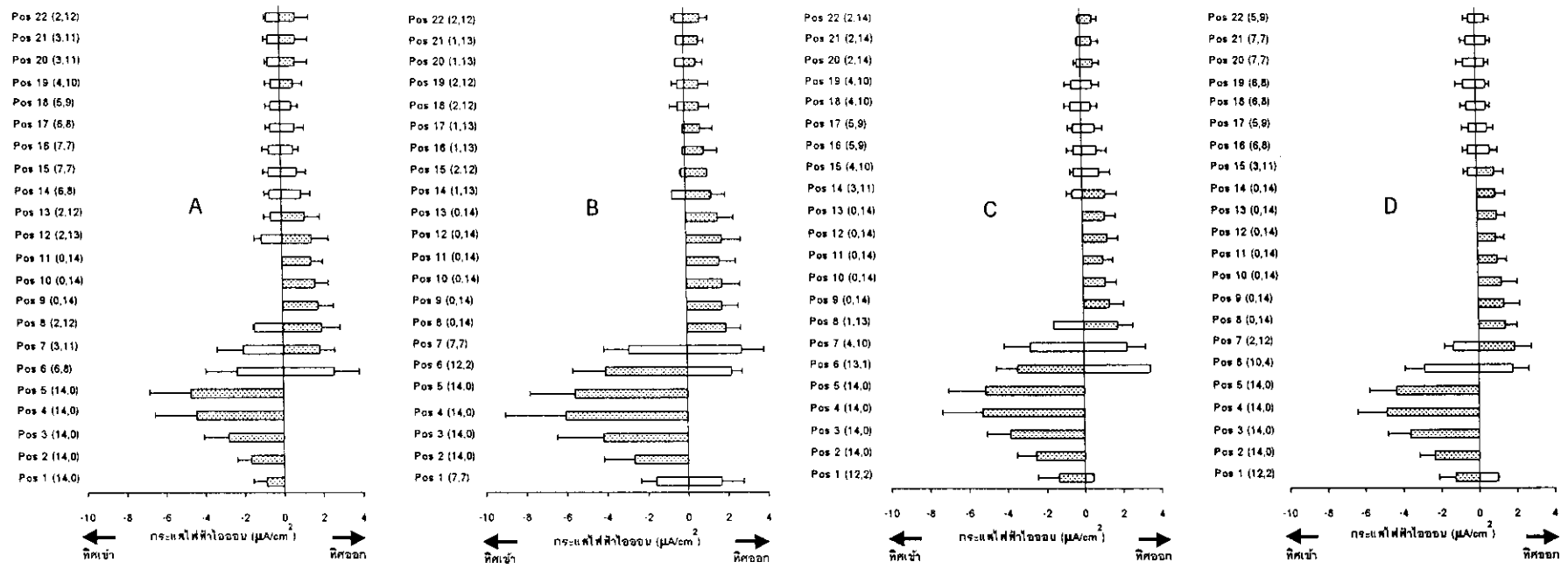


ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก



ตาราง 31 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันใน APW pH 6.00 และในสภาวะที่มีแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

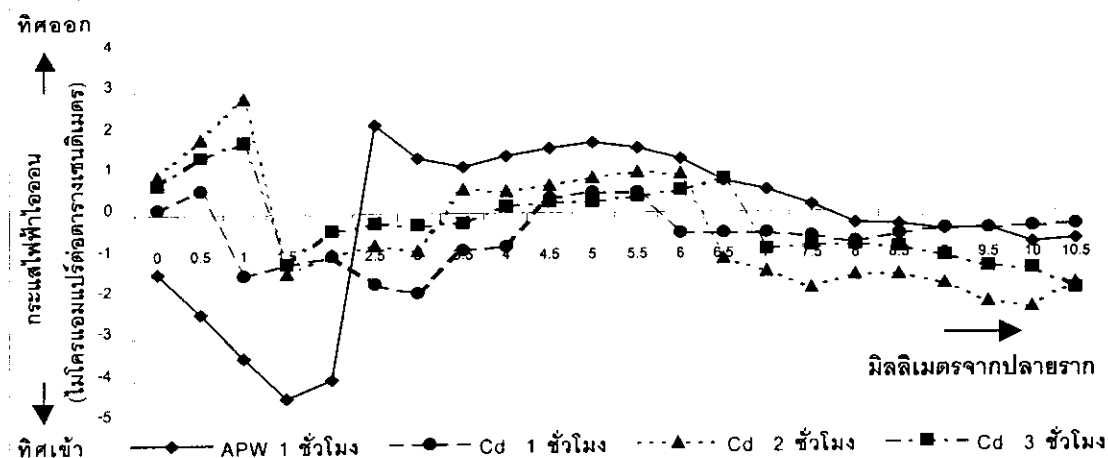
ตำแหน่ง ที่	ความยาว จากราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีแคดเมียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีแคดเมียม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีแคดเมียม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-0.89	0.66	n	nc	-1.60	0.75	1.69	1.08	-1.37	1.10	0.45	nc	-1.26	0.88	1.03	nc
2	0.5	-1.65	0.71	n	nc	-2.68	1.50	n	nc	-2.54	0.96	n	nc	-2.34	0.80	n	nc
3	1.0	-2.81	1.26	n	nc	-4.19	2.26	n	nc	-3.88	1.20	n	nc	-3.83	1.19	n	nc
4	1.5	-4.44	2.12	n	nc	-6.03	3.00	n	nc	-5.31	2.05	n	nc	-4.87	1.51	n	nc
5	2.0	-4.73	2.09	n	nc	-5.59	2.21	n	nc	-5.12	1.90	n	nc	-4.34	1.42	n	nc
6	2.5	-2.35	1.59	2.58	1.25	-4.08	1.62	2.22	0.52	-3.46	1.11	3.48	nc	-2.86	1.02	1.81	0.82
7	3.0	-2.04	1.31	1.87	0.72	-2.90	1.24	2.75	1.05	-2.80	1.36	2.26	0.93	-1.36	0.46	1.89	0.86
8	3.5	-1.41	0.10	2.00	0.90	n	nc	1.97	0.70	-1.55	nc	1.79	0.78	n	nc	1.44	0.60
9	4.0	n	nc	1.81	0.77	n	nc	1.78	0.79	n	nc	1.39	0.69	n	nc	1.37	0.80
10	4.5	n	nc	1.67	0.63	n	nc	1.81	0.84	n	nc	1.19	0.56	n	nc	1.26	0.80
11	5.0	n	nc	1.47	0.58	n	nc	1.68	0.77	n	nc	1.06	0.49	n	nc	1.05	0.45
12	5.5	-1.02	0.38	1.50	0.83	n	nc	1.82	0.89	n	nc	1.30	0.52	n	nc	0.99	0.40
13	6.0	-0.53	0.33	1.18	0.74	n	nc	1.60	0.78	n	nc	1.17	0.54	n	nc	1.04	0.41
14	6.5	-0.58	0.28	1.00	0.45	-0.67	nc	1.31	0.68	-0.53	0.29	1.22	0.58	n	nc	0.99	0.46
15	7.0	-0.62	0.25	0.81	0.44	-0.19	0.06	1.10	m	-0.42	0.19	0.93	0.54	-0.46	0.25	0.92	0.47
16	7.5	-0.58	0.32	0.64	0.27	-0.12	nc	0.96	0.65	-0.43	0.32	0.80	0.50	-0.46	0.27	0.73	0.38
17	8.0	-0.51	0.23	0.73	0.45	-0.12	nc	0.81	0.56	-0.45	0.24	0.72	0.39	-0.42	0.34	0.60	0.30
18	8.5	-0.48	0.25	0.59	0.28	-0.33	0.39	0.73	0.50	-0.56	0.31	0.52	0.31	-0.50	0.32	0.53	0.18
19	9.0	-0.46	0.27	0.69	0.45	-0.34	0.28	0.74	0.49	-0.49	0.36	0.60	0.34	-0.67	0.41	0.55	0.18
20	9.5	-0.58	0.16	0.78	0.62	-0.42	nc	0.60	0.34	-0.21	0.13	0.65	0.30	-0.63	0.40	0.51	0.18
21	10.0	-0.60	0.20	0.82	0.60	-0.37	0.01	0.74	0.24	-0.18	0.04	0.61	0.32	-0.50	0.28	0.61	0.17
22	10.5	-0.65	0.12	0.81	0.68	-0.45	0.13	0.83	0.36	-0.12	0.04	0.61	0.25	-0.35	0.26	0.55	0.20



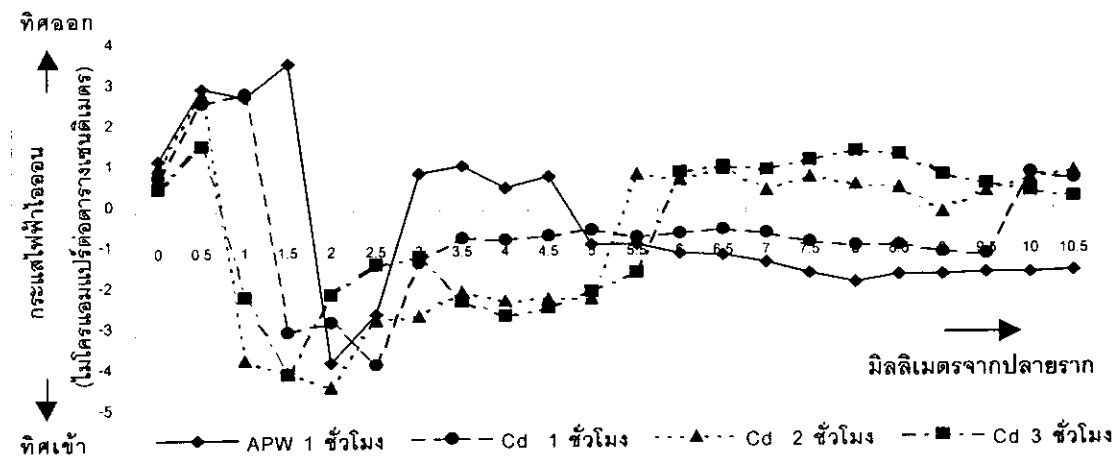
ภาพประกอบ 53 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 6.00 (A) และเมื่อกรากได้รับ แคลเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

- (A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง
- (B) หลังจากได้รับแคลเมียม 1 ชั่วโมง
- (C) หลังจากได้รับแคลเมียม 2 ชั่วโมง
- (D) หลังจากได้รับแคลเมียม 3 ชั่วโมง

ในกรณีของแคดเมียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ ที่ pH 6.00 และ pH 4.50 พบว่าแคดเมียมมีผลต่อกระแสไฟฟ้าไอออนตลอดทั้งรากทั้งใน pH 6.00 (ภาพประกอบ 54) และ pH 4.50 (ภาพประกอบ 55)



ภาพประกอบ 54 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 55 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

จากการพิจารณาผลของแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ ที่มีต่อกระแสไฟฟ้าไอออนใน pH 6.00 10 ราก (ตาราง 32) และใน pH 4.50 11 ราก (ตาราง 33) พบว่า หลังจากรากทานตะวัน ได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงใน 5 รากและลดลงถึง 8 รากในชั่วโมงที่ 3 ส่วนใน pH 4.50 กระแสไฟฟ้าไอออนลดลง 6 รากในชั่วโมงที่ 1 (ตาราง 33) แต่ในชั่วโมงที่ 2 และ 3 กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงเพียง 2 และ 4 รากตามลำดับ แต่มีบางรากที่กระแสไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับแคดเมียมโดยมีจำนวน 2, 3 และ 1 รากในชั่วโมงที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของขนาดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งใน pH 6.00 (ตาราง 34) ที่ตำแหน่ง 4-12 ซึ่งเป็นตอนปลายของอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทั้งสามชั่วโมงที่ได้รับแคดเมียม และกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นบริเวณขนรากในชั่วโมงที่ 1 และ 2

ใน pH 4.50 (ตาราง 35) ในบริเวณตอนกลางของอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงหลังจากได้รับแคดเมียมเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแต่กระแสไฟฟ้ากลับเพิ่มขนาดขึ้นในชั่วโมงที่ 3 (ตาราง 35C) ส่วนตำแหน่งอื่นๆ ไม่แสดงนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง หลังจากได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง ที่ pH 6.00 (ตาราง 36 และภาพประกอบ 56) พบว่าทิศของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนจากทิศเข้าสู่รากเป็นทิศออกจากรากบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (ตำแหน่งที่ 1-3) ส่วนอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก (ตำแหน่งที่ 13 ขึ้นไป) ทิศของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนจากทิศออกจากรากเป็นทิศเข้าสู่ราก แต่ใน pH 4.50 (ตาราง 37 และภาพประกอบ 57) ทิศของกระแสไฟฟ้าหลังจากได้รับแคดเมียมจะตรงกันข้ามกับใน pH 6.00 นั่นคือกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและแสดงผลชัดเจนขึ้นในชั่วโมงที่ 2 และ 3 สำหรับบริเวณอาณาเขตขนรากกระแสไฟฟ้าแสดงทิศออกจากรากหลังจากได้รับแคดเมียม 2 และ 3 ชั่วโมงอย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป แคดเมียมมีผลต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันอย่างชัดเจนใน pH 6.00 ทั้งขนาดและทิศทาง โดยทิศของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวจะเปลี่ยนจากเข้าเป็นออกและมีขนาดลดลง ส่วนกระแสไฟฟ้าในส่วนที่เหลือของรากจะเปลี่ยนจากออกเป็นเข้าและมีขนาดลดลงเช่นกัน ส่วนใน pH 4.50 กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนทิศเฉพาะในช่วงอาณาเขตขนราก แต่มีขนาดลดลงตลอดทั้งรากเช่นเดียวกับใน pH 6.00 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่

แคดเมียมเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของเซลล์ (Vassilev *et al.*, 1998) และสะสมอยู่ในไซโตพลาสซึม (Chakavarty and Srivastava, 1997) ทำให้โครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปเช่น ทำให้ศักย์เมมเบรนมีค่าเป็นลบมากขึ้น (Nocito *et al.*, 2002) โดยที่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้การเคลื่อนที่เข้า-ออกของไอออนชนิดต่างๆ เปลี่ยนไป

ตาราง 32 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-3.224	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-0.400	ไม่มีความแตกต่าง	-2.245	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
2	-4.399	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-3.653	non Cd > Cd 2 Hr <sup>o</sup>	-3.464	non Cd > Cd 3 Hr <sup>c</sup>
3	-0.697	ไม่มีความแตกต่าง	-0.623	ไม่มีความแตกต่าง	-0.564	ไม่มีความแตกต่าง
4	-1.309	ไม่มีความแตกต่าง	-2.021	non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-4.146	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
5	-0.514	ไม่มีความแตกต่าง	0.819	ไม่มีความแตกต่าง	-2.180	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
6	-4.956	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-2.582	non Cd > Cd 2 Hr <sup>b</sup>	-3.592	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
7	-1.613	ไม่มีความแตกต่าง	-4.142	non Cd > Cd 2 Hr <sup>d</sup>	-3.717	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
8	-5.698	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-3.397	non Cd > Cd 2 Hr <sup>c</sup>	-3.607	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
9	-0.431	ไม่มีความแตกต่าง	0.437	ไม่มีความแตกต่าง	-1.069	ไม่มีความแตกต่าง
10	2.865	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	0.140	ไม่มีความแตกต่าง	-2.469	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 33 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-6.024	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	0.507	ไม่มีความแตกต่าง	-0.040	ไม่มีความแตกต่าง
2	-3.510	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-1.603	ไม่มีความแตกต่าง	-4.401	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
3	3.470	non Cd < Cd 1 Hr <sup>c</sup>	1.891	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	-0.012	ไม่มีความแตกต่าง
4	-2.770	non Cd > Cd 1 Hr <sup>b</sup>	0.071	ไม่มีความแตกต่าง	1.060	ไม่มีความแตกต่าง
5	-0.071	ไม่มีความแตกต่าง	-1.220	ไม่มีความแตกต่าง	-3.827	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
6	0.067	ไม่มีความแตกต่าง	-0.280	ไม่มีความแตกต่าง	-0.315	ไม่มีความแตกต่าง
7	-2.125	non Cd > Cd 1 Hr <sup>b</sup>	2.645	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>b</sup>	1.920	non Cd < Cd 3 Hr <sup>a</sup>
8	-0.714	ไม่มีความแตกต่าง	1.519	ไม่มีความแตกต่าง	-1.367	ไม่มีความแตกต่าง
9	3.936	non Cd < Cd 1 Hr <sup>d</sup>	2.967	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>c</sup>	1.339	ไม่มีความแตกต่าง
10	-4.016	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-5.608	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>d</sup>	-3.513	non Cd > Cd 3 Hr <sup>c</sup>
11	-4.255	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-3.338	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>c</sup>	-4.755	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 34 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับที่ได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	-1.329	ไม่มีความแตกต่าง	1.171	ไม่มีความแตกต่าง	2.046	non Cd < Cd 3 Hr <sup>a</sup>
2	0.778	ไม่มีความแตกต่าง	1.588	ไม่มีความแตกต่าง	0.284	ไม่มีความแตกต่าง
3	-1.136	ไม่มีความแตกต่าง	-0.939	ไม่มีความแตกต่าง	-0.972	ไม่มีความแตกต่าง
4	-5.981	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-6.651	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>d</sup>	-2.624	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
5	-9.205	non Cd > Cd 1 Hr <sup>d</sup>	-5.480	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>d</sup>	-2.663	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
6	-2.244	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-3.117	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>b</sup>	-3.200	non Cd > Cd 3 Hr <sup>o</sup>
7	-1.518	ไม่มีความแตกต่าง	-3.185	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>b</sup>	-2.699	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
8	-3.119	non Cd > Cd 1 Hr <sup>b</sup>	-3.557	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>c</sup>	-3.372	non Cd > Cd 3 Hr <sup>c</sup>
9	-3.482	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-4.304	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>o</sup>	-4.487	non Cd > Cd 3 Hr <sup>d</sup>
10	-3.708	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-4.256	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>c</sup>	-2.554	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
11	-3.634	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-4.917	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>o</sup>	-2.044	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
12	-2.493	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-3.370	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>c</sup>	-2.279	non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
13	-2.302	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-1.287	ไม่มีความแตกต่าง	-1.041	ไม่มีความแตกต่าง
14	-1.052	ไม่มีความแตกต่าง	0.084	ไม่มีความแตกต่าง	-1.103	ไม่มีความแตกต่าง
15	0.491	ไม่มีความแตกต่าง	1.164	ไม่มีความแตกต่าง	-1.111	ไม่มีความแตกต่าง
16	1.535	ไม่มีความแตกต่าง	1.608	ไม่มีความแตกต่าง	-1.586	ไม่มีความแตกต่าง
17	1.577	ไม่มีความแตกต่าง	1.540	ไม่มีความแตกต่าง	-1.629	ไม่มีความแตกต่าง
18	1.618	ไม่มีความแตกต่าง	1.735	ไม่มีความแตกต่าง	-1.370	ไม่มีความแตกต่าง
19	1.600	ไม่มีความแตกต่าง	1.521	ไม่มีความแตกต่าง	-0.894	ไม่มีความแตกต่าง
20	1.875	non Cd < Cd 1 Hr <sup>a</sup>	2.034	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>o</sup>	-0.264	ไม่มีความแตกต่าง
21	1.720	ไม่มีความแตกต่าง	2.411	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.120	ไม่มีความแตกต่าง
22	1.451	ไม่มีความแตกต่าง	2.684	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.172	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 35 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับที่ได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับแคดเมียม 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ Cd 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	0.199	ไม่มีความแตกต่าง	1.354	ไม่มีความแตกต่าง	-0.783	ไม่มีความแตกต่าง
2	0.416	ไม่มีความแตกต่าง	1.927	Non Cd < Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.803	ไม่มีความแตกต่าง
3	0.672	ไม่มีความแตกต่าง	1.516	ไม่มีความแตกต่าง	0.446	ไม่มีความแตกต่าง
4	-0.356	ไม่มีความแตกต่าง	0.547	ไม่มีความแตกต่าง	0.222	ไม่มีความแตกต่าง
5	-1.203	ไม่มีความแตกต่าง	0.099	ไม่มีความแตกต่าง	-0.753	ไม่มีความแตกต่าง
6	-1.285	ไม่มีความแตกต่าง	0.356	ไม่มีความแตกต่าง	-0.101	ไม่มีความแตกต่าง
7	-2.046	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-0.074	ไม่มีความแตกต่าง	1.079	ไม่มีความแตกต่าง
8	-2.375	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-2.223	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.750	ไม่มีความแตกต่าง
9	-1.263	ไม่มีความแตกต่าง	-0.754	ไม่มีความแตกต่าง	0.877	ไม่มีความแตกต่าง
10	-2.374	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-0.426	ไม่มีความแตกต่าง	2.129	Non Cd < Cd 3 Hr <sup>a</sup>
11	-3.340	non Cd > Cd 1 Hr <sup>c</sup>	-0.669	ไม่มีความแตกต่าง	2.412	Non Cd < Cd 3 Hr <sup>a</sup>
12	-2.026	non Cd > Cd 1 Hr <sup>a</sup>	-2.070	Non Cd > Cd 2 Hr <sup>a</sup>	0.700	ไม่มีความแตกต่าง
13	-1.545	ไม่มีความแตกต่าง	-1.809	ไม่มีความแตกต่าง	-1.394	ไม่มีความแตกต่าง
14	-0.563	ไม่มีความแตกต่าง	-1.134	ไม่มีความแตกต่าง	-1.951	Non Cd > Cd 3 Hr <sup>a</sup>
15	-0.450	ไม่มีความแตกต่าง	-1.165	ไม่มีความแตกต่าง	-1.018	ไม่มีความแตกต่าง
16	0.910	ไม่มีความแตกต่าง	0.147	ไม่มีความแตกต่าง	-1.560	ไม่มีความแตกต่าง
17	0.773	ไม่มีความแตกต่าง	0.045	ไม่มีความแตกต่าง	-1.468	ไม่มีความแตกต่าง
18	0.577	ไม่มีความแตกต่าง	0.070	ไม่มีความแตกต่าง	-1.223	ไม่มีความแตกต่าง
19	0.518	ไม่มีความแตกต่าง	-0.315	ไม่มีความแตกต่าง	-1.290	ไม่มีความแตกต่าง
20	0.451	ไม่มีความแตกต่าง	-0.502	ไม่มีความแตกต่าง	-0.774	ไม่มีความแตกต่าง
21	-0.148	ไม่มีความแตกต่าง	-0.343	ไม่มีความแตกต่าง	-0.414	ไม่มีความแตกต่าง
22	-1.295	ไม่มีความแตกต่าง	-0.421	ไม่มีความแตกต่าง	-0.098	ไม่มีความแตกต่าง

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



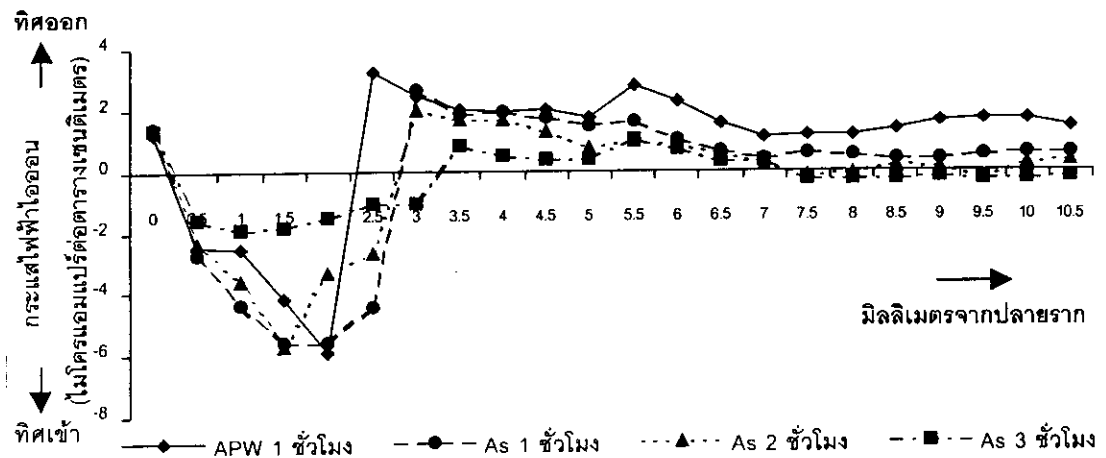
ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก



### 3.5.3 ผลของอาร์ซีนิค

ศึกษาผลของอาร์ซีนิค โดยใช้อาร์ซีนิค ( $As^{3+}$ ) ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ โดยเริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 จากนั้นเปลี่ยนสารละลาย APW pH 6.00 เป็นสารละลาย APW ที่มีอาร์ซีนิค

เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW ที่มีอาร์ซีนิคเปรียบเทียบกับในสารละลาย APW สภาวะปกติ พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและมีทิศออกจากรากตั้งแต่อาณาเขตเซลล์ยึดตัวจนถึงอาณาเขตขนรากด้วยขนาดที่ลดลง (ภาพประกอบ 58)



ภาพประกอบ 58 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอาร์ซีนิคความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละรากพบว่า กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลงหลังจากได้รับอาร์ซีนิค ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 จำนวน 3, 6 และ 10 รากจากทั้งหมด 11 ราก ในช่วงเวลาที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ตาราง 38) เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนในแต่ละตำแหน่ง (ตาราง 39) พบว่าหลังจากรากทานตะวันได้รับอาร์ซีนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ตำแหน่ง 1-4 หรืออาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปลี่ยนเป็นมีแนวโน้มลดลงในช่วงเวลาที่ 2 และลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลาที่ 3 และ

ตำแหน่งที่ 6-22 ซึ่งเป็นอาณาเขตของเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนราก กระแสไฟฟ้าไอออนมีแนวโน้มลดลงในช่วงที่ 1 และลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงที่ 2 และ 3

เมื่อนำผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนทั้ง 11 ราก มาหาค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสไฟฟ้าและทดสอบสัดส่วนของทิศของกระแสไฟฟ้า (ตาราง 40 และภาพประกอบ 59) พบว่า ทั้งในสภาพะปกติและหลังจากได้รับอาร์ซีนิคเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ให้ผลคล้ายคลึงกันคือ กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวและมีทิศออกจากรากบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนราก ยกเว้นในช่วงที่ 3 อาณาเขตชนรากไม่แสดงนัยสำคัญของทิศของกระแสไฟฟ้าไอออน

กล่าวโดยสรุป อาร์ซีนิค 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าไอออนมีขนาดลดลง ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญบริเวณอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตชนราก โดยจะแสดงผลชัดเจนขึ้นตามระยะเวลาที่ได้รับอาร์ซีนิค

ตาราง 38 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับอาร์ซีนิค 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง  
A) APW 1 ชั่วโมงกับอาร์ซีนิค 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอาร์ซีนิค 2 ชั่วโมง  
C) APW 1 ชั่วโมงกับอาร์ซีนิค 3 ชั่วโมง

รากที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ As 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ As 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ As 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.451	ไม่มีความแตกต่าง	0.052	ไม่มีความแตกต่าง	-3.819	non As > As 3 Hr <sup>d</sup>
2	-1.170	ไม่มีความแตกต่าง	-2.044	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-3.437	non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
3	0.402	ไม่มีความแตกต่าง	-4.724	non As > As 2 Hr <sup>d</sup>	-3.784	non As > As 3 Hr <sup>d</sup>
4	0.458	ไม่มีความแตกต่าง	-1.684	ไม่มีความแตกต่าง	-3.344	non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
5	-0.474	ไม่มีความแตกต่าง	-3.434	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-4.038	non As > As 3 Hr <sup>d</sup>
6	1.523	ไม่มีความแตกต่าง	-1.595	ไม่มีความแตกต่าง	-1.264	ไม่มีความแตกต่าง
7	-1.555	ไม่มีความแตกต่าง	-3.821	non As > As 2 Hr <sup>d</sup>	-7.499	non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
8	-2.975	non As > As 1 Hr <sup>c</sup>	-4.925	non As > As 2 Hr <sup>d</sup>	-4.159	non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
9	-3.895	non As > As 1 Hr <sup>d</sup>	-3.439	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-4.530	non As > As 3 Hr <sup>d</sup>
10	-1.978	non As > As 1 Hr <sup>a</sup>	-1.661	ไม่มีความแตกต่าง	-3.646	non As > As 3 Hr <sup>d</sup>
11	-0.170	ไม่มีความแตกต่าง	0.222	ไม่มีความแตกต่าง	-2.507	non As > As 3 Hr <sup>a</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$

ตาราง 39 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับที่ได้รับอาริซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง A) APW 1 ชั่วโมงกับอาริซินิก 1 ชั่วโมง B) APW 1 ชั่วโมงกับอาริซินิก 2 ชั่วโมง C) APW 1 ชั่วโมงกับอาริซินิก 3 ชั่วโมง

ตำแหน่งที่	A) APW 1 ชั่วโมงกับ As 1 ชั่วโมง		B) APW 1 ชั่วโมงกับ As 2 ชั่วโมง		C) APW 1 ชั่วโมงกับ As 3 ชั่วโมง	
	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	1.593	ไม่มีความแตกต่าง	-0.472	ไม่มีความแตกต่าง	-2.385	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
2	0.968	ไม่มีความแตกต่าง	-0.146	ไม่มีความแตกต่าง	-2.803	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
3	2.182	non As < As 1 Hr <sup>a</sup>	1.568	ไม่มีความแตกต่าง	-2.411	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
4	1.480	ไม่มีความแตกต่าง	0.303	ไม่มีความแตกต่าง	-3.093	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
5	-1.725	ไม่มีความแตกต่าง	-2.482	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-2.930	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
6	-0.565	ไม่มีความแตกต่าง	-2.704	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-3.734	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
7	-0.643	ไม่มีความแตกต่าง	-2.435	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-3.882	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
8	-0.564	ไม่มีความแตกต่าง	-1.706	ไม่มีความแตกต่าง	-2.774	Non As > As 3 Hr <sup>b</sup>
9	-1.425	ไม่มีความแตกต่าง	-2.377	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-2.067	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
10	-2.179	non As > As 1 Hr <sup>a</sup>	-2.642	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-1.934	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
11	-1.995	non As > As 1 Hr <sup>a</sup>	-3.037	non As > As 2 Hr <sup>b</sup>	-3.359	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
12	-1.365	ไม่มีความแตกต่าง	-2.943	non As > As 2 Hr <sup>b</sup>	-4.747	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
13	-0.768	ไม่มีความแตกต่าง	-2.890	non As > As 2 Hr <sup>b</sup>	-3.433	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
14	-1.358	ไม่มีความแตกต่าง	-3.988	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-3.482	Non As > As 3 Hr <sup>b</sup>
15	-0.484	ไม่มีความแตกต่าง	-3.847	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-4.148	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
16	-0.647	ไม่มีความแตกต่าง	-2.702	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-4.621	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
17	-0.689	ไม่มีความแตกต่าง	-2.686	non As > As 2 Hr <sup>a</sup>	-5.161	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
18	-1.323	ไม่มีความแตกต่าง	-3.452	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-4.351	Non As > As 3 Hr <sup>a</sup>
19	-0.839	ไม่มีความแตกต่าง	-3.001	non As > As 2 Hr <sup>b</sup>	-4.094	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>
20	-1.579	ไม่มีความแตกต่าง	-3.747	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-3.056	Non As > As 3 Hr <sup>b</sup>
21	-1.504	ไม่มีความแตกต่าง	-3.187	non As > As 2 Hr <sup>c</sup>	-3.018	Non As > As 3 Hr <sup>b</sup>
22	-1.317	ไม่มีความแตกต่าง	-2.928	non As > As 2 Hr <sup>b</sup>	-3.830	Non As > As 3 Hr <sup>c</sup>

a แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.05$

b แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.01$

c แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.005$

d แสดงระดับความมีนัยสำคัญที่  $P < 0.001$



ตำแหน่งที่ 1 ระยะ 0.0-0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตหมวกราก



ตำแหน่งที่ 2-5 ระยะ 0.5-2.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว



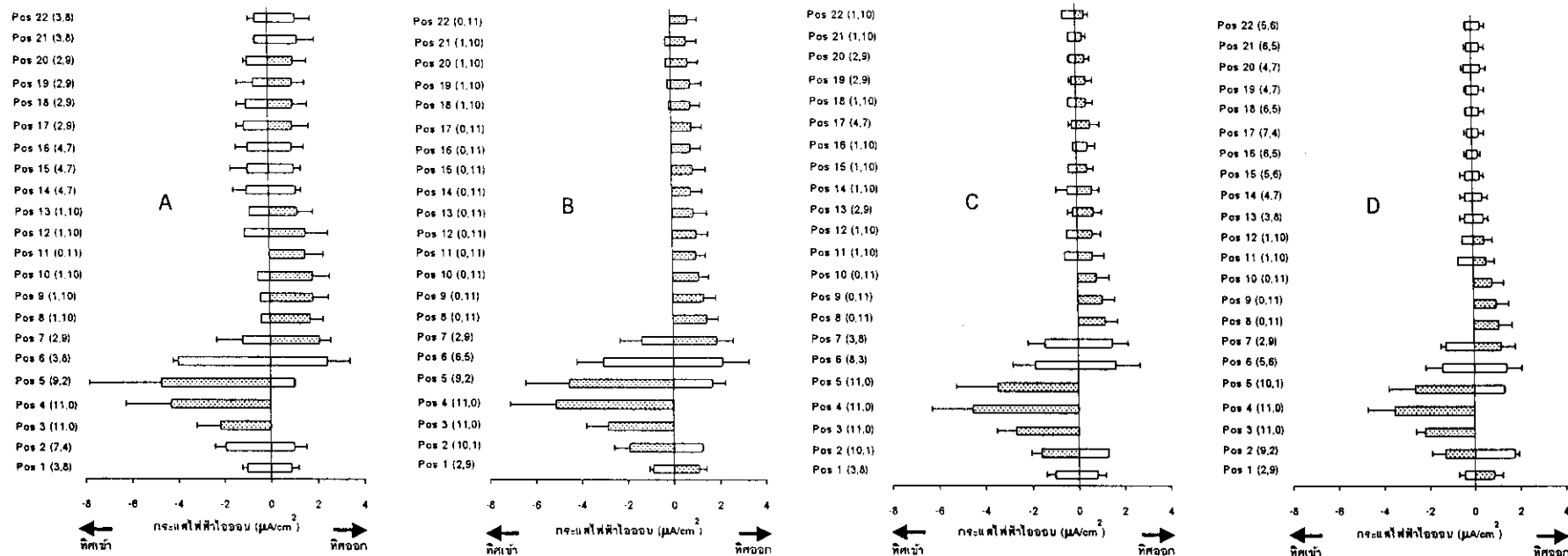
ตำแหน่งที่ 6-16 ระยะ 2.5-7.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัว



ตำแหน่งที่ 17-22 ระยะ 7.5-10.5 มิลลิเมตรจากปลายราก เป็นอาณาเขตขนราก

ตาราง 40 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทันทะวันใน APW pH 6.00 และในสภาวะที่มีอาร์จีนิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก n คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในท่อนี้ nc คือไม่สามารถคำนวณค่าได้ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 2 ค่า   แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

ตำแหน่ง ที่	ความยาว จาก ปลายราก (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้าไอออน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)															
		ใน APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีอาร์จีนิก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีอาร์จีนิก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง				ในสภาวะที่มีอาร์จีนิก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.0	-1.02	0.23	0.91	0.26	-0.92	0.15	1.11	0.29	-1.01	0.38	0.84	0.35	-0.45	0.26	0.67	0.33
2	0.5	-1.94	0.47	1.02	0.50	-1.92	0.69	1.25	nc	-1.61	0.45	1.31	nc	-1.30	0.58	1.78	0.14
3	1.0	-2.17	1.05	n	nc	-2.87	0.93	n	nc	-2.69	0.82	n	nc	-2.20	0.39	n	nc
4	1.5	-4.32	1.95	n	nc	-5.12	1.99	n	nc	-4.54	1.76	n	nc	-3.53	1.18	n	nc
5	2.0	-4.73	3.11	1.04	nc	-4.54	1.88	1.70	0.53	-3.48	1.79	n	nc	-2.60	1.16	1.33	nc
6	2.5	-3.99	0.23	2.46	0.94	-3.04	1.16	2.15	1.13	-1.85	0.97	1.64	1.04	-1.39	0.74	1.42	0.64
7	3.0	-1.20	1.11	2.12	0.47	-1.35	0.96	1.91	0.68	-1.45	0.73	1.50	0.67	-1.23	0.24	1.20	0.59
8	3.5	-0.39	nc	1.74	0.53	n	nc	1.48	0.48	n	nc	1.21	0.50	n	nc	1.17	0.56
9	4.0	-0.42	nc	1.86	0.66	n	nc	1.37	0.48	n	nc	1.09	0.50	n	nc	0.93	0.52
10	4.5	-0.50	nc	1.85	0.72	n	nc	1.15	0.39	n	nc	0.84	0.55	n	nc	0.82	0.49
11	5.0	n	nc	1.53	0.76	n	nc	1.04	0.40	-0.55	nc	0.68	0.49	-0.68	nc	0.56	0.35
12	5.5	-1.07	nc	1.56	0.95	n	nc	1.06	0.47	-0.45	nc	0.68	0.35	-0.50	nc	0.49	0.35
13	6.0	-0.85	nc	1.21	0.67	n	nc	0.95	0.55	-0.18	0.21	0.74	0.32	-0.39	0.20	0.45	0.21
14	6.5	-0.99	0.56	1.16	0.20	n	nc	0.85	0.46	-0.40	0.49	0.67	0.30	-0.34	0.22	0.42	0.21
15	7.0	-0.93	0.72	1.11	0.27	n	nc	0.95	0.50	-0.37	nc	0.47	0.28	-0.34	0.23	0.31	0.16
16	7.5	-0.90	0.52	1.02	0.49	n	nc	0.84	0.45	-0.13	nc	0.50	0.33	-0.25	0.10	0.23	0.12
17	8.0	-1.04	0.33	1.06	0.67	n	nc	0.90	0.43	-0.20	0.15	0.61	0.40	-0.24	0.11	0.28	0.23
18	8.5	-0.95	0.40	1.08	0.61	-0.10	nc	0.85	0.42	-0.33	nc	0.44	0.31	-0.27	0.02	0.30	0.22
19	9.0	-0.63	0.70	1.06	0.50	-0.15	nc	0.85	0.47	-0.19	0.11	0.45	0.27	-0.26	0.08	0.32	0.21
20	9.5	-0.90	0.16	1.09	0.57	-0.23	nc	0.77	0.42	-0.26	0.06	0.39	0.19	-0.36	0.10	0.39	0.21
21	10.0	-0.53	0.07	1.29	0.72	-0.23	nc	0.70	0.43	-0.31	nc	0.30	0.15	-0.23	0.10	0.34	0.20
22	10.5	-0.53	0.32	1.20	0.63	n	nc	0.77	0.39	-0.55	nc	0.48	0.16	-0.25	0.07	0.39	0.17



ภาพประกอบ 59 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ( $\pm$ SD) ภายนอกากทวนตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 6.00 (A) และเมื่อรากได้รับ อาริซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก ส่วนที่แรงแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากราก

(A) หลังจากแช่อยู่ใน APW 1 ชั่วโมง

(B) หลังจากได้รับอาริซินิก 1 ชั่วโมง

(C) หลังจากได้รับอาริซินิก 2 ชั่วโมง

(D) หลังจากได้รับอาริซินิก 3 ชั่วโมง

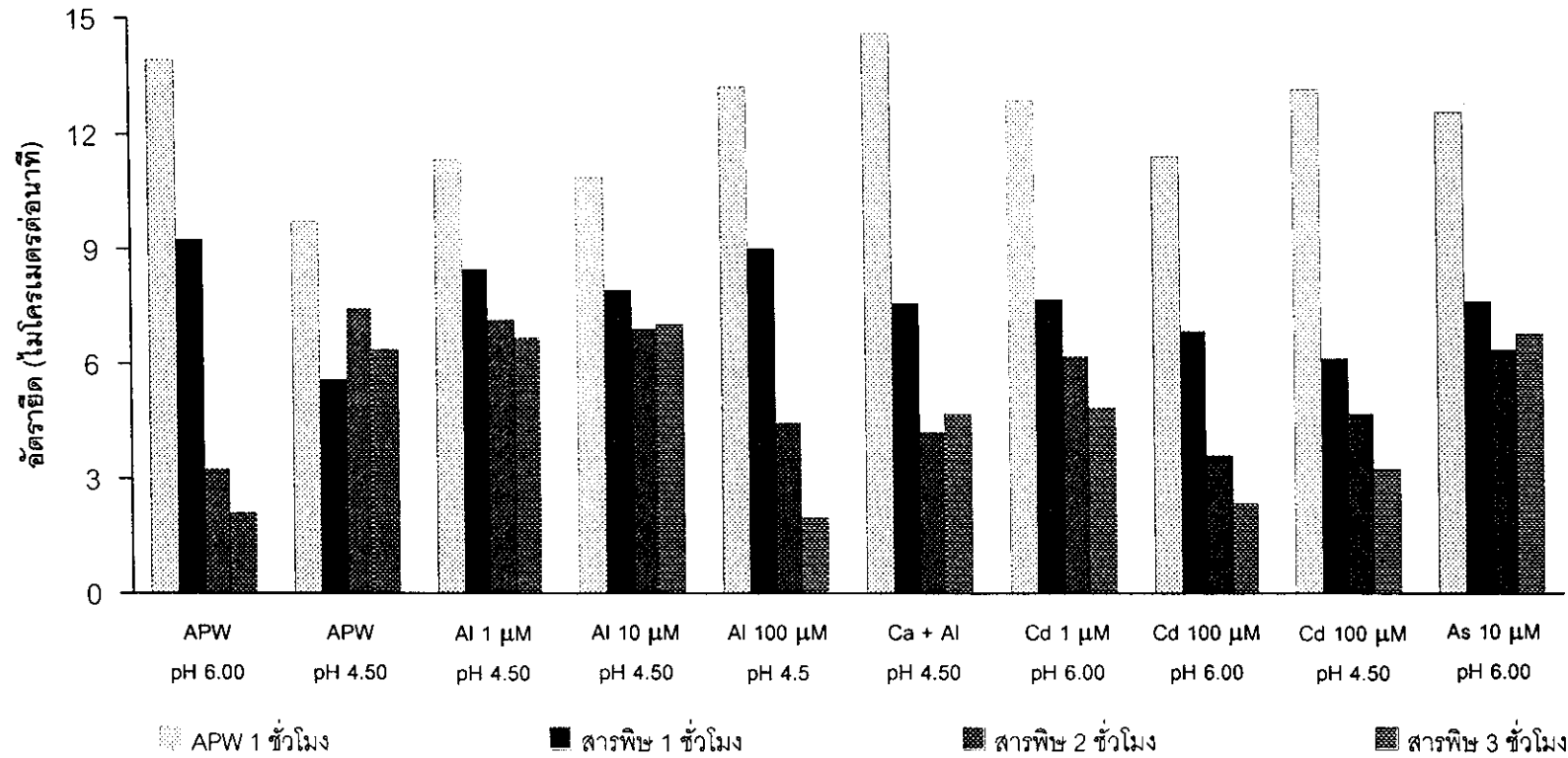
### 3.6 ผลของสารพิษที่มีต่ออัตราการยึดของรากทานตะวัน

วัดอัตราการยึดของรากทานตะวันโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรากทานตะวันผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ จำนวน 4 ครั้งต่อราก ห่างกันครั้งละ 1 ชั่วโมง ผลแสดงดังตาราง 41 ภาพประกอบ 60

ตาราง 41 แสดงอัตราการยึดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรากทานตะวันพันธุ์แปซิฟิก 33 ในสภาวะปกติและหลังจากได้รับสารพิษ

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	อัตราการยึด (ไมโครเมตรต่ออนาที)				จำนวนราก
	APW 1 ชั่วโมง	สารพิษ 1 ชั่วโมง	สารพิษ 2 ชั่วโมง	สารพิษ 3 ชั่วโมง	
สภาวะปกติ APW pH 6.00	9.7 ± 3.0	5.6 ± 1.8	7.4 ± 2.4	6.4 ± 0.5	7
สภาวะปกติ APW pH 4.50	13.9 ± 3.0	9.2 ± 1.0	3.2 ± 0.9	2.1 ± 0.5	5
อลูมิเนียม 1 μM pH 4.50	11.4 ± 1.1	8.4 ± 1.3	7.2 ± 1.8	6.6 ± 2.3	6
อลูมิเนียม 10 μM pH 4.50	10.9 ± 0.6	7.9 ± 1.8	6.9 ± 1.9	7.0 ± 2.2	5
อลูมิเนียม 100 μM pH 4.50	13.2 ± 3.3	9.0 ± 1.1	4.4 ± 1.5	2.0 ± 1.0	12
อลูมิเนียม 10 μM ที่มี แคลเซียม 0.2 mM pH 4.50	14.6 ± 2.3	7.6 ± 1.2	4.2 ± 1.3	4.7 ± 0.9	6
แคดเมียม 1 μM pH 6.00	12.9 ± 3.7	7.7 ± 3.2	6.2 ± 1.5	4.9 ± 1.4	8
แคดเมียม 100 μM pH 6.00	11.4 ± 2.8	6.9 ± 1.0	3.6 ± 0.4	2.4 ± 0.6	5
แคดเมียม 100 μM pH 4.50	13.1 ± 3.0	6.1 ± 1.8	4.7 ± 1.4	3.2 ± 0.8	6
อาร์ซีนิก 10 μM pH 6.00	12.5 ± 3.1	7.6 ± 2.2	6.4 ± 1.9	6.8 ± 2.6	7

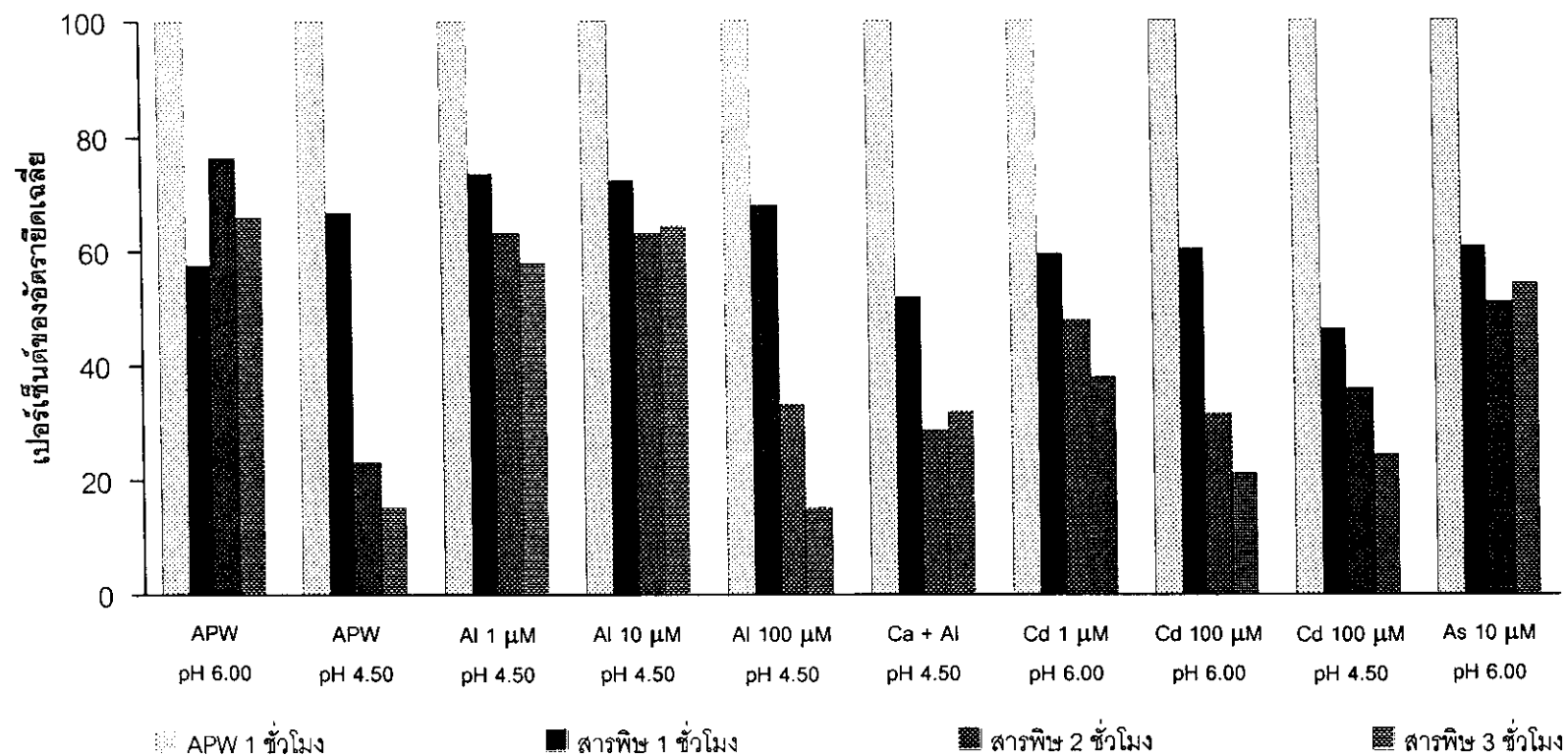
หมายเหตุ ในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และ pH 6.00 สารพิษ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง แทนด้วย APW 2, 3 และ 4 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 60 เปรียบเทียบอัตรายึดเฉลี่ยของรากทานตะวันระหว่างสภาวะปกติในสารละลาย APW และหลังจากได้รับสารพิษสภาวะต่างๆ  
หมายเหตุ ในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และ pH 6.00 สารพิษ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง แทนด้วย APW 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบอัตรายึดของรากทานตะวัน ในชั่วโมงที่ 2, 3 และ 4 หรือในกรณีที่มีสารพิษกับอัตรายึดในชั่วโมงที่ 1 หรือในสภาวะปกติ พบว่าทุกการทดลองอัตรายึดในชั่วโมงที่ 2, 3 และ 4 จะมีย่าน้อยกว่าในชั่วโมงที่ 1 แต่เนื่องจากอัตรายึดในสภาวะปกติของชั่วโมงที่ 1 ของแต่ละการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน จึงนำค่าอัตรายึดในตาราง 41 มาคำนวณอัตรายึดสัมพัทธ์ โดยให้อัตรายึดใน APW 1 ชั่วโมงเป็น 100% โดยผลดังกล่าวแสดงในภาพประกอบ 61 โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตรายึดในชั่วโมงที่ 2, 3 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตรายึดในชั่วโมงที่ 1 แสดงในตาราง 42





ภาพประกอบ 61 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอัตรายืดเจลียของรากทานตะวันระหว่างสภาวะปกติในสารละลาย APW และหลังจากได้รับสารพิษสภาวะต่างๆ  
หมายเหตุ ในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และ pH 6.00 สารพิษ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง แทนด้วย APW 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

ตาราง 42 แสดงการลดลงของอัตรายึดของรากทานตะวันพันธุ์แปซิฟิก 33 เปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติและหลังจากได้รับสารพิษ

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	การลดลงของอัตรายึด (เปอร์เซ็นต์)		
	สารพิษ 1 ชั่วโมง	สารพิษ 2 ชั่วโมง	สารพิษ 3 ชั่วโมง
สภาวะปกติ APW pH 6.00	42.6	23.4	34.2
สภาวะปกติ APW pH 4.50	33.8	76.9	84.9
อลูมิเนียม 1 $\mu\text{M}$ pH 4.50	25.8	37.0	41.5
อลูมิเนียม 10 $\mu\text{M}$ pH 4.50	27.5	36.4	35.5
อลูมิเนียม 100 $\mu\text{M}$ pH 4.50	31.5	66.4	85.1
อลูมิเนียม 10 $\mu\text{M}$ ที่มีแคลเซียม 0.2 mM pH 4.50	48.1	71.3	67.9
แคดเมียม 1 $\mu\text{M}$ pH 6.00	40.3	52.0	61.9
แคดเมียม 100 $\mu\text{M}$ pH 6.00	39.9	68.6	79.3
แคดเมียม 100 $\mu\text{M}$ pH 4.50	53.3	64.4	75.4
อาร์ซีนิก 10 $\mu\text{M}$ pH 6.00	39.0	49.1	45.7

หมายเหตุ ในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และ pH 6.00 สารพิษ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง แทนด้วย APW 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า ในทุกสภาวะที่ศึกษา อัตรายึดของรากทานตะวันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอัตรายึดของรากใน pH 4.50 และใน pH 6.00 ที่ไม่มีสารพิษพบว่า pH มีผลต่ออัตรายึดของรากทานตะวันคือ ในสารละลาย APW pH 4.50 ชั่วโมงที่ 1 มีอัตรายึดมากกว่าที่ pH 6.00 แต่จะลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงถัดไป และจากการสังเกตพบว่าบริเวณปลายรากของรากทานตะวันใน pH 4.50 ซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัวเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นคาดว่า pH 4.50 น่าจะเป็นพิษต่อรากทานตะวัน เนื่องจากทานตะวันเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีระดับ pH ประมาณ 5.7-8.0 (กลุ่มพืชน้ำมัน, 2542) ซึ่งคล้ายคลึงกับที่ Arduini และคณะ (1998) พบในรากของต้นสนทะเล *Pinus pinaster* Ait ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4.50-5.50 แต่ที่ pH 3.50 และ pH 6.50 อัตรายึดของรากสนทะเลจะลดลง

เมื่อพิจารณาผลของอลูมิเนียมต่ออัตรายึดพบว่า อลูมิเนียม 1 และ 10 ไมโครโมลาร์ แสดงผลคล้ายกับสภาวะปกติ APW pH 6.00 ดังนั้นการลดลงของอัตรายึดของรากทานตะวันใน

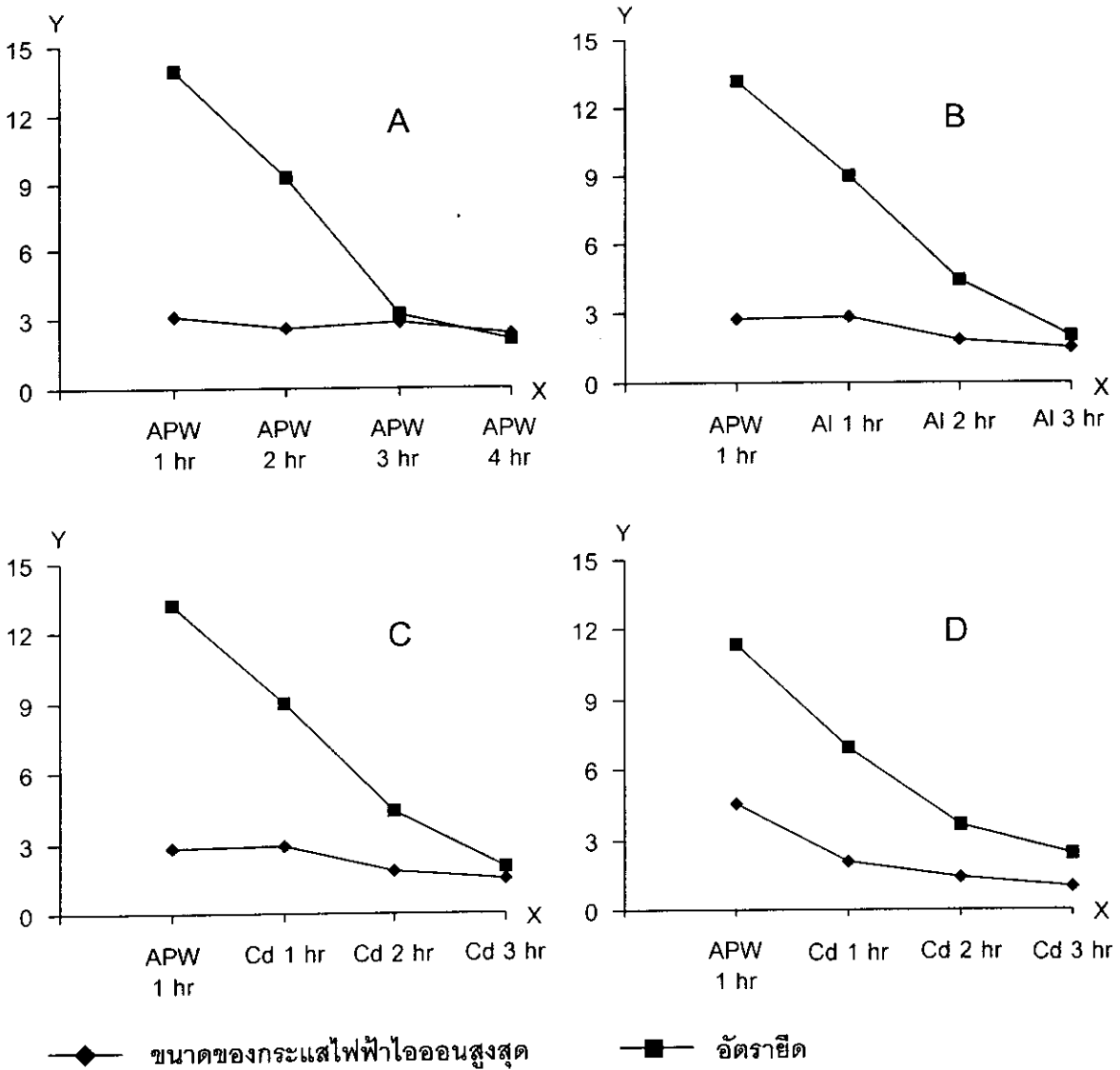
สารละลายอลูมิเนียม 1 และ 10 ไมโครโมลาร์ อาจจะเป็นผลของเวลาไม่ใช่สารพิษ แต่กรณีอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์พบว่าอัตรายี่ดลดลงอย่างชัดเจน แสดงว่าอลูมิเนียมมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน ซึ่งตรงกับที่พบในพืชหลายชนิดว่าอลูมิเนียมความเข้มข้นตั้งแต่ 50 ไมโครโมลาร์ขึ้นไปจะมีผลต่อราก (Nichol *et al.*, 1993; Pan *et al.*, 2001) ส่วนในกรณีที่เพิ่มแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ในสารละลายอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ให้ผลเช่นเดียวกับอัตรายี่ดของรากทานตะวันในสารละลายอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ ทั้งนี้ น่าจะเนื่องจากปริมาณของอลูมิเนียมและ/หรือแคลเซียมน้อยเกินไปที่จะสังเกตเห็นผลได้

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมใน pH 6.00 ต่ออัตรายี่ด อัตรายี่ดที่ลดลงนี้น่าจะเป็นผลของแคดเมียมไม่ใช่ผลของเวลา เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตรายี่ดที่สภาวะปกติ APW pH 6.00 พบว่าอัตรายี่ดลดลงมากกว่าอย่างชัดเจน (ภาพประกอบ 61) ซึ่งคล้ายกับที่ Nocito และคณะ (2002) พบว่าแคดเมียม 10 ไมโครโมลาร์ลดการเจริญเติบโตของรากข้าวโพด (*Zea mays*) และแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์มีผลต่ออัตรายี่ดมากกว่าแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ เช่นเดียวกับที่ Zhang และ Yang (1994) พบว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตของรากข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคดเมียมที่รากได้รับ ส่วนกรณีแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 อัตรายี่ดลดลงในช่วงแรกมากกว่าที่ pH 6.00 คาดว่าน่าจะเป็นผลจาก pH ด้วย

ในกรณีของอาร์ซีนิค 10 ไมโครโมลาร์ การลดลงของอัตรายี่ดไม่แตกต่างจากกรณี APW สภาวะปกติที่ pH 6.00 ซึ่งคาดว่าอาจจะเนื่องจากความเข้มข้นของอาร์ซีนิคมีค่าไม่สูงนัก ประกอบกับความเป็นพิษของอาร์ซีนิคต่อพืชจะเป็นไปอย่างช้าๆ โดย Päivöke และ Simola (2001) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของถั่ว *Pisum sativum* L. จะถูกยับยั้งหลังจากได้รับอาร์ซีนิค 107 ไมโครโมลาร์ ไปแล้ว 12 วัน นอกจากนี้ Ngu และคณะ (1998) ได้ศึกษาเชื้อรา (*Fusarium pathogens of cereals*) 6 สายพันธุ์ พบว่าอาร์ซีนิคจะใช้เวลามากกว่าแคดเมียมและตะกั่วในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายี่ดกับกระแสไฟฟ้าที่ค้ำสูงสุดบริเวณอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว ในแต่ละสภาวะการทดลองได้เขียนกราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าดังกล่าวที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกับอัตรายี่ดดังตัวอย่างที่แสดงในภาพประกอบ 62 พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารพิษ (APW pH 6.00) หรือในกรณีที่สารพิษไม่แสดงผลต่ออัตรายี่ด (อลูมิเนียม 1 และ 10 ไมโครโมลาร์ แคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์และอาร์ซีนิค 10 ไมโครโมลาร์) การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าตามเวลาไม่เป็นไปในแนวโน้มเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของอัตรายี่ด ส่วนในสภาวะการทดลองที่มีผลต่ออัตรายี่ดอย่างชัดเจนได้แก่ APW pH 4.50 อลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 แคดเมียม

100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 และแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 พบว่ากระแสไฟฟ้าลดลงตามอัตรายี่ด เฉพาะในกรณีของอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 และแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 (ภาพประกอบ 62BและD) ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีส่วนเกี่ยวข้องกับอัตรายี่ดของราก ส่วนอีกสองกรณีเห็นผลไม่ชัดเจน สิ่งที่น่าสังเกตคือในสองกรณีที่ไม่เห็นผล (ภาพประกอบ 62AและC) และกรณีของอลูมิเนียมที่กระแสไฟฟ้าไม่ได้ลดลงทันที (ภาพประกอบ62B) เป็นสถานะที่ให้อ APW pH 4.50 ดังนั้นเป็นไปได้ว่าอาจจะมีกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องกับความเป็นพิษของ pH แต่ไม่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้อัตรายี่ดลดลง



ภาพประกอบ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (X) กับขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนสูงสุด (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) (Y) และความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (X) กับอัตรายึด (ไมโครเมตรต่อนาทีก) (Y)

(A) ในสารละลาย APW pH 4.50 (B) ในสารละลายอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 (C) ในสารละลายแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 (D) ในสารละลายแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00