



รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน
Pattern of Ionic Currents around Sunflower Roots

จุฬารกรณ์ ม่วงดิษฐ์
Chulaphorn Muangdit

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Science Thesis in Physics
Prince of Songkla University

2544

๑

เลขที่	QC 702	๗๗5	2544	ผ.๒
Bib Key	218 495			


ชื่อวิทยานิพนธ์ รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน
ผู้เขียน นางสาวจุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์
สาขาวิชา ฟิสิกส์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

.....ปณต. ถาวรังกูร.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปณต. ถาวรังกูร)


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิต แก้วนพรัตน์)

.....ปณต. ถาวรังกูร.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปณต. ถาวรังกูร)


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิต แก้วนพรัตน์)

.....ภราดร ภัคดีวานิช.....กรรมการ

(ดร.ภราดร ภัคดีวานิช)

.....ชุกศักดิ์ ลิ้มสกุล.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุกศักดิ์ ลิ้มสกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎีคุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน
ผู้เขียน	นางสาวจุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันโดยระบบไวเบรติงโพรบ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย ในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย artificial pond water (APW) ที่สภาวะปกติ (pH 6.00) ใช้รากทานตะวัน 2 แบบ คือแบบตัดหว่ามราก ซึ่งยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร และแบบไม่ตัดหว่ามราก ซึ่งยาว 1.0-1.5 เซนติเมตร พบกระแสไฟฟ้าไอออน 4 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากบริเวณปลายรากด้วยขนาด 1.2-6.2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และออกจากรากที่ส่วนอื่นๆ ของรากด้วยขนาด 0.4-4.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในรูปแบบที่ 2 กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากใน 2 ช่วง คือบริเวณปลายราก (1.3-3.8 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) และบริเวณรอยต่อระหว่างอาณาเขตเซลล์ยึดตัวกับอาณาเขตขนราก (0.3-2.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) และในส่วนอื่นๆ ของรากกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากราก (0.4-4.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ในรูปแบบที่ 3 ด้านหนึ่งของรากกระแสไฟฟ้ามีรูปแบบเหมือนรูปแบบที่ 1 ส่วนอีกด้านหนึ่งมีรูปแบบเหมือนรูปแบบที่ 2 และในรูปแบบที่ 4 กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณปลายรากและมีทิศเข้าบริเวณถัดขึ้นมาในรากที่สั้นและไม่ตัดหว่ามราก (1.0-1.5 เซนติเมตร) มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 1 มากที่สุด (18 จาก 30 ราก) แต่ในรากที่ยาวกว่าที่ตัดหว่ามราก (1.5-2.0 เซนติเมตร) พบกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 มากที่สุด (17 จาก 39 ราก) จึงคาดว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับ การเจริญเติบโตของราก

นอกจากนี้ยังพบว่า pH มีผลต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนและการเจริญเติบโตของราก โดยพบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าและอัตรายึดของรากจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.10$) เมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH น้อยลง ซึ่งมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นแสดงว่าไฮโดรเจนไอออนน่าจะเป็นไอออนหลักของการเกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของราก ส่วนในกรณีที่สารละลาย APW ไม่มี Ca^{2+} , K^+ , Na^+ และ Cl^- พบว่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

Thesis Title Pattern of Ionic Currents around Sunflower Roots
Author Miss Chulaphorn Muangdit
Major Program Physics
Academic Year 2001

Abstract

Ionic currents around sunflower roots were investigated using a vibrating probe system which can detect small currents. At a normal condition of artificial pond water (APW) (pH 6.00) ionic currents around longer, decapped roots (1.5-2.0 cm.) and shorter capped roots (1.0-1.5 cm.) were investigated. Four patterns of ionic current were observed. In pattern I, currents of about $1.2-6.2 \mu\text{Acm}^{-2}$ entered the root tip and left along the rest of the root with a density of $0.4-4.7 \mu\text{Acm}^{-2}$. In pattern II, currents flowed into the root in two regions, that is, the root tip ($1.3-8.8 \mu\text{Acm}^{-2}$) and the area between the elongation and the root hair ($0.3-2.0 \mu\text{Acm}^{-2}$) zones and flowed out in other areas ($0.4-4.7 \mu\text{Acm}^{-2}$). In pattern III, currents on one side of the root had the same pattern as pattern I and the other side the same as pattern II. In the last pattern, pattern IV, currents left the root tip and flowed into the adjacent region. The most observed current pattern in the shorter capped roots was pattern I (18 from 30 roots) while in the longer decapped roots it was pattern II (17 from 39 roots). The results suggested that the current pattern may play a role in root growth.

pH also affect the ionic currents. The magnitude of the currents increased significantly ($P < 0.10$) as pH of the medium decreased. Since lower pH medium has a larger amount of H^+ this indicated that H^+ was the main carrier ion of these currents. At lower pH the root elongation rate also increased significantly ($P < 0.10$). This suggested that the magnitude of these H^+ ionic currents was associated with growth. When Ca^{2+} , K^+ , Na^+ or Cl^- was removed in the ion substitution experiments the change in the ionic currents was not significant.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.ปณต ภาวรังกูร อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิต แก้วนพรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดมาตั้งแต่ต้นจนจบการศึกษา ผู้ทำวิทยานิพนธ์จึงขอ กราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กรรณิกา สรรพพานิช ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเพาะเมล็ดทานตะวันและช่วยติดต่อหาเมล็ดพันธุ์ ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล เหล่าสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเมล็ดพันธุ์ทานตะวัน รองศาสตราจารย์พิมพ์วรรณ ต้นสกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินการทำสไลด์ภาพตัดตามยาวของรากทานตะวัน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ หัศนา วิทยานนท์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทดสอบทางสถิติ

สุดท้ายผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณต่อคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้คำปรึกษา กำลังใจ และสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในหน่วยวิจัยไบโอฟิสิกส์ : ไบโอเซนเซอร์และกระแสไฟฟ้าชีวภาพ สำหรับกำลังใจดีๆ ที่มีให้เสมอมา

จุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.3 วัตถุประสงค์	11
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	11
1.5 ขอบเขตและวิธีดำเนินการ	11
2. วิธีการวิจัย	12
2.1 วัสดุและอุปกรณ์	12
2.1.1 ตัวอย่าง	12
2.1.2 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลาย APW	12
2.1.3 สารเคมีสำหรับชุบอิเล็กโทรด	12
2.1.4 สารเคมีอื่นๆ ที่จำเป็น	13
2.1.5 อุปกรณ์สำหรับเพาะเมล็ดทานตะวัน	13
2.1.6 อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน	13
2.1.7 อุปกรณ์สำหรับเตรียมไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ	14
2.1.8 อุปกรณ์สำหรับเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง	15
2.1.9 อุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น	15
2.2 หลักการและทฤษฎี	15
2.3 หลักการทำงานของระบบไวเบรติงโพรบ	17
2.4 การเตรียมสารละลาย APW	19
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การเตรียมสารละลาย APW pH 6.00	19
2.4.2 การเตรียมสารละลาย APW pH 4.00 และ 8.00	19
2.4.3 การเตรียมสารละลาย APW เพื่อศึกษาผลของไอออน	20
2.5 การเพาะเมล็ดทานตะวัน	21
2.6 การเตรียมรากทานตะวันสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	22
2.7 การเตรียมโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า	23
2.8 การเตรียมไมโครอิเล็กทรอนิกส์โทรดเปรียบเทียบ	26
2.9 การเตรียมอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง	28
2.10 การปรับเทียบโพรบ	29
2.11 การวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	32
2.12 การคำนวณผล	36
2.13 การศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวัน	41
2.13.1 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันใน สารละลาย APW ที่สภาวะปกติ	41
2.13.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันใน สารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่างๆ	41
2.13.2.1 pH 6.00 และ 4.00	41
2.13.2.2 pH 6.00 และ 8.00	42
2.13.2.3 pH 4.00 ,6.00 และ 8.00	42
2.14 ผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน	42
2.14.1 ผลของแคลเซียมไอออน	42
2.14.2 ผลของโซเดียมไอออน	42
2.14.3 ผลของโพแทสเซียมไอออน	43
2.14.4 ผลของคลอไรด์ไอออน	43
2.15 การหาอัตรายัตินของรากทานตะวัน	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	43
2.16.1 ทิศของกระแสไฟฟ้า	43
2.16.2 ผลของสภาวะแวดล้อม	46
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
3.1 อาณาเขตต่างๆ ของราก	50
3.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ	50
3.2.1 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ ตัดทรวงราก	50
3.2.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ ไม่ตัดทรวงราก	56
3.2.3 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้า	62
3.2.4 อัตรายึดของรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ	73
3.3 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่างๆ	79
3.3.1 pH 6.00 และ 4.00	79
3.3.2 pH 6.00 และ 8.00	84
3.3.3 pH 4.00 , 6.00 และ 8.00	88
3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กระแสไฟฟ้าและอัตรายึด	92
3.4 ผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน	96
3.4.1 ผลของแคลเซียมไอออน	96
3.4.2 ผลของโซเดียมไอออน	102
3.4.3 ผลของโพแทสเซียมไอออน	106
3.4.4 ผลของคลอไรด์ไอออน	110
4. บทสรุป	114
เอกสารอ้างอิง	117
ประวัติผู้เขียน	121

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1 ส่วนประกอบของสารเคมีในการเตรียม APW เพื่อศึกษาผลของไอออน	21
2 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y (V_{x1}, V_{x2}, V_{y1}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y (J_x, J_y) ที่ได้จากการคำนวณจากความต่างศักย์ไฟฟ้า	39
3 ค่าวิกฤติเมื่อกำหนดค่าระดับความมีนัยสำคัญ (α) ต่างๆ กัน	46
4 ตัวอย่างการทดสอบทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ 4.00	48
5 ค่าวิกฤติของการแจกแจงแบบที (t) เมื่อ $df = n-1$ และ α คือค่าระดับความเชื่อมั่น	49
6 สัดส่วนรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทั้ง 2 ชนิด	62
7 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันที่ตัดหมวกรอกทั้งด้านใกล้ตัวและไกลตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรอกจนถึงโคนรอก	64
8 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันที่ตัดหมวกรอกทั้งด้านใกล้ตัวและไกลตัวผู้วัดที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรอกจนถึงโคนรอก	67
9 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันที่ไม่ตัดหมวกรอกด้านใกล้ตัวและไกลตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรอกจนถึงโคนรอก	70
10 อัตรายืดของรอกที่ตัดหมวกรอกมีความยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร	74
11 อัตรายืดของรอกที่ไม่ตัดหมวกรอกมีความยาว 1.0-1.5 เซนติเมตร	75
12 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันสภาวะปกติ pH 6.00 และสภาวะ pH 4.00 โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวของรอกเพียงด้านเดียว	81
13 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ 4.00	83
14 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันสภาวะปกติ pH 6.00 และ pH 8.00 โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวของรอกเพียงด้านเดียว	85
15 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ 8.00	87
16 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันที่สภาวะ pH 4.00, 6.00 และ 8.00 โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวของรอกเพียงด้านเดียว	89
17 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00, 4.00 และ 8.00	91

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
18 อัตรายืดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 และ 6.00	93
19 อัตรายืดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 8.00	94
20 อัตรายืดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00	95
21 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะ ไม่แคลเซียมไอออน	98
22 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติและที่สภาวะ ไม่มีแคลเซียมไอออนโดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียว	100
23 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะ ไม่มีโซเดียมไอออน	103
24 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติและที่สภาวะ ไม่มีโซเดียมไอออนโดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียว	104
25 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติและที่สภาวะไม่มี โพแทสเซียมไอออนโดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียว	107
26 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มี โพแทสเซียมไอออน	108
27 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มี คลอไรด์ไอออน โดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียว	111
28 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มี คลอไรด์ไอออน	112

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรนของเอ็มบริโอของฟูกอยด์ (fuciod)	2
2 ลักษณะของเซลล์ไข่ประเภทหนึ่ง	5
3 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ ของเอ็มบริโอแครอต	7
4 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบเอ็มบริโอแครอตต่างสายพันธุ์กัน	7
5 แสดงปลายรากที่ตัดตามยาวแสดงบริเวณของเนื้อเยื่อต่าง ๆ	9
6 การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ภายนอกเซลล์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านสารละลายภายนอกเซลล์	16
7 ระบบไวเบรติงโพรบ	19
8 (A) การวางเมล็ดเพื่อให้รากงอกลงในแนวตั้ง	22
(B) ความยาวของรากทานตะวันที่ต้องการ	23
9 แนวการตัดท่อนราก	23
10 รากทานตะวันที่ตรึงในจานเพาะเชื้อสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	23
11 ขั้นตอนการชุบโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	25
12 ไมโครอิเล็กโทรดสำหรับเปรียบเทียบอิเล็กโทรด	27
13 ต้มไมโครปิเปตในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์	27
14 การจัดอุปกรณ์สำหรับชุบไมโครอิเล็กโทรด	28
15 การจัดอุปกรณ์เพื่อชุบอิเล็กโทรดอ้างอิง	29
16 การเปรียบเทียบอิเล็กโทรดในแนวแกน y	30
17 ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องกระแสไฟฟ้า +30 นาโนแอมแปร์และ -30 นาโนแอมแปร์	30
18 การเปรียบเทียบอิเล็กโทรดในแนวแกน x	31
19 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบในแกน x	31
20 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบในแกน y	32
21 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์วัด	33
22 โพรบที่สั้นทั้งแกน x และแกน y อิเล็กโทรดอ้างอิงและรากทานตะวันในสารละลาย	33

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 วิธีการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยระบบไวเบรติงโพรบ	35
24 ภาพกล้องถ่ายภาพนิ่งมองจากด้านบนแสดงความหมายของด้านใกล้ตัวและด้านใกล้ตัวของการวัด	39
25 การรวมกันแบบเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x , \vec{J}_x และแนวแกน y , \vec{J}_y ได้เป็นกระแสไฟฟ้ารวม $\vec{J}_x + \vec{J}_y$	40
26 ตัวอย่างการเขียนทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออน	40
27 ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมวก	52
28 ตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมวก	53
29 ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมวก	54
30 ตัวอย่างรูปแบบที่ 4 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมวก	55
31 ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดหมวก	58
32 ตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดหมวก	59
33 ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดหมวก	60
34 ตัวอย่างรูปแบบที่ 4 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดหมวก	61
35 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากที่ตัดหมวกวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	65
36 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันของรากที่ตัดหมวกวัดใน APW pH 6.00 ด้านใกล้ตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	66
37 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากที่ตัดหมวกวัดใน APW pH 6.00 ที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	68
38 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันของรากที่ตัดหมวกวัดใน APW pH 6.00 ด้านใกล้ตัวผู้วัดที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	69

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
39 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัด ของรากที่ไม่ตัดหนวกรากวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	71
40 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัด ของรากที่ไม่ตัดหนวกรากวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก	72
41 ความสัมพันธ์ของอัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าในรากที่ตัดหนวกราก	76
42 ความสัมพันธ์ของอัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าในรากที่ไม่ตัดหนวกราก	76
43 ความสัมพันธ์ของอัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้า แบบที่ 2 ในรากที่ตัดหนวกราก	77
44 ความสัมพันธ์ของอัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้า แบบที่ 3 ในรากที่ตัดหนวกราก	77
45 ความสัมพันธ์ของอัตรายึดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้า แบบที่ 1 ในรากที่ไม่ตัดหนวกราก	78
46 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 4.00	79
47 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกรากทานตะวัน ด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 6.00 และ 4.00	82
48 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 8.00	84
49 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกรากทานตะวัน ด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 6.00 และ 8.00	86
50 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00	88
51 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกรากทานตะวัน ด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 4.00 6.00 และ 8.00	90
52 อัตรายึดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 4.00	93
53 อัตรายึดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 8.00	94
54 อัตรายึดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00	95
55 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติ เปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีแคลเซียมไอออน	96

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
56 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกภาควัดหน้า ด้านใกล้ตัวผู้วัดของภาควัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีแคลเซียมไอออน	101
57 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบภาควัดหน้า ที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีโซเดียมไอออน	102
58 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกภาควัดหน้า ด้านใกล้ตัวผู้วัดของภาควัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีโซเดียมไอออน	105
59 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบภาควัดหน้า ที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับที่สภาวะที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน	106
60 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกภาควัดหน้า ด้านใกล้ตัวผู้วัดของภาควัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน	109
61 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบภาควัดหน้า ที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออน	110
62 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ยภายนอกภาควัดหน้า ด้านใกล้ตัวผู้วัดของภาควัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

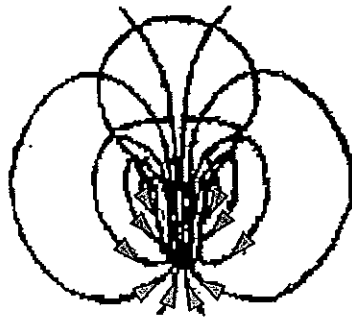
ในระหว่างกระบวนการหลายชนิดของสิ่งมีชีวิตจะมีปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าชีวภาพ (bioelectricity) เกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า กระแสไฟฟ้าไอออน (ionic currents) ซึ่งจะแตกต่างจากกระแสไฟฟ้าที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน กระแสไฟฟ้าไอออนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ ผ่านผนังเมมเบรนของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่แยกสารละลายภายในออกจากภายนอกเซลล์ การเคลื่อนที่ของไอออนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในและภายนอกเซลล์

กระแสไฟฟ้าไอออนเหล่านี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกหลายชนิดของเซลล์ เช่น การนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ รวมทั้งการควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์สิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ (Jaffe and Nuccitelli, 1974) กระแสไฟฟ้าเหล่านี้จัดเป็นกระแสไฟฟ้าคงตัว (steady current) ซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยภายในช่วงเวลาหนึ่งๆ อาจจะเป็นวินาทีจนกระทั่งเป็นชั่วโมง กระแสไฟฟ้านี้จะแตกต่างจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เช่น กระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณของเซลล์ประสาท ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงในช่วงมิลลิวินาที (Jaffe and Nuccitelli, 1974)

โดยทั่วไปแล้วการศึกษากระแสไฟฟ้าชีวภาพ (biocurrents) จะศึกษาในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ใช้วิธีแทงไมโครอิเล็กโทรดสองอันเข้าไปในเซลล์โดยไม่ให้อิเล็กโทรดสองอันนี้อยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน แต่วิธีนี้ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะมีความไม่แน่นอนสูง เนื่องจากการแทงไมโครอิเล็กโทรดเข้าไปในเซลล์อาจจะทำให้เซลล์เกิดบาดแผล ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้อาจจะไม่ได้เกิดจากกระแสไฟฟ้าไอออนคงที่เพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการที่เซลล์ถูกแทงที่เรียกว่ากระแสไฟฟ้าอินเจอรี (injury current) (Jaffe and Nuccitelli, 1974)

กระแสไฟฟ้าไอออนคงตัวเหล่านี้สามารถวัดจากภายนอกเซลล์ได้เช่นกัน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรนจะไหลในสารละลายภายนอกเซลล์ด้วย (ภาพประกอบ 1) การวัดโดยใช้อิเล็กโทรดภายนอกนี้จะลดปัญหาที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอินเจอรี (Jaffe and Nuccitelli, 1974)

อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหล่านี้มีปริมาณน้อย (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ประกอบกับความต้านทานของสารละลายภายนอกเซลล์มักจะไม่สูงพอที่จะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากพอที่จะวัดด้วยอิเล็กโทรดที่ใช้กันอยู่ (ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) การพัฒนาระบบไวเบรติงโพรบโดย Jaffe และ Nuccitelli ในปี ค.ศ. 1974 ที่มีความไวดีกว่าอิเล็กโทรดธรรมดาถึง 1000 เท่า (Jaffe , 1985) ทำให้วัดค่ากระแสไฟฟ้าไอออนที่มีปริมาณน้อยภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ โดยวัดได้ถึงระดับ 10 นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Jaffe and Nuccitelli, 1974) หลังจากการพัฒนาดังกล่าวจึงมีการใช้ระบบนี้ในการวัดกระแสไฟฟ้าคงตัวในสิ่งมีชีวิตต่างๆ



ภาพประกอบ 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรนของเอ็มบริโอของฟูกอยด์ (fuciod) จะไหลในสารละลายภายนอกเซลล์ด้วย (ภาพจาก Jaffe, 1985)

จากการศึกษาระบบต่างๆ ของพืชและสัตว์ที่อยู่ระหว่างการเจริญเติบโตโดยใช้ไวเบรติงโพรบพบว่ามีการกระแสไฟฟ้าไอออนในทุกๆระบบที่ศึกษา และรูปแบบของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามขั้นตอนของการเจริญเติบโต ตัวอย่างเช่นในการศึกษากระแสไฟฟ้ารอบๆไซ้ของหอยทาก

Lymnaea stagnalis พบว่าในช่วงแรกกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ animal hemisphere (ส่วนบนของไซ้ที่ไม่มีไซ้แดง) และมีทิศออกจาก vegetal hemisphere (ส่วนล่างของไซ้ที่มีไซ้แดง) แต่เมื่อไซ้มีการพัฒนาไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้า (Zivkovic and Dohmen, 1989) หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือหลอดไซ้ของแมลง *Rhodnius prolixus* พบว่าที่ระดับการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันจะมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน (Diehl-Jones and Huebner, 1989)

สำหรับในพืชพบกระแสไฟฟ้าในระบบต่างๆ ของพืชเช่นกัน เช่น ในสาหร่ายน้ำจืด *Micrasterias* และ *Closterium* (Troxell, 1989) พบกระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์ที่กำลังขยาย

ผนังเซลล์ (cell wall expansion) โดยจะมีทิศเข้าไปในส่วนที่เป็นเซลล์ใหม่และออกจากส่วนที่เป็นเซลล์เก่า ในเนื้อเยื่อชนิดอื่นเช่นเอ็มบริโอของปาล์มน้ำมัน พบว่ากระแสไฟฟ้าก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับบริเวณที่มีการเจริญเติบโตเช่นกัน นั่นคือกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณที่มีการยืดยาวขึ้นหรือที่มีการขยายตัวของเอ็มบริโอ (Thavarungkul, 1997)

ในกรณีของเนื้อเยื่อพืชระบบที่ศึกษากันมากที่สุดน่าจะเป็นราก โดยมีผู้ศึกษากระแสไฟฟ้าในรากพืชหลายชนิดเช่น รากข้าวโพด *Zea mays* (Miller, 1989) รากข้าวบาร์เลย์ *Hordeum vulgare* L. (Weisenseel et al., 1979) และรากโคลเวอร์ (white clover) *Trifolium repens*. L. (Miller et al., 1986) ซึ่งได้ผลที่คล้ายคลึงกันคือพบกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากในหลายบริเวณด้วยกัน นั่นคือในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญที่เซลล์มีการแบ่งตัวและบริเวณที่เซลล์ยืดตัว ในรากเหล่านี้กระแสไฟฟ้าจะมีทิศออกจากรากในบริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อสภาพของสารละลายภายนอกของรากเปลี่ยนไปเช่น เมื่อเพิ่มค่า pH ของสารละลายภายนอกของรากข้าวโพด (Miller, 1989) ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะลดลง ในทางตรงกันข้ามขนาดของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่า pH และยังพบว่าหากสารละลายไม่มี ไอออนของไฮเดียม โปแทสเซียมหรือคลอไรด์ ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากสูงสุดเฉลี่ย (mean peak inward current density) จะลดลง แต่ในสารละลายที่ไม่มีแคลเซียมไอออนค่านี้จะเพิ่มขึ้น (Miller, 1989)

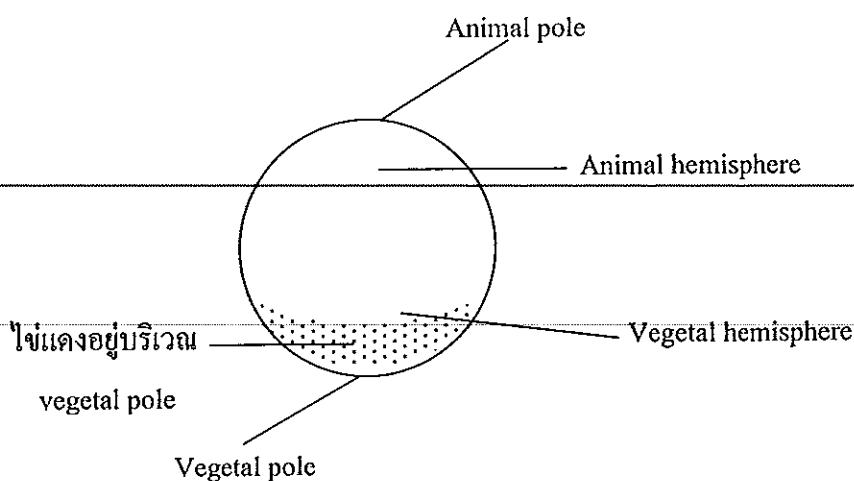
จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าไอออนจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเจริญเติบโต ดังนั้นการศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าในระบบที่กำลังเจริญเติบโตอาจจะนำไปสู่ความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้านี้กับการเจริญเติบโต งานวิจัยนี้จึงศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวัน เนื่องจากทานตะวันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งและจากการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ พบว่าเมล็ดทานตะวันใช้เวลาในการงอกน้อยและรากมีลักษณะตรง ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาระแสไฟฟ้าไอออนด้วย "ไมโครดิงโพรบ" ส่วนการตรวจสอบการเจริญเติบโตก็ทำได้ง่าย โดยการวัดความยาวของรากที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้อาจจะบอกถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าไอออนกับการเจริญเติบโตของรากทานตะวันในสภาวะต่างๆ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป

✖ 1.2 การตรวจเอกสาร

เทคนิคการวัดที่ใช้ในการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตที่ใช้กันมากมี 3 วิธีคือ การวัดเกรเดียนท์ของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของระบบเมื่อระบบที่ศึกษาไม่ได้อยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ การวัดค่าสนามไฟฟ้าภายในระบบ และการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายตัวกลางรอบระบบที่ต้องการศึกษา การวัดโดยสองวิธีแรกจะมีการรบกวนระบบขณะที่ทดลอง โดยการวัดเกรเดียนท์ของศักย์ไฟฟ้าจะต้องวัดเมื่อระบบไม่ได้อยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติของมัน ในการวัดจะตะขิดเล็กโทรดกับผิวของตัวอย่างโดยตรงและวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่ผิวของระบบซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านของเหลวที่อยู่ที่ผิวของระบบ ส่วนใหญ่สารละลายที่ใช้มีปริมาณน้อยเพื่อทำให้ความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าสูง ทำให้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ดังนั้นระบบจะถูกรบกวนเนื่องจากผิวของระบบแห้ง ส่วนการวัดวิธีที่ 2 คือการวัดค่าสนามไฟฟ้าภายใน วิธีนี้ต้องแทงไมโครอิเล็กโทรดเข้าไปในระบบ ทำให้ระบบได้รับความกระทบกระเทือนและอาจจะเกิดกระแสไฟฟ้าอินเจอร์ ระบบสุดท้ายคือการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากสารละลายภายนอกซึ่งเป็นวิธีที่ไม่รบกวนระบบที่ต้องการศึกษา (ถ้ามีก็น้อยมาก) (Jaffe, 1977)

การวัดกระแสไฟฟ้าของเซลล์หรือเนื้อเยื่อที่ไหลผ่านสารละลายที่ล้อมรอบเซลล์หรือเนื้อเยื่อนั้นๆ คือการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีปริมาณน้อยมากเพียงไม่กี่ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยมากเช่นกัน อุปกรณ์ที่นำมาวัดกระแสไฟฟ้าเหล่านี้จึงต้องมีประสิทธิภาพสูง ในปี ค.ศ. 1974 Jaffe และ Nuccitelli ได้ประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่าไวเบรติงโพรบ ทำให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยเหล่านี้ได้และพบว่าไวเบรติงโพรบสามารถวัดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยได้ถึงระดับ 10 นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่รบกวนระบบเนื่องจากจะวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายตัวกลางที่อยู่ภายนอกซึ่งต้องการศึกษา ต่อมาได้มีการใช้ระบบดังกล่าวศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในระบบต่างๆ ของทั้งเซลล์พืชและสัตว์ พบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนมีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกหลายชนิดของเซลล์ เช่น การนำสารอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ รวมทั้งควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์ ทำให้มีผู้ใช้ระบบนี้มากขึ้นในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ (Jaffe and Nuccitelli, 1977)

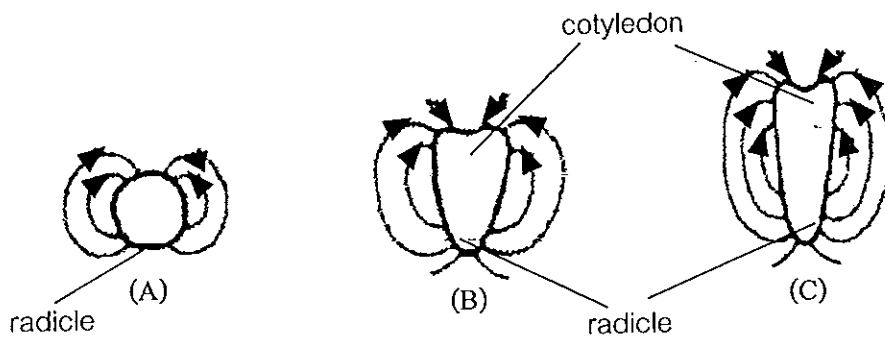
มีการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนโดยใช้เทคนิคไวเบรติงโพรมในระบบของสัตว์หลายชนิด เช่น วัตกระแสไฟฟ้ารอบไซของหอยทาก *Lymnaea stagnalis* ที่กำลังเติบโต (maturation) จนกระทั่งไซมีการแบ่งตัวแบบไมโทติค พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ animal hemisphere และมีทิศออกจาก vegetal hemisphere (ภาพประกอบ 2) โดยมีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดในช่วง 200-600 นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งจะเข้าที่ animal pole และออกจาก vegetal pole (ภาพประกอบ 2) นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากด้านข้างของ vegetal pole และมีทิศเข้าด้านข้างของ animal pole ด้วยขนาด 50 นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Zivkovic and Dohmen, 1989) ต่อมา Zivkovic และ Dohmen (1991) ได้ศึกษากระแสไฟฟ้ารอบๆ เอ็มบริโอของหอย *Bithynia tentaculata* พบว่ามีกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.05-3.00 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้าจะเข้ามากที่ animal pole และออกจาก vegetal pole เหมือนในไซของหอยทากข้างต้น ในไซของสัตว์ชนิดอื่นเช่น หลอดไซของแมลง *Rhodnius prolixus* พบว่ากระแสไฟฟ้าก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับบริเวณที่มีการเจริญเติบโตของหลอดไซ นั่นคือกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของการเจริญเติบโต (Diehl-Jones and Huebner, 1989) นอกจากนี้ยังมีการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนโดยใช้ระบบไวเบรติงโพรมในระบบที่ระบบที่ซับซ้อนกว่านี้เช่น ศึกษากระแสไฟฟ้าระหว่างการพัฒนาของเอ็มบริโอของไก่ (Hotary and Robinson, 1990) หรือศึกษาเนื้อเยื่อของไก่ (Kucera and Ribaupierre, 1989) เป็นต้น ซึ่งระบบต่างๆ เหล่านี้พบว่าทั้งรูปแบบและขนาดของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามระยะของการเจริญเติบโต



ภาพประกอบ 2 ลักษณะของเซลล์ไซประเภทหนึ่ง

สำหรับในพืชนั้นมีการศึกษากระแสไฟฟ้าโดยใช้โวลต์มิเตอร์ในพืชหลายชนิด เช่น ในสาหร่ายน้ำจืด *Micrasterias* และ *Closterium* (Troxell, 1989) พบกระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์ที่กำลังขยายผนังเซลล์ โดยกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าในส่วนที่เป็นเซลล์ใหม่ด้วยขนาด 0.7-5.4 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากส่วนที่เป็นเซลล์เก่าด้วยขนาด 0.2-1.5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เนื้อเยื่อพืชที่มีการศึกษากันมากคือเอ็มบริโอและราก ในเอ็มบริโอมีการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในพืชหลายชนิด เช่นในเอ็มบริโอของแครอต (Rathore and Robinson, 1989) โดยศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ โดยเริ่มจากเมื่อเอ็มบริโอมีอายุน้อยที่สุดและมีรูปร่างเป็นทรงกลม (globular) (ภาพประกอบ 3A) ต่อมาจะพัฒนาเป็นรูปร่างคล้ายหัวใจ (heart) (ภาพประกอบ 3B) และตอร์ปิโด (torpedo) (ภาพประกอบ 3C) ตามลำดับ โดยพบว่ากระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามระดับการเจริญเติบโต ซึ่งในระดับทรงกลมจะมีทิศเข้าส่วนที่จะงอกเป็นยอดและมีทิศออกบริเวณใกล้กับส่วนที่จะงอกเป็นราก (radicle) และที่ระดับหัวใจและระดับตอร์ปิโดกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ใบเลี้ยง (cotyledon) และมีทิศออกในส่วนที่จะงอกเป็นราก และเมื่อเปรียบเทียบกับเอ็มบริโอ 2 สายพันธุ์พบว่าในสายพันธุ์ที่เจริญเติบโตเร็วกว่า ที่ระดับรูปตอร์ปิโดมีกระแสไฟฟ้าเข้าทั้งที่บริเวณใบเลี้ยงและบริเวณที่จะเป็นรากโดยมีกระแสไฟฟ้าออกจากตอนกลางของเอ็มบริโอ (ภาพประกอบ 4A) ในขณะที่สายพันธุ์ที่เจริญเติบโตช้ากว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณใบเลี้ยงและออกจากส่วนที่จะงอกเป็นราก (ภาพประกอบ 4B) เอ็มบริโออีกชนิดหนึ่งที่มีการศึกษากระแสไฟฟ้าคือเอ็มบริโอของปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Thavarungkul, 1997) โดยพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของเอ็มบริโอด้วยขนาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1-2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ จะมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้เนื้อเยื่อของเอ็มบริโอมีรอยแตก เนื่องจาก การแทงยอดจะมีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เอ็มบริโอในบริเวณนี้ด้วยขนาดมากถึง 20 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งน่าจะเป็นกระแสไฟฟ้าอินเจอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าในเอ็มบริโอที่ไม่มี การเจริญเติบโตมีกระแสไฟฟ้าเพียงบางตำแหน่งและมีขนาดน้อยมาก จากลักษณะเช่นนี้น่าจะเป็นการ แสดงว่ากระแสไฟฟ้าไอออนเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต

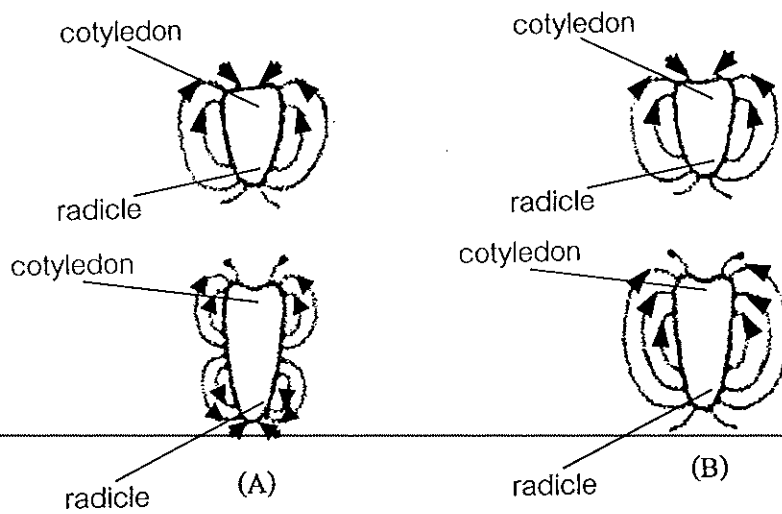


ภาพประกอบ 3 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ ของเอ็มบริโอแครอต

(A) ระยะแรกมีรูปร่างเป็นทรงกลม

(B) ระยะที่มีรูปร่างหัวใจ และ (C) ระยะที่มีรูปร่างตอริบโด

(ภาพจาก Rathore และ Robinson, 1989)



ภาพประกอบ 4 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบเอ็มบริโอแครอตต่างสายพันธุ์กัน (A) พันธุ์เติบโตเร็ว RCC 48 และ (B) พันธุ์ RCC 27 (ภาพจาก Rathore และ Robinson, 1989)

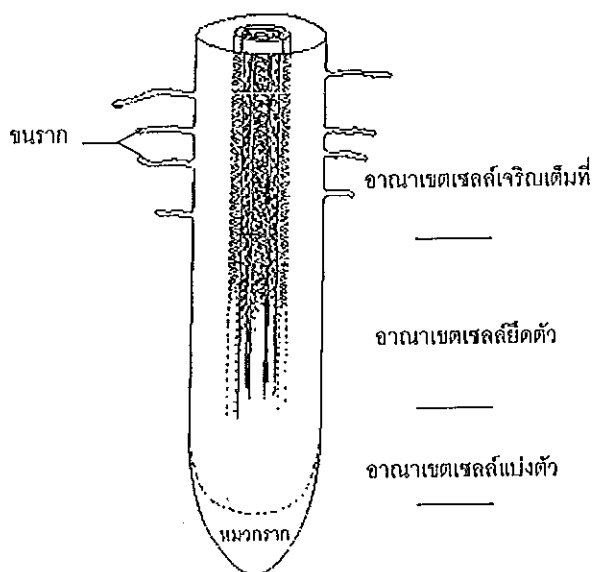
สำหรับการศึกษาในรากพืชเช่น ในรากข้าวโพด *Zea mays* (Miller, 1989) รากข้าวบาร์เลย์ *Hordeum vulgare* L. (Weisenseel et al., 1979) รากถั่ว (pea) *Pisum sativum* L. (Hush and Overall, 1989) และรากโคลเวอร์ (white clover) *Trifolium repens* L. (Miller et al., 1986) ส่วนใหญ่พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญที่มีการแบ่งตัวของเซลล์ (เนื้อเยื่อต่างๆ ของรากแสดงในภาพประกอบ 5) และบริเวณที่มีการยึดตัวของเซลล์ และกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากในบริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ รูปแบบของกระแสไฟฟ้าในบริเวณต่างๆ ของรากพืชที่กล่าวข้างต้นสรุปได้ดังนี้

- บริเวณหมวกราก (root cap) เป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของรากเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายหมวกหุ้มอยู่ซึ่งในบริเวณนี้พบกระแสไฟฟ้ามีทิศทางไม่แน่นอน เช่น ในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel et al., 1979) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าในบางราก และในบางรากมีทิศออก ส่วนรากโคลเวอร์ (Miller et al., 1986) และรากข้าวโพด (Meyer and Weisenseel, 1997) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณนี้ด้วยขนาด 0.4-1.1 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ 1.5-1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการทดลองที่คล้ายคลึงกันที่วัดกระแสไฟฟ้าในรากข้าวโพดเช่นกัน (Miller, 1989) กลับพบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณนี้

- อาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (region of cell division) หรือที่เรียกว่าเขตเนื้อเยื่อเจริญ (meristematic region) อยู่ถัดจากหมวกรากขึ้นมา อาณาเขตนี้ประกอบด้วยเซลล์ที่แบ่งตัวแบบไมโทซิส (mitosis) อยู่ตลอดเวลาเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ โดยเซลล์ที่อยู่รอบนอกที่ส่วนปลายของบริเวณนี้จะเปลี่ยนไปเป็นหมวกราก อาณาเขตนี้มีสีขุ่นขาว ยาวประมาณ 1.0-1.5 มิลลิเมตร ในบริเวณนี้กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากในพืชทุกชนิดที่มีการศึกษา เช่น ในรากข้าวโพด (Meyer and Weisenseel, 1997) และรากถั่ว (Hush and Overall, 1989) มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่บริเวณนี้ด้วยขนาด 1.5-1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

- อาณาเขตเซลล์ยืดตัว (region of cell elongation) เป็นบริเวณที่อยู่เหนืออาณาเขตของเซลล์แบ่งตัวและมีสีจางกว่า ช่วงนี้ยาวประมาณ 1.0-5.0 มิลลิเมตร ในบริเวณนี้เซลล์มีการขยายตัวทางด้านยาวมากกว่าด้านกว้างทำให้รากยืดยาวออก กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากพืชชนิดต่างๆ มีทิศเข้าสู่บริเวณนี้ เช่น ในรากโคลเวอร์ 0.4-1.1 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Miller et al., 1986) รากถั่ว 1.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Hush and Overall, 1989) และรากข้าวโพด 2.7 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Meyer and Weisenseel, 1997) กระแสไฟฟ้าในบริเวณนี้มีขนาดมากที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ของราก

• อาณาเขตขนราก (region of root hair) เป็นอาณาเขตที่เซลล์เจริญเต็มที่ (maturation zone) บริเวณนี้อยู่ถัดจากอาณาเขตเซลล์ยืดยาวขึ้นมา มีขนเล็กจำนวนมากเรียกว่า ขนราก (root hair) และกระแสไฟฟ้าจะมีทิศเข้าหรือออกจากรากไม่แน่นอนอาทิเช่นในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et. al.*, 1979) กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากบริเวณนี้ด้วยขนาด 0.5-1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ในรากโคลเวอร์ (Miller *et. al.*, 1986) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่บริเวณนี้ด้วยขนาด 1.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



ภาพประกอบ 5 แสดงปลายรากที่ตัดตามยาวแสดงบริเวณของเนื้อเยื่อต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังพบว่า pH ของสารละลายภายนอกจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าและการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด เช่นสาหร่ายน้ำจืด *Micrasterias* และ *Closterium* (Troxell, 1989) เมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 7 จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่มีขนาดลดลง ในทางตรงกันข้ามกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถ้าสารละลายมีค่า pH ลดลงจาก 6 เป็น 5 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในทำนองเดียวกันนี้ยังพบในรากข้าวโพด (Miller, 1989) นอกจากนี้ยังพบว่ารากที่อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH ที่เป็นกรดมากกว่า การยึดของรากจะมากกว่าด้วย (Miller, 1989)

นอกจาก pH แล้วยังพบว่าชนิดของไอออนมีความเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลายภายนอกเปลี่ยนแปลงไป เช่นในการศึกษากระแสไฟฟ้าในรากถั่วที่มีบาดแผล (Hush and Overall, 1989) พบ

กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากด้วยขนาด 10.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่บริเวณบาดแผล ซึ่งมีขนาดมากเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งที่ไม่เกิดแผลที่มีขนาด 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อลดปริมาณของแคลเซียมในสารละลายจะทำให้กระแสไฟฟ้านี้ลดลง เช่นกัน ดังนั้นจึงคาดว่าแคลเซียมน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าอินเจอร์นี้ ส่วนการศึกษาผลของไอออนต่อกระแสไฟฟ้าในรากปกติที่ไม่มีบาดแผล เช่น รากข้าวโพด (Miller, 1989) พบว่าถ้าสารละลายตัวกลางไม่มีโซเดียมหรือโพแทสเซียมหรือคลอไรด์ กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากจะลดลง โดยค่าเฉลี่ยของค่ามากที่สุดของกระแสไฟฟ้าที่ทิศเข้า (mean peak inward current density) จะลดลงร้อยละ 7 17 และ 15 ตามลำดับ แต่หากสารละลายไม่มีแคลเซียมกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 และยังพบว่าทิศของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากทิศเข้าเป็นทิศออกด้วย ซึ่งแสดงว่าไอออนเหล่านี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสไฟฟ้าแต่ไม่มากนัก

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าไอออนจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเจริญเติบโต ดังนั้นการศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าในระบบที่กำลังเจริญเติบโตอาจจะนำไปสู่ความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้านี้กับการเจริญเติบโต

* งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวัน (sunflower) ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annuus* Linn. ในทางพฤกษศาสตร์ทานตะวันจัดอยู่ในวงศ์ *Asteraceae* เป็นพืชล้มลุกตระกูลเดียวกับเบญจมาศ คำฝอย และดาวเรือง อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกอยู่ระหว่าง 18-25 องศาเซลเซียส สภาพความเป็นกรด-เบสของดินประมาณ 5.7-8.0 สามารถขึ้นในดินทุกประเภท แต่ที่ขึ้นได้ดีคือดินที่มีหน้าดินลึกชุ่มน้ำได้ดี แต่ไม่ชอบน้ำขัง และไม่ชอบดินที่มีลักษณะเป็นกรด ปัจจุบันมีพื้นที่ปลูกทานตะวันประมาณ 400,000-500,000 ไร่ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากประมาณ 700 ไร่ ในปี พ.ศ. 2531 (กลุ่มพืชน้ำมัน, 2542) ทานตะวันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจมีประโยชน์มากมาย อาทิเช่น เมล็ด ใช้บริโภคเปลือกของลำต้นนำมาทำกระดาษ ลำต้นใช้ทำเชื้อเพลิง รากใช้ทำแป้งเค้ก สปาเก็ตตี้และประกอบอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ได้ ส่วนน้ำมันจะช่วยลดคอเลสเตอรอลที่เป็นสาเหตุของโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด นอกจากนี้ น้ำมันจากทานตะวันยังประกอบด้วยวิตามิน เอ ดี อี และเค นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ทำเนยเทียม สีนํ้ามันชักเงา สบู่ และน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ กากที่ได้จากการสกัดน้ำมันออกแล้วจะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์

จากการศึกษานี้คาดว่าข้อมูลจากการวิจัยอาจจะบอกถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าไอออนกับการเจริญเติบโตของทานตะวัน ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานอาจจะประยุกต์ใช้ได้ในอนาคตต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาขนาดและทิศทางของรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW (Artificial Pond Water) ที่สภาวะปกติ ($\text{pH}=6.00\pm 0.05$)
2. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่าง ๆ และความเกี่ยวข้องกับการยึดของราก
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนชนิดต่าง ๆ เช่น K^+ Ca^{2+} ฯลฯ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนและความเกี่ยวข้องกับการยึดของราก

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันที่กำลังเจริญเติบโต
2. ทราบผลของ pH ต่อกระแสไฟฟ้าไอออนและการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน
3. ทราบผลของความเข้มข้นของไอออนชนิดต่างๆ เช่น K^+ Ca^{2+} ฯลฯ ที่มีต่อกระแสไฟฟ้าไอออนและการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน

1.5 ขอบเขตและวิธีดำเนินการ

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเมล็ดทานตะวันให้ได้รากที่เหมาะสมต่อการวัดกระแสไฟฟ้าไอออน
2. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW (Artificial Pond Water) ที่สภาวะปกติ ($\text{pH} = 6.00 \pm 0.05$)
3. ศึกษารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่างๆ และความเกี่ยวข้องกับการยึดของราก
4. ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนชนิดต่างๆ เช่น K^+ Ca^{2+} ฯลฯ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนและความเกี่ยวข้องกับการยึดของราก
5. สรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 ตัวอย่าง

- เมล็ดทานตะวัน สายพันธุ์ลูกผสมคาริกิลล์ 3322

2.1.2 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลาย APW (artificial pond water)

- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl, AR Grade :Analytical Carlo Erba, France)
- โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl, AR Grade :Merck, Germany)
- แคลเซียมคลอไรด์ ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AR Grade :Fluka, Switzerland)
- แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, AR Grade :Analytical Carlo Erba, France)
- โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4 , AR Grade : Merck, Germany)
- โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4 , AR Grade : Carlo Erba, France)
- แคลเซียมซัลเฟต ไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AR Grade : Unilab)
- ทริสไฮดรอกซีเมทิลอะมีนมีเทน (Tris-(Hydroxymethyl)-aminomethane) ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_3$, AR Grade : Fluka, Switzerland)
- 2-มอร์โฟลิโนอีเทนซัลโฟนิกแอซิดโมโนไฮเดรต (2-Morpholinoethanesulfonic acid Monohydrate, Mes) ($\text{C}_8\text{H}_{13}\text{NO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, AR Grade : Merck, Germany)

2.1.3 สารเคมีสำหรับซุบอิลีกโทรด

- แพลทินัมคลอไรด์ ($\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, AR Grade : Fluka, Switzerland)
- ทองโพแทสเซียมไซยาไนด์ (AuKCN, AR Grade : Degussa, Germany)
- เลดอะซิเตต ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, AR Grade : Baker Analyzed, USA)

2.1.4 สารเคมีอื่นๆที่จำเป็น

- บัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4.0 , 7.0 และ 10.0 (Merck, AR Grade :Germany)
- อะซิโตน (Acetone) (CH_3COCH_3 , AR Grade :Carlo Erba, France) สำหรับทำความสะอาดอิเล็กโทรดอ้างอิงและโพรบ
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl, AR Grade : BDH, England)
- โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (ไฮเตอร์) (hypochlorite as available chloline 6% w/w)

2.1.5 อุปกรณ์สำหรับเพาะเมล็ดทานตะวัน

- จานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 เซนติเมตร
- ตู้อัด
- ปากคีบปลายแหลม (forceps)
- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

2.1.6 อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน

- ระบบไวเบรตติ้งโพรบ (vibrating probe system) ประกอบด้วย
 - ออสซิลเลเตอร์ (osillator) ทำหน้าที่จ่ายสัญญาณรูปไซน์ (sine)
 - ไวเบรเตอร์แอสเซมบลี (vibrator assembly) ทำหน้าที่ให้อิเล็กโทรด สั่นกลับไปกลับมา
 - PSD (phase sensitive detector) ทำหน้าที่รับสัญญาณและใช้ปรับ เฟสของสัญญาณ
- อุปกรณ์จับยึดโพรบที่ปรับได้ 3 มิติเพื่อเลื่อนโพรบไปยังตำแหน่งที่ ต้องการวัด (3D micromanipulator (Narishige, Tokyo, Japan))
 - ส่วนขยายสัญญาณ (preamplifier)
 - ส่วนกรองสัญญาณ (filter)
- ฟาราเดย์เคจ (Faraday cage)
- เครื่องบันทึกสัญญาณ (chart recorder, Kipp & Zonen, BD41, Holland)

- กล้องจุลทรรศน์อินเวอร์ท (inverted microscope, Olympus, CK40, Tokyo, Japan)
- กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (stereo microscope, Olympus, SZH10, Tokyo, Japan)
- โพรบ (parlyence-coated stainless-steel electrode , MicroProbe, Clarkburg, MD, USA) สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน
- มัลติมิเตอร์ (multimeter, Fluke 87 , USA)
- งานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.44 เซนติเมตร สูง 1.00 เซนติเมตร

2.1.7 อุปกรณ์สำหรับเตรียมไมโครอิเล็กโทรดเปรียบเทียบ

- ลวดเงิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.33 ± 0.05 มิลลิเมตร และ 1.70 ± 0.05 มิลลิเมตร (silver wire purity 99.99 %, Advent Research Materials Ltd., England)
- กระดาษทราย
- ไมโครปิเปต (micropipette) ทำจากหลอดแก้ว (Borosilicate with filament) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.58 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.0 มิลลิเมตร (Clark Electromedical Instruments, England)
- ปืนกาวซิลิโคนและกาวซิลิโคน
- ตัวต้านทานปรับค่าได้
- แบตเตอรี่ 1.5 โวลต์
- สายไฟ
- เครื่องให้ความร้อนและคนของเหลวด้วยแท่งแม่เหล็ก (hotplate/stirrer, Framo®-Geratetechnik, Typ M21/1, Germany)
- ทรวงกระบอกสำหรับยึดไมโครปิเปต

2.1.8 อุปกรณ์สำหรับเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง

- ลวดแพลทินัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 ± 0.05 มิลลิเมตร ยาว 4.0 ± 0.1 เซนติเมตร
- แบตเตอรี่ 9 โวลต์

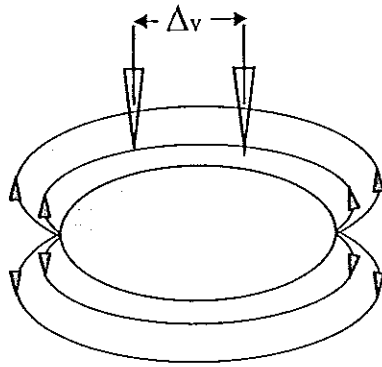
2.1.9 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็น

- ซิลิโคนกรีส (silicone grease , Bayer-silicone, Fluka, Switzerland) สำหรับตรึงรากในงานเพาะเชื้อ
- กระดาษบันทึกข้อมูล (chart recorder paper) สำหรับบันทึกสัญญาณ
- นาฬิกาจับเวลา (Casio HS-5, Korea)
- หลอดหยด
- เครื่องวัดสภาพนำไฟฟ้า (conductivity meter, Jenway model 4310, England)
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Corning model 220, England)
- เครื่องชั่ง (Mettler PJ300: Mettler, Switzerland)
- เครื่องแก้ว (ไพเร็กซ์ (pyrex))

2.2 หลักการและทฤษฎี

ความเข้มข้นของไอออนที่แตกต่างกันระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ทำให้มีการเคลื่อนที่เข้า-ออกของไอออนชนิดต่างๆผ่านผนังเมมเบรน เรียกการเคลื่อนที่ของไอออนเหล่านี้ว่า กระแสไฟฟ้าไอออน (ionic currents: จำนวนประจุต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา = แอมแปร์ต่อหน่วยพื้นที่) หรือ ฟลักซ์ไอออน (ion fluxes: จำนวนโมลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนเกี่ยวข้องกับกลไกหลายชนิดของเซลล์ เช่น การนำอาหารเข้าสู่เซลล์ การส่งสัญญาณภายในและระหว่างเซลล์ การควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของทั้งเซลล์สัตว์ (Jaffe and Nuccitelli, 1977) และพืช (Hush and Overall, 1989)

กระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านผนังเมมเบรนจะไหลผ่านสารละลายภายนอกเซลล์ดังภาพประกอบ 6 ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



ภาพประกอบ 6 การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ภายนอกเซลล์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านสารละลายภายนอกเซลล์

ความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Miller *et al.*, 1986)

ดังสมการ

$$\vec{J} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad \dots\dots\dots(1)$$

โดย \vec{J} = ความหนาแน่นกระแส (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

\vec{E} = สนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเมตร)

ρ = สภาพต้านทานของสารละลาย (โอห์มเมตร)

ในระยะทาง Δr ที่สั้นมากๆ หากมีกระแสไฟฟ้าไอออน \vec{J} ไหลผ่านสารละลายจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV และสนามไฟฟ้าในระยะ Δr นี้จะมีค่าคงที่

โดย

$$\vec{E} = \frac{-\Delta V}{\Delta r} \hat{e}_E \quad \dots\dots\dots(2)$$

\hat{e}_E คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของสนามไฟฟ้า

เครื่องหมายลบแสดงว่าสนามไฟฟ้าจะมีทิศไปในทิศที่ศักย์ไฟฟ้าลดลง

ดังนั้น

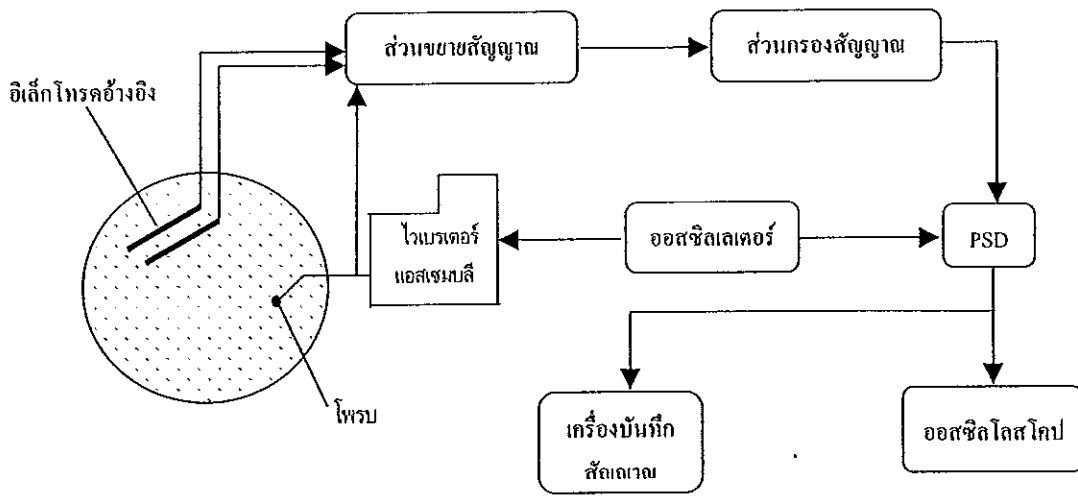
$$\vec{J} = \frac{-\Delta V}{\rho \Delta r} \hat{e}_E \quad \dots\dots\dots(3)$$

นั่นคือเมื่อทราบค่าสภาพต้านทานของสารละลาย ρ J จะคำนวณได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV ที่วัดระหว่างจุดสองจุดที่อยู่ห่างกัน Δr หาก Δr ยิ่งเล็กลงเท่าใด ค่าความหนาแน่นกระแส J ก็จะคำนวณได้ใกล้ค่าจริงมากขึ้น แต่ ΔV ที่วัดได้ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นระบบที่ใช้ต้องสามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ในระยะทางสั้นๆ นี้

ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมากน้อยเท่าใดสามารถคำนวณจากสมการ (3) ตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้า 1.0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ไหลผ่านสารละลาย APW ที่มีสภาพต้านทานประมาณ 5×10^3 โอห์ม-เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างระยะทาง 20 ไมโครเมตร คือ 10 ไมโครโวลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาดนี้เป็นขีดจำกัดการวัดของซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์อิเล็กโทรด (Ag/AgCl electrode) (Nuccitelli, 1983) ซึ่งถูกกำหนดโดยสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งสัญญาณรบกวนของอิเล็กโทรดนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานของอิเล็กโทรด ถ้าความต้านทานของอิเล็กโทรดลดลงสัญญาณรบกวนจะลดลงด้วย (Jaffe and Nuccitelli, 1974) ระบบไวเบรติงโพรบแก้ปัญหานี้โดยชุบโพรบด้วยสารละลายแพลทินัมคลอไรด์ ทำให้เกิดสารประกอบแพลทินัมแบล็คที่มีรูพรุนทำให้หัวโพรบมีพื้นที่มาก เป็นผลให้ความต้านทานของโพรบลดลงซึ่งทำให้สัญญาณรบกวนลดลง ดังนั้นค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่วัดได้ต่อสัญญาณรบกวนของโพรบ (signal to noise ratio) จึงดีขึ้น (Jaffe and Nuccitelli, 1974) ส่วนการสั้นโพรบนั้นก็เพื่อให้อิเล็กโทรดอันเดียวกันวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดใกล้ๆ กันสองจุดได้

2.3 หลักการทำงานของระบบไวเบรติงโพรบ

ระบบไวเบรติงโพรบเป็นระบบที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ทั้งในระดับเซลล์และออร์แกนนิซึม ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังภาพประกอบ 7 ในงานวิจัยนี้ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันโดยใช้ไวเบรติงโพรบ 2 มิติ คืออิเล็กโทรดจะวัดสัญญาณจากกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และในแนวแกน y ได้พร้อมกัน โดยออสซิลเลเตอร์ (oscillator) จะจ่ายสัญญาณรูปไซน์ (sine) ให้กับไวเบรเตอร์แอสเซมบลี (vibrator assembly) ซึ่งทำให้โพรบสั่นกลับไปกลับมาระหว่างการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ความถี่และระยะทางของการสั้นของโพรบสามารถกำหนดได้โดยการปรับความถี่ (frequency) และแอมพลิจูด (amplitude) ของออสซิลเลเตอร์ ตามลำดับ หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายในตำแหน่งของโพรบจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดของการสั้นของโพรบ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดยโพรบ



ภาพประกอบ 7 ระบบไวเบอร์ติงโฟรบ

ในการวัดจะให้โฟรบสั้นกลับไปกลับมาเป็นระยะทางประมาณ 20-25 ไมโครเมตรด้วยความถี่ในช่วง 250-300 เฮิรตซ์ สำหรับแกน x และ 500-600 เฮิรตซ์ สำหรับแกน y เนื่องจากโฟรบจะสั้นในลักษณะของสัญญาณรูปซายน์ สัญญาณที่วัดได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปซายน์ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่น สัญญาณนี้จะผ่านการขยายสัญญาณก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ PSD (phase sensitive detector) พร้อมกับสัญญาณอ้างอิงจากออสซิลเลเตอร์ที่ทำให้เกิดการสั่นของโฟรบ สัญญาณที่วัดได้นี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการปรับเฟสของสัญญาณที่ PSD สัญญาณจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเฟสของสัญญาณที่ได้จากโฟรบถูกปรับให้อยู่ในเฟสเดียวกับสัญญาณอ้างอิงจากออสซิลเลเตอร์เรียกสัญญาณอินเฟส (in phase) นอกจากสัญญาณนี้ระบบ PSD ยังสามารถแสดงสัญญาณที่ต่างเฟสจากสัญญาณจริงๆ ไป 90° ได้เรียกสัญญาณนี้ว่าควอดเรเซอร์ (quadrature) สัญญาณควอดเรเซอร์นี้จะช่วยแสดงว่าสัญญาณอินเฟสที่วัดได้เป็นสัญญาณจากกระแสไฟฟ้าไอออนจริงหรือไม่ ทั้งนี้จากหลักที่ว่าหากมีการปรับเฟสของสัญญาณอินเฟสให้ถูกต้องแล้วควอดเรเซอร์จะมีค่าเป็นศูนย์และไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือมีค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลา หากสัญญาณนี้มีการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์มากกว่า 10% ของสัญญาณอินเฟส แสดงว่าสัญญาณอินเฟสที่วัดได้ไม่ได้เกิดจากกระแสไฟฟ้าไอออนแต่เกิดจากเหตุอื่น เช่น โฟรบชนกับผิวของเซลล์หรือสารแขวนลอยในสารละลาย (ถ้ามี) สัญญาณที่ผ่าน PSD จะถูกเฉลี่ยด้วยค่าคงตัวเวลา 3 วินาที สัญญาณที่ออกมานี้จะแสดงบนออสซิลโลสโคปและถูกบันทึกบนเครื่องบันทึกสัญญาณ (chart recorder)

ระบบไวเบรติงโพรบจะใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสารละลาย สำหรับการทดลองนี้ใช้สารละลาย APW เนื่องจาก APW มีส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อนคือประกอบด้วยไอออนเพียง 4 ชนิดได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียมและคลอไรด์ แต่เพียงพอต่อการงอกของราก จึงทำให้ง่ายต่อการหาชนิดของไอออนที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า (Weisenseel *et al.*, 1979)

2.4 การเตรียมสารละลาย APW (artificial pond water)

2.4.1 การเตรียมสารละลาย APW pH 6.00

สารละลาย APW ที่ใช้ในการศึกษากระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ แคลเซียมคลอไรด์ 0.1 มิลลิโมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 มิลลิโมลาร์ และ MES (2-Morpholinoethanesulfonic acid Monohydrate) 1.0 มิลลิโมลาร์ การปรับ pH ของสารละลายใช้ Tris (Hydroxymethyl aminomethane) 5% และ 1% (น้ำหนักต่อปริมาตร) หยดลงในสารละลายจนกระทั่งสารละลาย APW มี pH 6.00 ± 0.05 (Meyer and Weisenseel, 1997) สารละลายดังกล่าวมีสภาพนำไฟฟ้า 205 ± 15 (ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร)¹ มีสภาพต้านทาน $(4.9 \pm 0.4) \times 10^3$ โอห์ม-เซนติเมตร ใช้สารละลายนี้ในการเพาะเมล็ดและศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติ

2.4.2 การเตรียมสารละลาย APW pH 4.00 และ 8.00

ในการศึกษาผลของ pH ของสารละลายต่อการเกิดรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน ใช้ APW pH 4.00 ± 0.05 , 6.00 ± 0.05 และ 8.00 ± 0.05 สำหรับ APW pH 4.00 และ 8.00 มีส่วนประกอบของ โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์ เช่นเดียวกับข้อ

2.4.1 แต่ในการปรับ pH ใช้ MES 1.0 มิลลิโมลาร์ และ Tris 5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยหยดสารละลายทั้งสองในขณะวัด pH จนกระทั่งได้สารละลาย APW ที่มี pH 4.00 ± 0.05 สารละลายนี้มีสภาพนำไฟฟ้า 220 ± 16 (ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร)¹ มีสภาพต้านทาน $(4.5 \pm 0.3) \times 10^3$ โอห์ม-เซนติเมตร ในกรณีของ pH 8.00 ± 0.05 ใช้ MES 10.0 มิลลิโมลาร์ และ Tris 1 % (น้ำหนักต่อปริมาตร) สภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย 246 ± 14 (ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร)¹ มีสภาพต้านทาน $(4.1 \pm 0.2) \times 10^3$ โอห์ม-เซนติเมตร

2.4.3 การเตรียมสารละลาย APW เพื่อศึกษาผลของไอออน

การศึกษาในส่วนนี้เพื่อดูว่าหากสารละลายรอบรากขาดไอออนชนิดใดชนิดหนึ่งไปจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าไอออนและการเติบโตของรากอย่างไร ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะทำให้รู้ว่าไอออนชนิดใดมีส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมดังกล่าว ในการเตรียมสารละลาย APW เพื่อศึกษาผลของไอออนต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนนั้น ใช้วิธีการแทนที่ไอออน (ion substitution) (Miller, 1989; Troxell, 1989) โดยเปลี่ยนเอาไอออนที่เราต้องการศึกษาออกจาก APW ปกติแล้วให้ไอออนที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายกันแทน เช่นมีจำนวนและชนิดของประจุเท่ากัน เป็นต้น ส่วนการปรับ pH จะใช้ Tris 5% และ 1% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เพื่อให้ได้สารละลาย APW ที่มี pH 6.00 ± 0.05 และมีสภาพนำไฟฟ้า 205 ± 14 (ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร)⁻¹ ซึ่งมีค่าสภาพต้านทาน $(4.9 \pm 0.3) \times 10^3$ โอห์ม-เซนติเมตร

สารละลาย APW ประกอบด้วยไอออนสี่ชนิดด้วยกันคือ แคลเซียม (Ca^{2+}) โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) และคลอไรด์ (Cl^-) ในการเตรียมสารละลาย APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออน ให้แมกนีเซียมคลอไรด์ 0.1 มิลลิโมลาร์แทนแคลเซียมคลอไรด์ (Troxell, 1989) ในทำนองเดียวกัน การเตรียมสารละลาย APW ที่ไม่มีโซเดียมไอออนหรือโพแทสเซียมไอออน จะใช้โพแทสเซียมคลอไรด์หรือโซเดียมคลอไรด์แทนในความเข้มข้นที่เท่ากัน (Miller, 1989) ดังสรุปในตาราง 1 กรณีของสารละลาย APW ที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน ใช้โซเดียมซัลเฟตแทนโซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมซัลเฟตแทนโพแทสเซียมคลอไรด์และแคลเซียมซัลเฟตแทนแคลเซียมคลอไรด์ในความเข้มข้นที่เท่ากัน (Miller, 1989) (ตาราง 1)

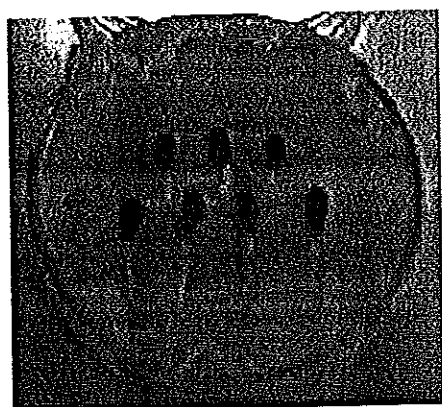
ตาราง 1 ส่วนประกอบของสารเคมีในการเตรียม APW เพื่อศึกษาผลของไอออน

สารเคมี	ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิโมลาร์)				
	APW ปกติ	APW ไม่มี Ca^{2+}	APW ไม่มี Na^+	APW ไม่มี K^+	APW ไม่มี Cl^-
โซเดียมคลอไรด์	1.0	1.0	-	1.1	-
โพแทสเซียมคลอไรด์	0.1	0.1	1.1	-	-
แคลเซียมคลอไรด์	0.1	-	0.1	0.1	-
MES	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
แมกนีเซียมคลอไรด์	-	0.1	-	-	-
โซเดียมซัลเฟต	-	-	-	-	1.0
โพแทสเซียมซัลเฟต	-	-	-	-	0.1
แคลเซียมซัลเฟต	-	-	-	-	0.1

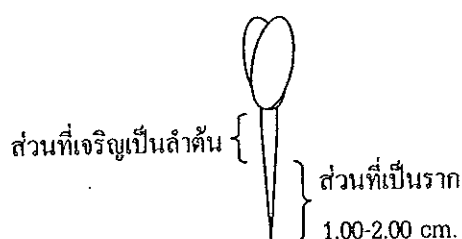
ปรับด้วย Tris 1 , 5 และ 10 % จนได้ pH 6.00 ± 0.05

2.5 การเพาะเมล็ดทานตะวัน

ในขั้นต้นได้ศึกษาความสามารถในการงอกของเมล็ดทานตะวันสายพันธุ์ต่างๆ ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล เหล่าสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าสายพันธุ์ลูกผสมคาร์กิลล์ 3322 จะงอกได้เร็ว มีเปอร์เซ็นต์การงอกดีและได้รากที่แข็งแรงจึงใช้สายพันธุ์นี้ในการทดลอง ในการเพาะเมล็ดเพื่อให้ได้รากที่เหมาะสมนั้นเริ่มจากการนำเมล็ดทานตะวันมาแช่ในไฮเตอร์เพื่อทำความสะอาดผิวเป็นเวลาประมาณ 15 นาที สารละลายนี้มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบสำคัญในการฆ่าเชื้อโรค จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง แล้วนำเมล็ดที่ได้ไปวางบนกระดาษทิชชูที่ชุ่มด้วยสารละลาย APW ในจานเพาะเชื้อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 เซนติเมตร โดยวางเมล็ดเพื่อให้รากงอกอยู่ในแนวเดียวกัน จากนั้นปิดทับด้วยกระดาษทิชชูแล้วฉีดสารละลาย APW จนกระดาษชุ่ม จากนั้นเปิดจานเพาะเชื้อและเก็บใน ตู้มืดที่อุณหภูมิห้อง (26 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยวางจานเพาะเชื้อในแนวตั้งเพื่อให้รากงอกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อให้ได้รากที่ตรงดังแสดงในภาพประกอบ 8 หลังจากนั้น 2 วัน จะได้รากที่มีความยาวประมาณ 1.0 - 2.0 เซนติเมตร ซึ่งมีบริเวณที่สำคัญของรากครบคือ หมวกราก บริเวณการแบ่งตัว บริเวณที่มีการยึดตัว และบริเวณขนราก



(A)

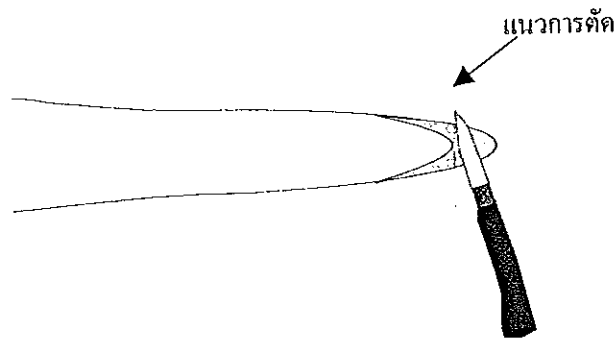


(B)

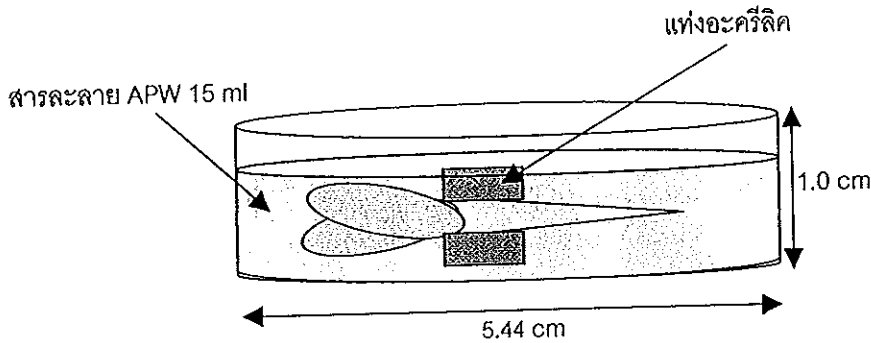
ภาพประกอบ 8 (A) การวางเมล็ดเพื่อให้รากงอกลงในแนวตั้ง
(B) ความยาวของรากทานตะวันที่ต้องการ

2.6 การเตรียมรากทานตะวันสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน

นำลำทานตะวันที่มีรากตรง ยาว 1.50 - 2.00 เซนติเมตร มาแกะเปลือกที่หุ้มเมล็ดออกและใช้กระดาษทิชชูชุ่มน้ำเช็ดทำความสะอาดราก และตัดหมวกรากออก (ภาพประกอบ 9) เพื่อไม่ให้รากงอกตามแรงโน้มถ่วงระหว่างการทดลอง (Juniper and Groves, 1966) การตัดหมวกรากด้วยมีดผ่าตัดนี้ทำภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (stereo microscope, Olympus, SZ III, Tokyo, Japan) โดยไม่ให้ถูกส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อเจริญ จากนั้นตรึงรากทานตะวันระหว่างแท่งอะคริลิกโดยใช้ซิลิโคนกรีสเป็นตัวยึดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการในจานเพาะเชื้อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.44 เซนติเมตร สูง 1.0 เซนติเมตร (ภาพประกอบ 10) เติมน้ำละลาย APW สภาวะต่างๆ ที่ต้องการศึกษา 15 มิลลิลิตร หลังจากทดลองไประยะหนึ่งพบว่าถึงแม้จะตัดหมวกราก รากก็ยังงอกลงตามแรงโน้มถ่วงแต่ช้ากว่าไม่ตัดหมวกรากและพบว่าหากใช้รากที่สั้นลงรากจะงอช้าลงเช่นกัน ดังนั้นในการทดลองหลังจากนั้นจึงเลือกใช้รากที่สั้นลงคือที่มีความยาว 1.00-1.50 เซนติเมตร โดยไม่ตัดหมวกรากและจากการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันทั้งที่มีการตัดหมวกรากและไม่ตัดหมวกราก พบว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 9 แนวการตัดหมวกราก



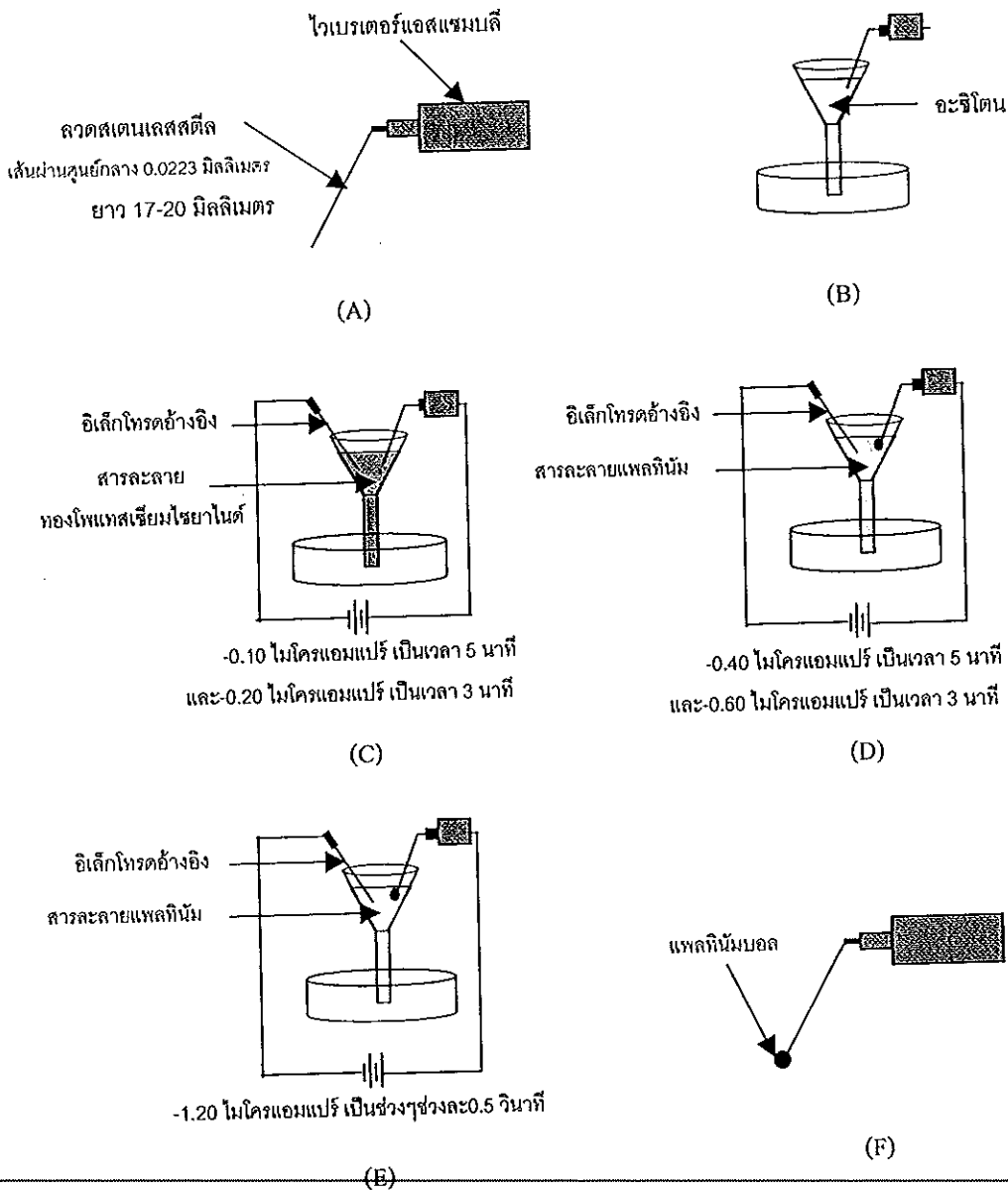
ภาพประกอบ 10 รากทานตะวันที่ตรึงในงานเพาะเชื้อสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน

2.7 การเตรียมโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า

โพรบหรืออิเล็กโทรดที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าเตรียมจากลวดสแตนเลสสตีลที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าหมดทั้งเส้นยกเว้นที่ปลายแหลมของโพรบ (parlyene-coated stainless-steel electrode) ตัวโพรบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0223 มิลลิเมตร ยาว 17-20 มิลลิเมตร ส่วนปลายของโพรบบริเวณที่ไม่มีฉนวนเคลือบมีลักษณะเรียวเล็กเป็นปลายแหลมยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร การชุบโพรบประกอบด้วย การชุบทองและแพลทินัมแบล็ค (platinum black) โดยเริ่มจากการต่อโพรบเข้ากับไวเบรเตอร์แอสซ็อมบลีดังภาพประกอบ 11(A) แล้วทำความสะอาดปลายโพรบด้วยการแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที (ภาพประกอบ 11(B)) หลังจากนั้นชุบทองที่ปลายโพรบโดยใช้สารละลายทองโพแทสเซียมไซยาไนด์ 0.2 % (น้ำหนักต่อปริมาตร) และผ่านกระแสไฟฟ้า -0.10 ไมโครแอมแปร์เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยกระแสไฟฟ้า -0.20 ไมโครแอมแปร์เป็นเวลา 3 นาที

(ภาพประกอบ 11(C)) จะเกิดทรงกลมทองที่ปลายโพรบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ไมโครเมตร หลังจากนั้นชุบด้วยแพลทินัมแบล็คโดยใช้สารละลายซึ่งประกอบด้วยเลดอะซิเตต 0.01% (น้ำหนักต่อปริมาตร) และแพลทินัมคลอไรด์ 1.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยผ่านกระแสไฟฟ้า -0.40 ไมโครแอมแปร์เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยกระแสไฟฟ้า -0.60 ไมโครแอมแปร์เป็นเวลา 3 นาที (ภาพประกอบ 11(D)) จะได้ทรงกลมที่ปลายโพรบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 ไมโครเมตร ขั้นสุดท้ายผ่านกระแสไฟฟ้า -1.20 ไมโครแอมแปร์ เป็นช่วงๆช่วงละ 0.5 วินาที (ภาพประกอบ 11(E)) จนกระทั่งปลายของโพรบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 ไมโครเมตร (ภาพประกอบ 11(F))

หลังจากชุบโพรบเสร็จแล้วทำการทดสอบค่าความจุของโพรบโดยใช้ระบบตรวจสอบในชุดอุปกรณ์ไวเบรติงโพรบ ค่าความจุจะต้องไม่น้อยกว่า 2 นาโนฟารัด โพรบจึงสามารถใช้ได้ การที่ตรวจสอบความจุเนื่องจากค่าความจุแปรผันตรงกับพื้นที่ผิว ถ้าค่าความจุมากพื้นที่ผิวจะมากด้วย ซึ่งหมายความว่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของโพรบจะน้อย สัญญาณรบกวนจากโพรบซึ่งแปรผันตรงกับอิมพีแดนซ์ก็จะน้อยตามไปด้วย



ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการชุบไฟโรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน (A) ลักษณะของไฟโรบมองจากด้านข้างก่อนผ่านขั้นตอนการชุบ (B) ทำความสะอาดไฟโรบด้วยอะซิโตน (C) ชุบในสารละลายทองโพแทสเซียมไซยาไนด์ (D) และ (E) ชุบด้วยสารละลายแพลทินัมคลอไรด์ (F) ลักษณะของไฟโรบเมื่อผ่านการชุบแล้ว

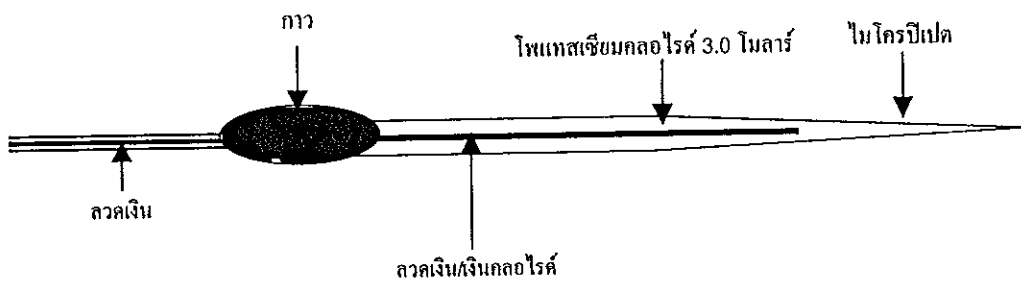
2.8 การเตรียมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ปรับเทียบ

ในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนด้วยโวลต์เมตริกโพรบ ต้องปรับเทียบโพรบ (calibrate) สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าก่อนวัดตัวอย่างจริงทุกครั้ง โดยใช้ไมโครอิเล็กทรอนิกส์จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ทราบค่าให้แกโพรบแล้วโพรบจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้านั้น สำหรับการเตรียมไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบ่งการเตรียมออกเป็นสองส่วนคือเตรียมไมโครปิเปตที่อยู่ภายนอกและลวดเงิน/เงินคลอไรด์ที่อยู่ภายใน (ภาพประกอบ 12)

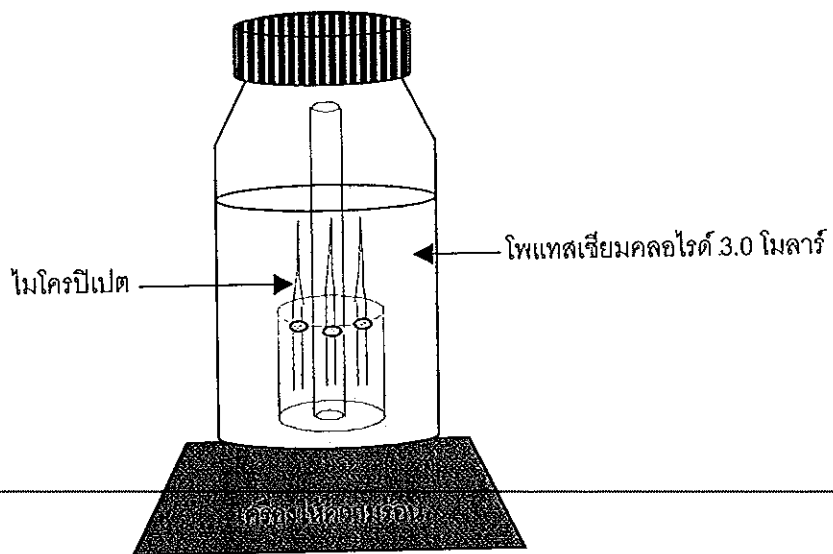
ในการเตรียมไมโครปิเปต นำไมโครปิเปตที่ยึดอยู่รอบทรงกระบอกแก้วที่แช่ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ (ภาพประกอบ 13) ไปต้มจนเดือด อากาศในไมโครปิเปตจะขยายตัวและเคลื่อนที่ออกจากปิเปต เมื่อหยุดให้ความร้อนและทิ้งไว้สักครู่อากาศส่วนที่เหลือในปิเปตจะหดตัวทำให้สารละลายสามารถเข้าไปแทนที่ในไมโครปิเปต ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนที่จะสอดลวดเงิน/เงินคลอไรด์เข้าไป

การเตรียมลวดเงิน/เงินคลอไรด์ใช้ลวดเงินที่มีเทพลอนหุ้มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ± 0.05 มิลลิเมตร ยาว 10.0 เซนติเมตร ปอกเทพลอน 3.0 เซนติเมตร ออกจากปลายด้านหนึ่งของลวด ทำให้ส่วนนี้มีแต่ลวดเงินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 ± 0.05 มิลลิเมตร ใช้กระดาษทรายขัดลวดเงินให้ผิวของลวดมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว จากนั้นเช็ดด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดไขมันและคราบสกปรก แล้วจึงชุบลวดเงินในกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ภาพประกอบ 14) โดยใช้กระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรจะเกิดขึ้นของเงินคลอไรด์ (AgCl) เคลือบอยู่บนลวด การชุบนี้ทำ 2 ครั้ง ครั้งแรกใช้เวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเปิดวงจรและทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงทำซ้ำอีก 2 ชั่วโมง

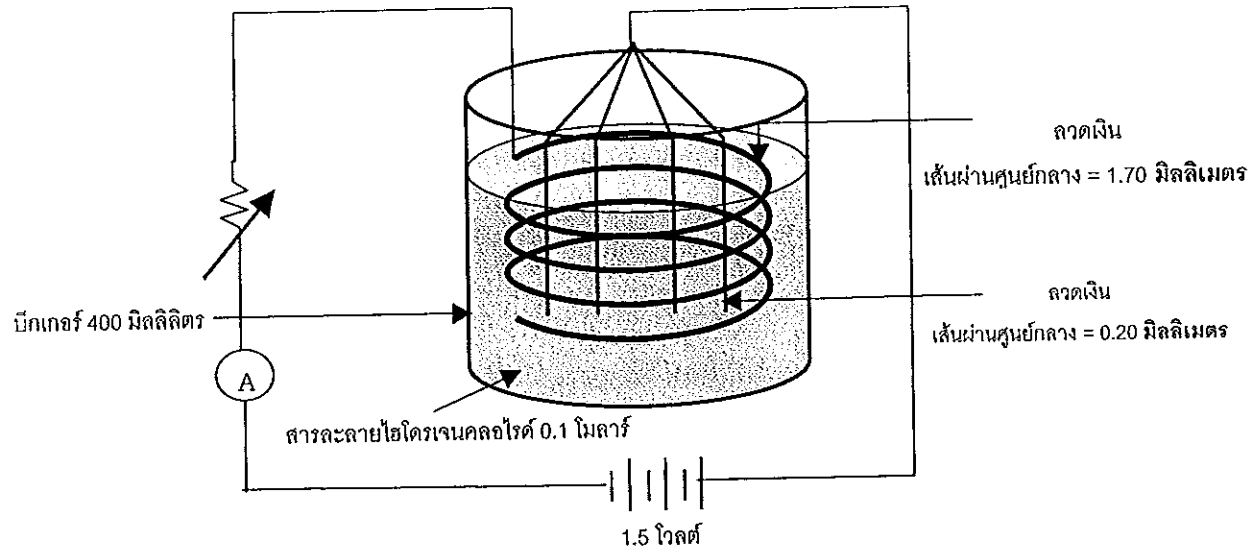
หลังจากนั้นแช่ลวดเงิน/เงินคลอไรด์ไว้ในสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อปรับสภาพ นำลวดเงิน/เงินคลอไรด์นี้สอดเข้าไปในไมโครปิเปตที่เตรียมไว้ จากนั้นใช้กาวยซิลิโคนยึดลวดและไมโครปิเปตไว้ด้วยกัน (ภาพประกอบ 12) ในการทดลองใช้อิเล็กทรอนิกส์จ่ายกระแสไฟฟ้าที่รู้ค่าเพื่อใช้ในการปรับเทียบสัญญาณ



ภาพประกอบ 12 ไมโครอิเล็กโทรดสำหรับเปรียบเทียบ



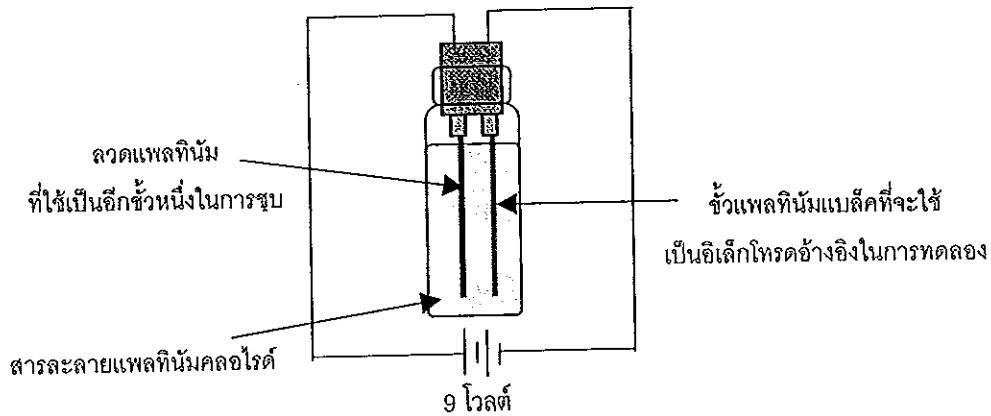
ภาพประกอบ 13 ตั้มไมโครปิเปตในสารละลายโพแทสเซียมกลอไรด์



ภาพประกอบ 14 การจัดอุปกรณ์สำหรับชุบไมโครอิลีกโทรด

2.9 การเตรียมอิลีกโทรดอ้างอิง

ใช้ลวดแพลทินัมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 ± 0.05 มิลลิเมตร 3 เส้น ยาวเส้นละ 4.00 ± 0.05 เซนติเมตร ทำความสะอาดลวดโดยเช็ดด้วยอะซิโตน ใช้ลวดแพลทินัมเส้นหนึ่งเป็นขั้วบวก ขั้วที่ชุบแพลทินัมเป็นขั้วลบ ชุบลวดแพลทินัมที่ละลายด้วยสารละลายแพลทินัมแบล็คเป็นเวลา 10 วินาที โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ (ภาพประกอบ 15) จนได้ลวดแพลทินัมแบล็ค 2 เส้น สำหรับใช้เป็นอิลีกโทรดอ้างอิง

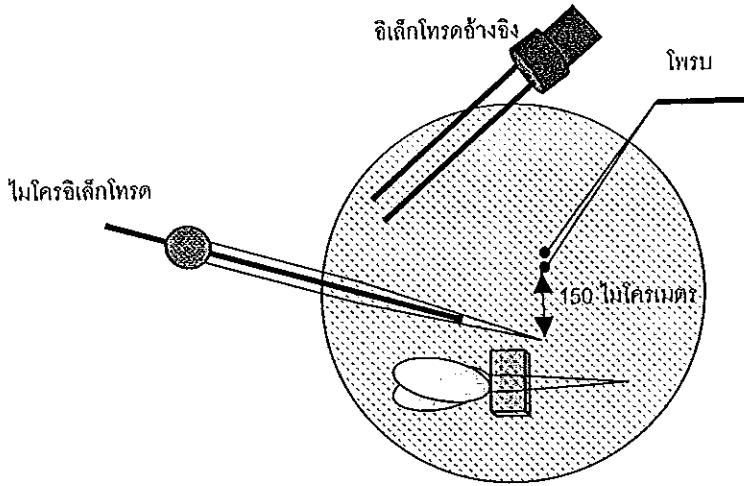


ภาพประกอบ 15 การจัดอุปกรณ์เพื่อขูดอิเล็กโทรดอ้างอิง

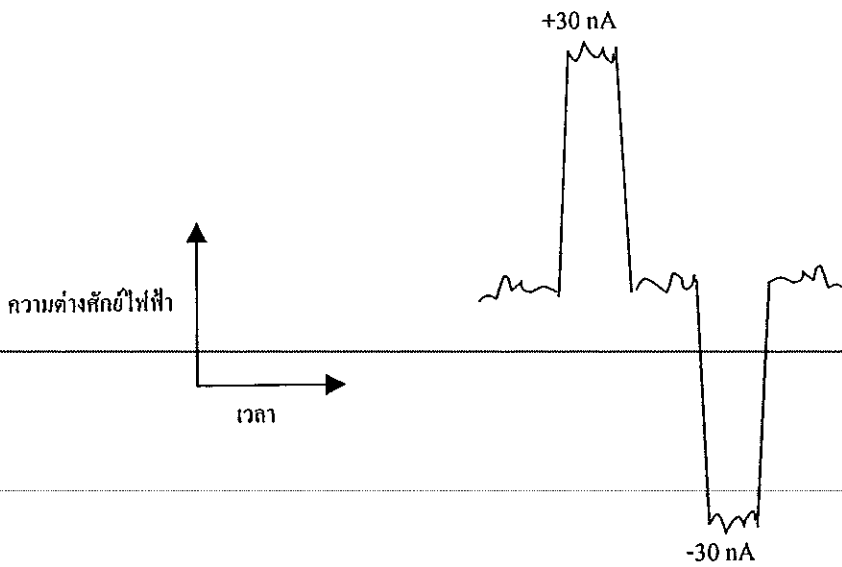
2.10 การปรับเทียบโพรบ

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนใน 2 มิติ คือกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแนวแกน y ดังนั้นจึงต้องปรับเทียบโพรบทั้ง 2 แนวแกน การปรับเทียบโพรบจะปรับเทียบที่ละแนวแกนโดยเริ่มจากแนวแกนใดก่อนก็ได้ การปรับเทียบโพรบในแนวแกน y ทำโดยปรับให้ปลายของไมโครอิเล็กโทรดอยู่ในระนาบเดียวกับโพรบ (โพรบสั้นทั้งแนวแกน x และแกน y) และอยู่ห่างจากปลายของโพรบในแนวแกน y เป็นระยะ 150 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 16 จากนั้นผ่านกระแสไฟฟ้า +30 นาโนแอมแปร์เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงผ่านกระแสไฟฟ้า -30 นาโนแอมแปร์เป็นเวลา 2 นาที การใช้กระแสไฟฟ้าบวกและลบก็เพื่อให้มีสัญญาณปรับเทียบจากกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางต่างกัน โพรบจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากกระแสไฟฟ้า และบันทึกไว้บนเครื่องบันทึกสัญญาณ ดังแสดงในภาพประกอบ 17 ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้สำหรับเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้า ส่วนค่าบวกหรือลบของความต่างศักย์ไฟฟ้าจะใช้เทียบว่ากระแสไฟฟ้าผ่านโพรบจากด้านใดไปด้านใด (ดูภาพประกอบ 17) สำหรับการปรับเทียบในแนวแกน x แสดงในภาพประกอบ 18 และมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการปรับเทียบในแนวแกน y

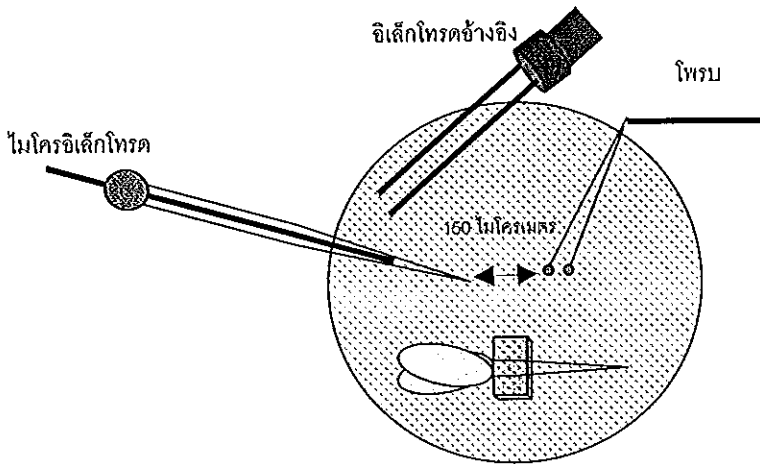
เมื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไอออนรอบราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้กับสัญญาณปรับเทียบในแนวแกน x และแนวแกน y ที่บันทึกไว้ สำหรับทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนในแนวแกน x และแกน y พิจารณาจากค่าบวกหรือลบของความต่างศักย์ไฟฟ้าประกอบกับทิศของกระแสไฟฟ้าตามภาพประกอบ 19 และ 20 ตามลำดับ



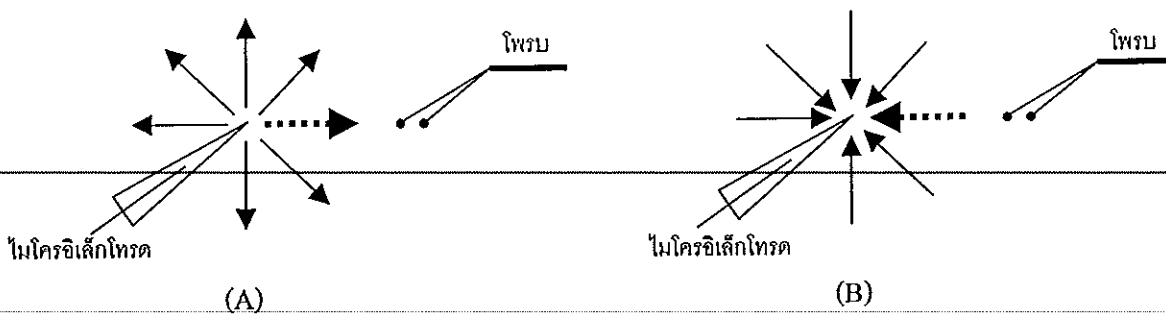
ภาพประกอบ 16 การปรับเทียบอิเล็กโทรดในแนวแกน y โพรบจะสั้นทั้งในแนวแกน x และ y แต่
ในรูปนี้แสดงเฉพาะในแนวแกน y



ภาพประกอบ 17 ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องกระแสไฟฟ้า +30 นาโนแอมแปร์และ
-30 นาโนแอมแปร์



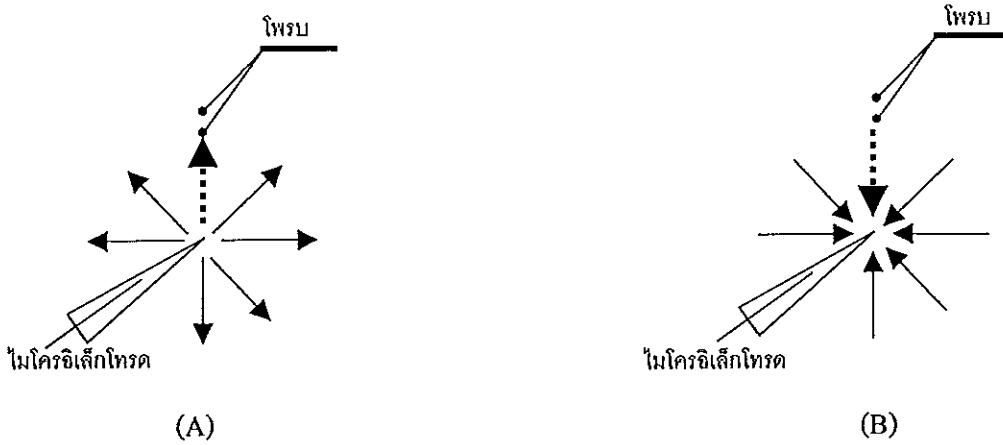
ภาพประกอบ 18 การปรับเทียบอิเล็กโทรดในแนวแกน x โพรบจะสั้นทั้งในแนวแกน x และ y แต่ในรูปนี้แสดงเฉพาะในแนวแกน x



หมายเหตุ พิจารณาตามลูกศรเส้นประ



ภาพประกอบ 19 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน x (A) ไมโครอิเล็กโทรดให้กระแสไฟฟ้าทิศ +x +30 นาโนแอมแปร์ (ออกจากไมโครอิเล็กโทรด) กระแสไฟฟ้าผ่านโพรบจากซ้ายไปขวา (B) ไมโครอิเล็กโทรดให้กระแสไฟฟ้าทิศ -x -30 นาโนแอมแปร์ (เข้าสู่ไมโครอิเล็กโทรด) กระแสไฟฟ้าผ่านโพรบจากขวาไปซ้าย

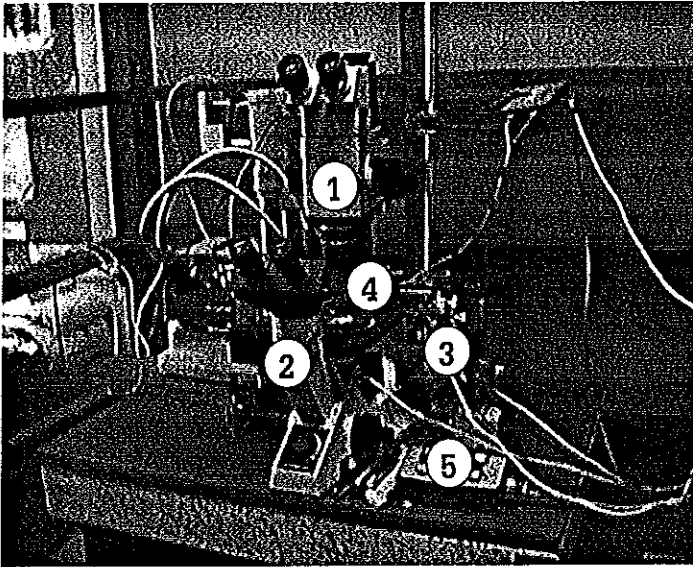


หมายเหตุ พิจารณาตามลูกศรเส้นประ

ภาพประกอบ 20 ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน y (A) ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้กระแสไฟฟ้าทิศ $+y +30$ นาโนแอมแปร์ (ออกจากไมโครชิปเปิด) กระแสไฟฟ้าผ่านโพรบจากด้านล่างขึ้นด้านบน (B) ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้กระแสไฟฟ้าทิศ $-y -30$ นาโนแอมแปร์ (เข้าสู่ไมโครชิปเปิด) กระแสไฟฟ้าผ่านโพรบจากด้านบนลงด้านล่าง

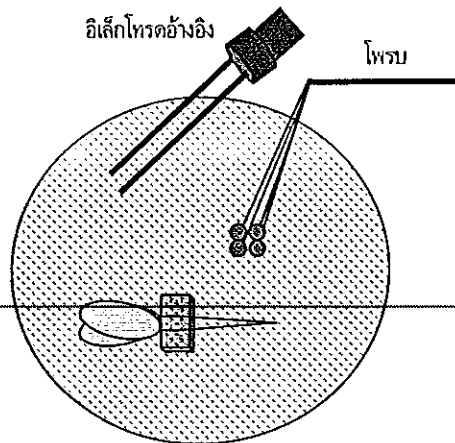
2.11 การวัดกระแสไฟฟ้าไอออน

ภาพประกอบ 21 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าไอออน ในการวัดวางจานเพาะเชื้อที่มีรากทานตะวันบนฐานของกล้องจุลทรรศน์แบบอินเวอร์ทแล้วจุ่มอิเล็กโทรดอ้างอิง 2 เส้นลงในสารละลาย จากนั้นเลื่อนโพรบและไมโครอิเล็กทรอนิกส์สำหรับปรับเทียบให้อยู่ในระนาบเดียวกับระนาบของรากโดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ แล้วทำการปรับเทียบอิเล็กโทรดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หลังจากปรับเทียบอิเล็กโทรดแล้วนำไมโครอิเล็กทรอนิกส์ออกจากสารละลาย ดังนั้นจะเหลือเพียงอิเล็กโทรดอ้างอิง 2 เส้น โพรบและรากทานตะวันในสารละลายเท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบ



- ① → กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ
- ② → กล้องจุลทรรศน์แบบอินเวอร์ท
- ③ → อุปกรณ์จับยึดอิเล็กโทรด
- ④ → โพรบสำหรับวัด
- ⑤ → สวิตช์ปรับความถี่และแอมพลิจูด

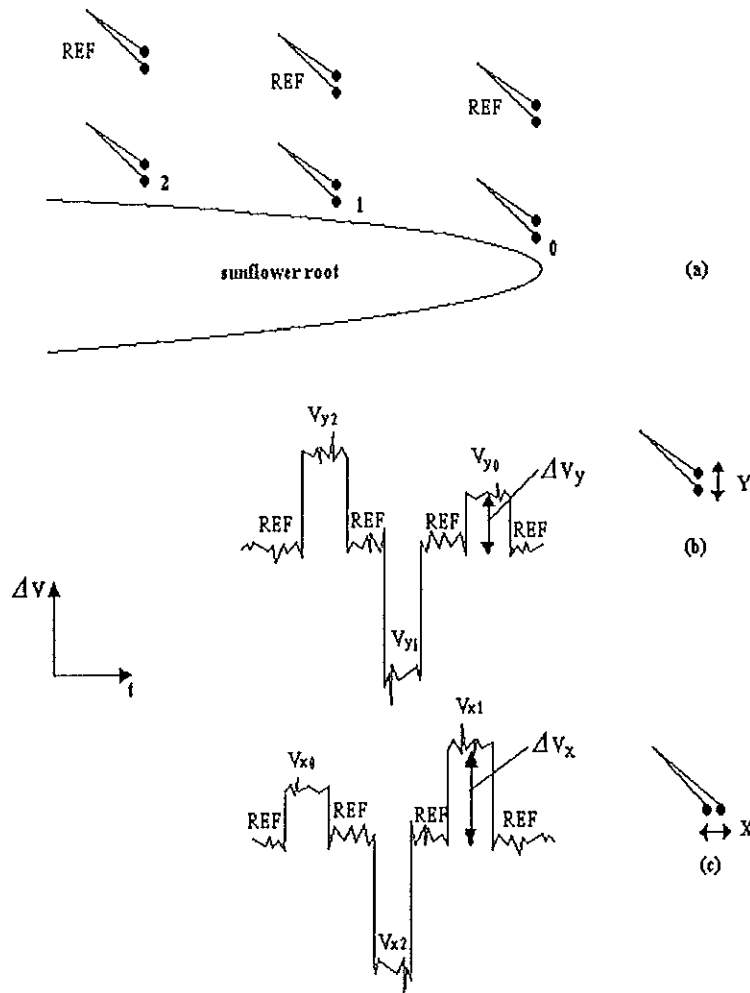
ภาพประกอบ 21 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์วัด



ภาพประกอบ 22 โพรบที่สั้นทั้งแกน x และแกน y อิเล็กโทรดอ้างอิงและรากทานตะวันในสารละลาย

เนื่องจากรากมีขนาดใหญ่จึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ ซึ่งสามารถมองเห็นบริเวณกว้างสำหรับดูตำแหน่งและลักษณะของราก ตำแหน่งที่จะวัดกระแสไฟฟ้าไอออนกำหนดโดยใช้สเกลของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ โพรบซึ่งติดอยู่กับชุดไวเบรเตอร์ซึ่งถูกยึดไว้กับอุปกรณ์จับยึดอเล็กโทรด (3D micromanipulator) จะถูกเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยการปรับอุปกรณ์จับยึดอเล็กโทรดด้วยมือ

ตำแหน่งแรกที่วัดกระแสไฟฟ้าไอออนคือที่ปลายรากและจะวัดทุกๆ 500 ไมโครเมตรตลอดความยาวราก ในการวัดแต่ละตำแหน่งโพรบจะถูกเลื่อนออกห่างจากผิวรากประมาณ 2,000 ไมโครเมตร เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิง (เป็นตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้าไอออนเป็นศูนย์) (ภาพประกอบ 23) หลังจากนั้นจึงเลื่อนโพรบเข้าหาผิวราก โดยให้อยู่ที่ตำแหน่งห่างจากผิวราก 150 ไมโครเมตร ถ้ามีกระแสไฟฟ้าในบริเวณที่วัดจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้างวดแสดงในภาพประกอบ 23 จากการวัดแต่ละตำแหน่งจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x (แกนที่ขนานกับความยาวราก) และแนวแกน y (แกนที่ตั้งฉากกับความยาวราก) ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดและพิจารณาทิศทางของกระแสไฟฟ้าทั้งในแนวแกน x และแกน y ได้และนำค่าที่ได้จากทั้ง 2 แกนมารวมกันแบบเวกเตอร์จะได้กระแสไฟฟ้ารวมของแต่ละตำแหน่ง



ภาพประกอบ 23 วิธีการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยระบบไวเบรติงโพรม ขณะวัดไวเบรติงโพรม
 ดันทั้งในแนวแกน y และแกน x เดือนมิถุนายนระหว่างตำแหน่งที่ไม่มีกระแส
 ไฟฟ้า (REF) กับตำแหน่งใกล้ราก 0 หรือ 1 หรือ 2 ซึ่งมีระยะห่างจากปลายราก
 0 500 และ 1000 μm ตามลำดับ (a) แสดง ΔV ($\Delta V_x = V_x - \text{Ref } x$ และ $\Delta V_y =$
 $V_y - \text{Ref } y$) ที่วัดได้ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าไอออนที่วัดได้ในแกน y (b) และแกน x
 (c)

2.12 การคำนวณผล

ค่าที่วัดได้จากระบบไวเบรติงโพรบคือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า แต่สิ่งที่ต้องการคือกระแสไฟฟ้าไอออน (ความหนาแน่นกระแส) ในตำแหน่งนั้นๆ การแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า ใช้วิธีเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นสัญญาณเปรียบเทียบ (หัวข้อ 2.11) ดังนี้ ให้ V_{xx} และ V_{yy} เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งได้จากการเปรียบเทียบที่ใช้กระแสไฟฟ้า I ขนาด 30 นาโนแอมแปร์ ซึ่งวัดที่ตำแหน่ง $r = 150$ ไมโครเมตร จากแหล่งกำเนิด ซึ่งคิดเป็นขนาดของความหนาแน่นกระแส J จากสมการ

$$J = \frac{I}{4\pi r^2}$$

โดย J = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบ
 r = ระยะห่างระหว่างไมโครอิเล็กทรอนิกส์โพรบและไวเบรติงโพรบ
 I = กระแสไฟฟ้าที่ให้ตอนเปรียบเทียบ

ดังนั้น

$$\begin{aligned} J &= \frac{30 \text{ nA}}{4\pi (150 \text{ }\mu\text{m})^2} \\ &= 10.6 \mu\text{A} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

ให้ V_{x1} และ V_{y1} เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x และแนวแกน y ที่วัดได้ที่ตำแหน่งใดๆ ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสดังกล่าวได้จาก

$$J_x = \text{ขนาดของความหนาแน่นกระแสในแนวแกน } x$$

$$= \frac{V_{x1}}{V_{xx}} \times 10.6 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$$

และในทำนองเดียวกัน

$$J_y = \text{ขนาดของความหนาแน่นกระแสในแนวแกน } y$$

$$= \frac{V_{y1}}{V_{yy}} \times 10.6 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$$

อย่างไรก็ตามจากการทดลองในขณะที่ปรับเทียบในแนวแกน y ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในแนวแกน y เท่านั้น กลับพบว่ามีความต่างศักย์ไฟฟ้าจากช่องสัญญาณ x เกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการสั้นของโพรบในแนวแกน x จะไม่สั้นในแนวซ้าย-ขวาที่แท้จริง แต่จะมีแนวเฉียงขึ้นไปในแนวบน - ล่างเล็กน้อย (นั่นคือสั้นในแนว \nearrow) ดังนั้นจึงต้องนำค่าศักย์ไฟฟ้านี้มาร่วมพิจารณาด้วย ให้ V'_x เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากช่องสัญญาณ x เมื่อปรับเทียบโพรบโดยผ่านกระแสไฟฟ้าในแนวแกน y ค่านี้จะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณปรับเทียบในช่องสัญญาณ y V_{yy} ในการวัดจริงค่า V_{x1} ที่ได้จากช่องสัญญาณ x จะมีส่วนหนึ่งที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในแนวแกน y ซึ่งต้องหักลบออกไป

$$\text{ซึ่งค่านี้หาได้จาก } V_{y1} \left(\frac{V'_x}{V_{yy}} \right)$$

ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ถูกต้องของแกน x คือ

$$V_{x2} = V_{x1} - \frac{V_{y1} V'_x}{V_{yy}}$$

ส่วนทิศของกระแสไฟฟ้านั้นพิจารณาจากค่าบวกหรือลบของความต่างศักย์ไฟฟ้า สมมติว่าเมื่อปรับเทียบกระแสไฟฟ้าที่มีทิศ $+x$ และ $+y$ ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าบวกและกระแสไฟฟ้าที่มีทิศ $-x$ และ $-y$ ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบ ดังนั้นค่าบวกของความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่มีทิศในแนว $+x$ หรือ $+y$ และในทางตรงกันข้ามถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่มีทิศในแนว $-x$ หรือ $-y$

ตัวอย่างการคำนวณ J_x และ J_y

ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการปรับเทียบ

$$V_{xx} = 1.9 \text{ V}$$

$$V_{yy} = 2.2 \text{ V}$$

$$V'_x = 0.6 \text{ V}$$

และสมมติว่าค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ที่ตำแหน่งหนึ่ง

$$V_{x1} = -0.30 \text{ V}$$

$$V_{y1} = -0.25 \text{ V}$$

ดังนั้น

แกน Y

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{yy}) 2.2 V มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $10.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{y1}) -0.25 V ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $\frac{10.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2}{2.20\text{V}} * (-0.25) \text{ V}$

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_y) ที่ได้คือ $-1.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ นั่นคือมีขนาด $1.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ทิศ -y

แกน X

เนื่องจากสัญญาณในแนวแกน x ตอนปรับเทียบถูกรบกวนจากการสั้นในแนวแกน y ด้วย สมมติว่าค่า $V_x' = 0.6$ โวลต์

ดังนั้นในการคำนวณจะต้องหักลบสัญญาณรบกวนนี้ออกก่อนนำไปคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนี้

ให้ $V_x' =$ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการรบกวน

$V_{x2} =$ ความต่างศักย์ที่หักลบสัญญาณรบกวนแล้ว

$$V_{x2} = V_{x1} - \frac{V_x' V_{y1}}{V_{yy}}$$

ดังนั้น

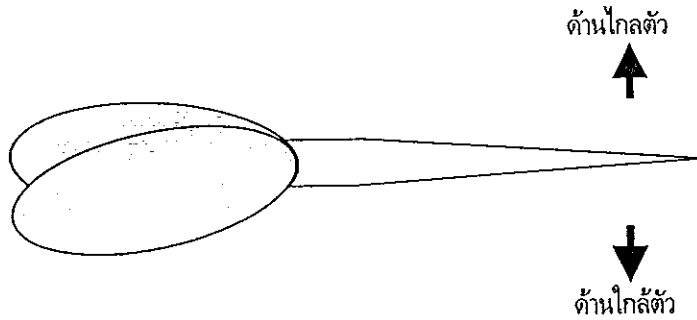
$$V_{x2} = -0.30 - \frac{(0.60)(-0.25)}{2.2} = -0.23 \text{ V}$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{xx}) 1.9 V มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $10.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

∴ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{x2}) -0.23 V ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $\frac{10.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2}{1.90\text{V}} * (-0.23) \text{ V}$

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_x) ที่ได้คือ $-1.29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ นั่นคือมีขนาด $1.29 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ทิศ -x

ในการวัดรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนจะวัดรอบรากคือทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวผู้วัด (ดูภาพประกอบ 24) ตาราง 2 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ



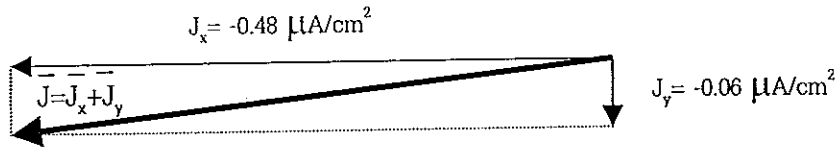
ภาพประกอบ 24 ภาพกล่าวทานตะวันมองจากด้านบนแสดงความหมายของด้านใกล้ตัวและด้านใกล้ตัวผู้วัดของการวัด

ตาราง 2 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y (V_{x1}, V_{x2}, V_{y1}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y (J_x, J_y) ที่ได้จากการคำนวณจากความต่างศักย์ไฟฟ้า โดย $J_x = \frac{V_{x2}}{V_{xx}} \times 10.6$ และ $J_y = \frac{V_{y1}}{V_{yy}} \times 10.6$ (รายละเอียดดูในเนื้อหา) โดย V_{xx} และ V_{yy} คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการปรับเทียบตามแนวแกน x และแนวแกน y ตามลำดับ

ตำแหน่ง (mm.จากปลาย ราก)	มิวรากด้านใกล้ตัวผู้วัด					มิวรากด้านใกล้ตัวผู้วัด				
	V_{x1}	V_{y1}	V_{x2}	J_x	J_y	V_{x1}	V_{y1}	V_{x2}	J_x	J_y
0.00	-0.11	-0.01	-0.09	-0.48	-0.06	-0.33	-0.02	-0.29	-1.46	-0.13
0.50	-0.22	-0.24	-0.09	-0.45	-1.54	-0.64	0.32	-0.81	-4.11	2.06
1.00	0.08	-0.43	0.30	1.51	-2.57	-0.32	0.34	-0.51	-2.55	2.18
1.50	0.42	-0.36	0.60	3.01	-2.31	0.14	0.26	-0.005	-0.01	1.67
2.00	0.33	-0.08	0.34	1.74	-0.51	0.38	-0.02	0.39	1.97	-0.13
2.50	0.10	0.06	0.07	0.34	0.39	0.22	-0.06	0.23	1.18	-0.39
3.00	-0.04	0.11	-0.09	-0.48	0.64	0.14	-0.04	0.16	0.82	-0.26

ในการหากระแสไฟฟ้ารวมที่แต่ละตำแหน่งของการวัดนำความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y ที่คำนวณได้มารวมแบบเวกเตอร์ (ภาพประกอบ 25) ตัวอย่างเช่นจาก

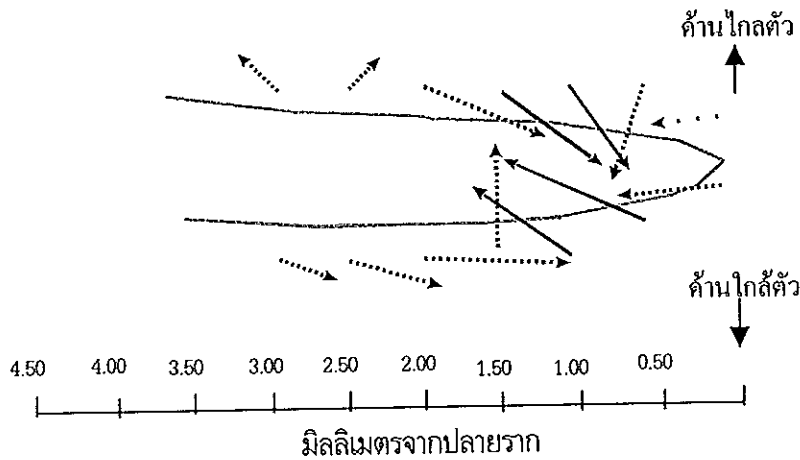
ข้อมูลในตาราง 2 ตำแหน่งที่ 0.0 ด้านใกล้ตัว มี $J_x = -0.48 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และ $J_y = -0.06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ เมื่อนำมารวมกันแบบเวกเตอร์จะได้ดังภาพประกอบ 25 ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง



ภาพประกอบ 25 การรวมกันแบบเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x, \vec{J}_x และแนวแกน y, \vec{J}_y ได้เป็นกระแสไฟฟ้ารวม $\vec{J}_x + \vec{J}_y$

หลังจากนั้นนำกระแสไฟฟ้าจากตาราง 2 ที่รวมกันตามภาพประกอบ 25 มาเขียนลงที่ตำแหน่งของการวัดรอบภาพของรากทานตะวันที่วาดโดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ดังภาพประกอบ

26



ภาพประกอบ 26 ตัวอย่างการเขียนทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออน

2.13 การศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวัน

2.13.1 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ รากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ

รากพืชแบ่งได้เป็น 4 บริเวณโดยแบ่งตามลักษณะของเนื้อเยื่อ การศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากก็เพื่อดูว่าบริเวณต่างๆในรากพืชมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างไร สำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันเริ่มต้นโดยตรึงรากทานตะวันและแช่ในสารละลาย APW pH 6.00 เพื่อให้รากปรับสภาพเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงปรับเทียบโพรบแล้ววัดกระแสไฟฟ้าไอออนตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว โดยวัดทั้ง 2 ด้านของรากคือด้านไกลตัวและด้านใกล้ตัวผู้วัด (ภาพประกอบ 21) โดยวัดทั้งในรากปกติและรากที่ตัดทอนราก จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาแปลผล (ดู 2.12) และทดสอบค่าทางสถิติ (ดู 2.16)

2.13.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่างๆ

จากการทดลองในระบบของพืชต่างๆ พบว่า pH มีผลต่อรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน (Miller, 1989; Troxell, 1989) ในการศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าวในรากทานตะวันทำโดยเปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่อยู่ในสารละลาย APW pH 6.00 กับรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนที่อยู่ในสารละลาย APW ที่ pH ต่างๆ และในการทดลองต่อจากนี้จะใช้รากปกติที่ไม่ตัดทอนราก

2.13.2.1 pH 6.00 และ 4.00

การทดลองในส่วนนี้เริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 โดยมีขั้นตอนเหมือนข้อ 2.13.1 แต่วัดด้านไกลตัวผู้วัดของรากเพียงด้านเดียว เนื่องจากในการทดลองนี้ต้องใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง หากวัดทั้งสองด้านจะใช้เวลานานกว่านี้ซึ่งส่งผลให้รากที่ตรึงไว้โค้งงอและวัดกระแสไฟฟ้าไม่ได้ หลังจากวัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ pH 6.00 แล้วเปลี่ยนสารละลายโดยดูดสารละลาย APW pH 6.00 ออกจากจานเพาะเชื้อล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้งก่อนที่จะล้างด้วยสารละลาย APW pH 4.00 อีก 2 ครั้ง แล้วจึงเติมสารละลาย APW pH 4.00 15 มิลลิลิตร โดยระวังไม่ให้โพรบและรากได้รับการกระทบกระเทือน หลังจากนั้นจึงให้รากปรับสภาพในสารละลายใหม่ 30 นาที ปรับเทียบอิเล็กโทรดแล้วจึงเริ่มวัดกระแสไฟฟ้าไอออน หลังจากวัดกระแสไฟฟ้าที่ pH 4.00 แล้วเปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลาย APW pH 6.00 และวัดกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง โดยดำเนินการตามขั้นตอนเหมือนกับเปลี่ยนจาก pH 6.00 เป็น pH 4.00 นำผลการทดลองที่ได้มาแปลผล (ดู 2.12) และทดสอบค่าทางสถิติ (ดู 2.16)

เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนที่สภาวะ pH 6.00 ทั้ง 2 ครั้ง กับที่สภาวะ pH 4.00

2.13.2.2 pH 6.00 และ 8.00

ดำเนินการตามขั้นตอนเหมือนในข้อ 2.13.2.1 คือวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 6.00 ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสารละลาย APW pH 8.00 หลังจากนั้นเปลี่ยนสารละลายกลับมาเป็น pH 6.00

2.13.2.3 pH 4.00 ,6.00 และ 8.00

ดำเนินการตามขั้นตอนเหมือนในข้อ 2.13.2.1 คือวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 4.00 ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสารละลาย APW pH 6.00 หลังจากนั้นเปลี่ยนสารละลายเป็น pH 8.00

2.14 ผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

กระแสไฟฟ้าไอออนเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ ในการศึกษาว่าไอออนชนิดใดเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้านี้ใช้วิธีเปลี่ยนชนิดของไอออนและดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

2.14.1 ผลของแคลเซียมไอออน

การทดลองเริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW ปกติ (เหมือน 2.13.1) โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวผู้วัดเท่านั้น หลังจากนั้นเปลี่ยนสารละลายโดยดูดเอาสารละลาย APW ปกติออกจากจานเพาะเชื้อแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง หลังจากนั้นล้างด้วยสารละลาย APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออนอีก 2 ครั้ง แล้วจึงเติมสารละลาย APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออนนี้ลงในจานเพาะเชื้อ 15 มิลลิลิตร ทิ้งให้รากทานตะวันปรับสภาพในสารละลายใหม่ 30 นาที ปรับเทียบอิเล็กโทรดแล้วจึงวัดกระแสไฟฟ้าไอออน จากนั้นเปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลาย APW ปกติอีกครั้งโดยดำเนินการเปลี่ยนตามที่กล่าวข้างต้น เติมสารละลาย APW ปกติ 15 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ 30 นาที และปรับเทียบอิเล็กโทรดแล้วก่อนวัดกระแสไฟฟ้า นำผลการทดลองที่ได้จากสารละลาย APW ปกติทั้ง 2 ครั้ง และจาก APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออน มาแปลผลและทดสอบผลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน

2.14.2 ผลของโซเดียมไอออน

ขั้นตอนการดำเนินการเหมือนในข้อ 2.14.1 โดยใช้สารละลาย APW ที่ไม่มีโซเดียม

ไอออน

2.14.3 ผลของโพแทสเซียมไอออน

ขั้นตอนการดำเนินการเหมือนในข้อ 2.14.1 โดยใช้สารละลาย APW ที่ไม่มี

โพแทสเซียมไอออน

2.14.4 ผลของคลอไรด์ไอออน

ขั้นตอนการดำเนินการเหมือนในข้อ 2.14.1 โดยใช้สารละลาย APW ที่ไม่มีคลอไรด์

ไอออน

2.15 การหาอัตรายึดของรอกทานตะวัน

จากการดูรากผ่านกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ หาตำแหน่งบริเวณปลายรากที่มีลักษณะแตกต่างจากส่วนอื่นๆ เช่น มีสีแตกต่างจากส่วนอื่นหรือมีรอยบางอย่างเพื่อใช้เป็นจุดสังเกต บันทึกตำแหน่งดังกล่าวของราก โดยให้ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งเริ่มต้นพร้อมทั้งบันทึกเวลาเริ่มต้นนี้ด้วย หลังจากวัดกระแสไฟฟ้าไอออนแล้วจึงสังเกตว่าตำแหน่งดังกล่าวนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ใด ซึ่งถือเป็นตำแหน่งสุดท้ายของและบันทึกเวลาสุดท้าย คำนวณหาอัตราการยึดของรากโดย

$$\text{อัตรายึดของราก} = \frac{\text{ตำแหน่งสุดท้ายของจุดสังเกต-ตำแหน่งเริ่มต้นของจุดสังเกต} (\mu\text{m})}{\text{เวลาสุดท้าย-เวลาเริ่มต้น} (\text{min})}$$

2.16 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันที่สภาวะต่างๆ พบว่าในสภาวะการทดลองเดียวกันผลการทดลองจากรากที่ต่างกันก็อาจจะให้ผลต่างกันดังนั้นจึงต้องทำการทดลองซ้ำหลายๆ รากเพื่อดูแนวโน้มของผลการทดลอง และในการสรุปผลใช้วิธีทางสถิติ

2.16.1 ทิศของกระแสไฟฟ้า

เพื่อเปรียบเทียบทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันในหลายๆ รากว่ามีทิศเข้าหรือออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ใช้ "การทดสอบสัดส่วนของประชากรกลุ่มเดียว" (testing proportion of one population) (อภิญา, 2533)

โดยให้ H_0 เป็นสมมติฐานนิเสธ และ H เป็นสมมติฐานอื่น โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : สัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่รากและออกจากรากไม่แตกต่างกัน นั่นคือสัดส่วนของประชากร $\pi = 0.5$

ในกรณีที่คาดว่าทิศของกระแสไฟฟ้าน่าจะเข้าสู่รากมากกว่าออกจากราก จะให้

H : สัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่รากมากกว่ามีทิศของกระแสไฟฟ้าออกจากราก นั่นคือ $\pi > 0.5$

ส่วนในกรณีที่คาดว่าทิศของกระแสไฟฟ้าน่าจะออกจากรากมากกว่าเข้าสู่ราก ให้

H : สัดส่วนของกระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกจากรากมากกว่ามีทิศของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ราก นั่นคือ $\pi > 0.5$

ตัวทดสอบสถิติคือ

$$Z = \frac{\hat{p} - \pi}{\sqrt{\frac{\pi(1-\pi)}{n}}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ \hat{p} เป็นสัดส่วนของตัวอย่าง โดยที่ $\hat{p} = X/n$

โดย X คือจำนวนรากที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากหรือออกจากราก ตามที่ตั้งไว้ในสมมติฐาน H

และ π เป็นสัดส่วนของประชากร = 0.5 ตาม H_0

หาก Z มากกว่าค่าวิกฤต (ตาราง 3) จะปฏิเสธ H_0

ตัวอย่างกรณีที่ 1: กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากมากกว่ามีทิศออกจากราก

ให้ H_0 มีค่า $\pi = 0.5$ และ H มีค่า $\pi > 0.5$ จากการทดลอง 39 รากที่ตำแหน่ง 0.5 มิลลิเมตรจากปลายราก พบกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากจำนวน 38 ราก และกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากจำนวน 1 ราก ดังนั้น $n=39$, $x =$ จำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ราก = 38

$$\text{จะได้ } \hat{p} = 38/39 = 0.97$$

และใช้ตัวทดสอบสถิติตามสมการ (3)

$$Z = \frac{0.97 - 0.5}{\sqrt{\frac{0.5(1-0.5)}{39}}} = 5.92$$

ค่า Z ที่คำนวณได้คือ 5.92 มากกว่าค่าวิกฤติแบบหางเดียวทั้งที่ระดับความมีนัยสำคัญ

$\alpha = 0.05$ ($Z=1.65$), 0.01 ($Z=2.33$) และ 0.001 ($Z=3.09$) (ตาราง 3)

เราจึงปฏิเสธ H_0 ที่ $\alpha = 0.001$

นั่นคือ กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากมากกว่าออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญด้วยระดับความเชื่อมั่น

99.9 % ($P < 0.001$)

ตัวอย่างกรณีที่ 2 : กระแสไฟฟ้าออกจากรากมากกว่าเข้าสู่ราก

ให้ H_0 มีค่า $\pi = 0.5$ และ H มีค่า $\pi > 0.5$ จากการทดลอง 36 รากที่ตำแหน่ง 10.0 มิลลิเมตรจากปลายราก พบกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากจำนวน 23 ราก และกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากจำนวน 13 ราก ดังนั้น $n = 36$, $x =$ จำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าออกจากราก = 23

$$\text{จะได้ } \hat{p} = 23/36 = 0.64 \text{ และได้ค่า } Z \text{ จากสมการ (3) } = 1.68$$

ค่า Z ที่คำนวณได้คือ 1.68 มากกว่าค่าวิกฤติแบบหางเดียวเฉพาะที่ $\alpha = 0.05$ ($Z = 1.65$) แต่น้อยกว่าที่ $\alpha = 0.01$ ($Z = 2.33$) (ตาราง 3) ดังนั้นเราจึงปฏิเสธ H_0 ที่ $\alpha = 0.05$

นั่นคือ กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากมากกว่าเข้าสู่รากอย่างมีนัยสำคัญด้วยระดับความเชื่อมั่น

95 % ($P < 0.05$)

ตัวอย่างกรณีที่ 3 : ไม่สามารถระบุได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศใดมากกว่ากัน

ให้ H_0 มีค่า $\pi = 0.5$ และ H มีค่า $\pi > 0.5$ จากการทดลอง 39 รากที่ตำแหน่ง 3.5 มิลลิเมตรจากปลายราก พบกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากจำนวน 22 ราก และกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ราก 17 ราก ดังนั้น $n = 39$, $x =$ จำนวนรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าออกจากราก = 22

จะได้ $\hat{p} = 22/39 = 0.56$ และได้ค่า Z จากสมการ (3) = 0.80 ซึ่งน้อยกว่า Z ที่ $\alpha = 0.05$ (1.65) (ตาราง 3)

ดังนั้นเราจึงยอมรับ H_0 นั่นคือไม่สามารถกล่าวอย่างมีนัยสำคัญได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากมากกว่าเข้าสู่ราก ($P > 0.05$)

ตาราง 3 ค่าวิกฤติเมื่อกำหนดค่าระดับความมีนัยสำคัญ (α) ต่างๆ กัน (อภิญา, 2533)

	α	ค่าวิกฤติ
การทดสอบแบบสองหาง	0.05	$Z_{0.025} = \pm 1.96$
	0.01	$Z_{0.005} = \pm 2.58$
	0.001	$Z_{0.0005} = \pm 3.29$
การทดสอบแบบหางเดียว	0.05	$Z_{0.05} = 1.65$
	0.01	$Z_{0.01} = 2.33$
	0.001	$Z_{0.001} = 3.09$

2.16.2 ผลของสภาวะแวดล้อม

สำหรับการเปรียบเทียบว่าผลการทดลองในรากเดียวกันที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากตัวอย่าง 2 กลุ่มที่สัมพันธ์กัน ไม่สามารถแยกให้เป็นอิสระต่อกันได้ จึงทดสอบผลการทดลองด้วยวิธี "การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม กรณีข้อมูลแบบจับคู่" (paired t test) (อภิญา, 2533) ปริมาณสถิติที่ทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d / \sqrt{n}}, df = n - 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่

\bar{d} คือค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของตัวอย่าง

μ_d คือค่าเฉลี่ยจริงของความแตกต่างของตัวอย่างตามที่ตั้งไว้ตามสมมติฐาน

นั่นคือ $\mu_d = 0$ ไม่มีความแตกต่าง หรือ $\mu_d > 0$ หรือ $\mu_d < 0$ เมื่อมีความแตกต่าง

S_d คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

n คือจำนวนของตัวอย่าง

df คือ degree of freedom = $n-1$

ตัวอย่างเช่น ต้องการทดสอบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ pH 4.00 ที่วัดจาก 16 ตำแหน่ง (n) ของรากเดียวกันจะแตกต่างกันหรือไม่ ขั้นแรก หาผลต่างของกระแสไฟฟ้า (d) ระหว่าง pH 6.00 (X_1) และ pH 4.00 (X_2) ที่ตำแหน่งต่างๆ $j (=1, 2, \dots, n)$ (ดูตาราง 4) โดย

$$d_j = X_{1j} - X_{2j}$$

หลังจากนั้นหาค่าเฉลี่ยของผลต่าง

$$\bar{d} = \frac{\sum d_j}{n} = \frac{-139.42}{16} = -8.71$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2188.78}{16-1}} = 12.08$$

ในการทดสอบให้ H_0 เป็นสมมติฐานอิสระ และ H เป็นสมมติฐานอื่น โดย

H_0 : กระแสไฟฟ้าที่สภาวะ pH 6.0 กับที่ pH 4.0 ไม่แตกต่างกัน นั่นคือ $\mu_d = 0$

H : กระแสไฟฟ้าที่สภาวะ pH 6.0 น้อยกว่าที่ pH 4.0 นั่นคือ $\mu_d < 0$

ดังนั้น ตาม H_0

$$t = \frac{\bar{d} - 0}{S_d / \sqrt{n}}$$

$$= \frac{-8.71 - 0}{12.08 \sqrt{16}}$$

$$= -2.89$$

นำค่าของ t ไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ (ตาราง 5) หากขนาดของค่าที่คำนวณได้ (ไม่คิดเครื่องหมาย) มากกว่าค่าวิกฤติจะปฏิเสธ H_0
การทดสอบในกรณีนี้เป็นแบบหางเดียว

$$df = 16-1 = 15 \text{ ที่ } \alpha = 0.05 \quad t_{0.05} = 1.753 \text{ และที่ } \alpha = 0.01 \quad t_{0.01} = 2.602$$

ค่าที่คำนวณได้ $t = 2.89$ มากกว่าทั้ง $t_{0.05} (1.753)$ และ $t_{0.01} (2.602)$ (ตาราง 5)

ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 ที่ระดับความเชื่อมั่นทั้ง 95 % และ 99 %

นั่นคือที่ $\text{pH} = 6.00$ และที่ $\text{pH} 4.00$ มีความแตกต่างของขนาดของกระแสไฟฟ้าด้วยระดับความเชื่อมั่น 99 % ($P < 0.01$) โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ $\text{pH} 6.00$ น้อยกว่าที่ $\text{pH} 4.00$

ตาราง 4 ตัวอย่างของกระแสไฟฟ้าที่ $\text{pH} 6.00$ และที่ $\text{pH} 4.00$ โดย X_{1j} คือกระแสไฟฟ้าที่ $\text{pH} 6.00$ X_{2j} คือกระแสไฟฟ้าที่ $\text{pH} 4.00$ และ d_j คือค่าความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าระหว่าง pH ทั้งสอง \bar{d} คือค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าและ S_d คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตำแหน่งที่	pH6.00	pH4.00	ค่าความแตกต่าง (d)	$d_j - \bar{d}$	$(d_j - \bar{d})^2$
	X_{1j}	X_{2j}	$d_j = X_{2j} - X_{1j}$		
1	0.67	1.34	0.67	-1.43	2.06
2	2.40	-0.97	-3.36	-5.47	29.92
3	-0.74	-5.25	-4.51	-6.62	43.84
4	-5.45	-15.91	-10.46	-12.57	157.92
5	3.85	-12.51	-16.36	-18.47	340.97
6	4.35	-8.07	-12.42	-14.53	211.11
7	5.87	-7.55	-13.42	-15.53	241.15
8	5.94	-6.25	-12.19	-14.30	204.37
9	4.10	-5.74	-9.84	-11.94	142.64
10	4.82	-6.79	-11.61	-13.72	188.21
11	5.82	-5.99	-11.81	-13.92	193.74
12	6.12	-5.53	-11.65	-13.76	189.26
13	3.49	-4.06	-7.55	-9.66	93.24
14	2.21	-2.92	-5.14	-7.24	52.48
15	2.15	-2.92	-5.07	-7.18	51.55
16	2.41	-2.29	-4.70	-6.81	46.32
รวม			-139.42		2188.78

หมายเหตุ

- กระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ราก + กระแสไฟฟ้าที่มีทิศออกจากราก

ตาราง 5 ค่าวิกฤติของการแจกแจงแบบที (t) เมื่อ $df = n-1$ และ α คือค่าระดับความเชื่อมั่น

df	α				
	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.92	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.25
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.35	1.771	2.16	2.65	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.12	2.583	2.921
17	1.333	1.74	2.11	2.567	2.898
18	1.33	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	1.323	1.721	2.08	2.518	2.831
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	1.319	1.714	2.069	2.5	2.807
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	1.316	1.708	2.06	2.485	2.787
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
Inf.	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 อาณาเขตต่างๆ ของราก

ในรากทานตะวันที่ยาวประมาณ 10 มิลลิเมตร เมื่อสังเกตลักษณะภายนอกประกอบด้วยภาพตัดตามยาวของรากทานตะวัน พบว่าบริเวณหมวกราก (root cap) ซึ่งเป็นบริเวณที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดของรากจะอยู่ในช่วง 0.00-0.30 มิลลิเมตรจากปลายราก บริเวณถัดขึ้นมาเมื่อมองจากภายนอกจะมีสีขาวขุ่นส่วนภายในจะเป็นเซลล์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันเรียงตัวอยู่หนาแน่นกว่าบริเวณอื่นโดยจะเห็นที่ระยะ 0.30-2.20 มิลลิเมตรจากปลายราก ซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์แบ่งตัว (region of cell division) หรือเขตเนื้อเยื่อเจริญ ต่อจากบริเวณนี้ขึ้นไปจนถึงประมาณ 7.50 มิลลิเมตรจากปลายรากเป็นอาณาเขตเซลล์ยืดตัว (region of cell elongation) บริเวณนี้เมื่อมองจากภายนอกจะเป็นสีจางและเมื่อพิจารณาภาพตัดตามยาวจะเห็นเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเซลล์ในเขตเนื้อเยื่อเจริญอย่างชัดเจน และที่ระยะตั้งแต่ 7.50 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนรากเป็นอาณาเขตขนราก (region of root hair) ในกรณีที่รากยาวกว่านี้ (15 มิลลิเมตร) ส่วนที่แตกต่างไปคืออาณาเขตเซลล์ยืดตัว ซึ่งจะมีอาณาเขตไปจนถึงประมาณ 8.00 มิลลิเมตรจากปลายราก

3.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ

3.2.1 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ รากทานตะวันที่ตัดหมวกราก

วัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร ในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ pH 6.00 ± 0.05 จำนวน 39 ราก ที่ตำแหน่งต่างๆของรากทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวของผู้วัด โดยตัดหมวกรากเพื่อลดปัญหาการโค้งงอของปลายรากเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน 4 รูปแบบ โดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงในแต่ละรูปแบบเป็นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกรากที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้านั้นๆ

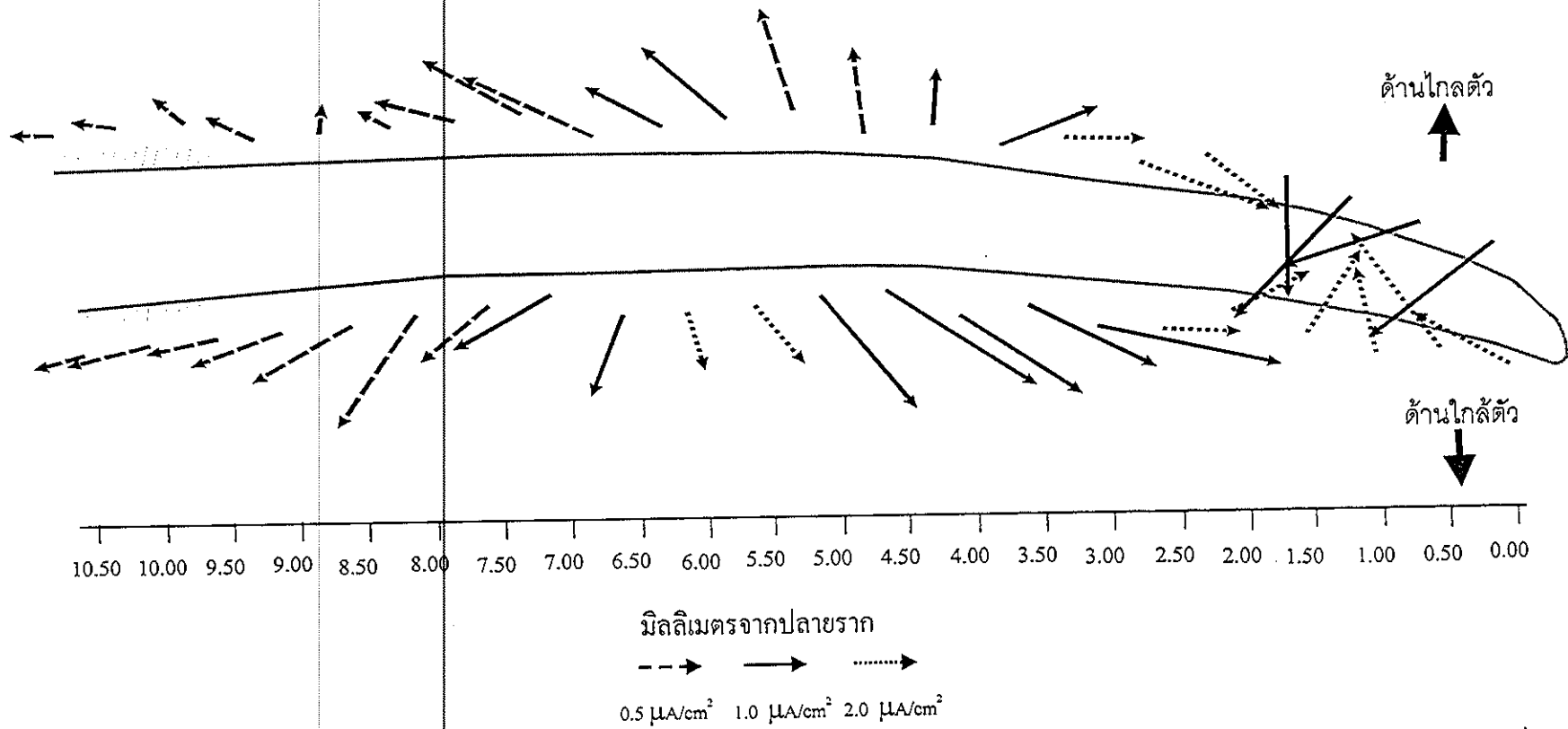
รูปแบบที่ 1 (ภาพประกอบ 27) กระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รากในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ ช่วง 0.00-2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 1.68 - 2.99 ไมโครแอมแปร์ต่อตาราง

เซนติเมตร และที่ระยะเหนือ 2.00 มิลลิเมตรขึ้นไปจนถึงโคนราก ซึ่งเป็นอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและอาณาเขตขนราก กระแสไฟฟ้าไอออนออกจากรากด้วยขนาด 0.37 - 1.57 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีลักษณะเช่นนี้ทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวผู้วัด รูปแบบนี้พบจำนวน 5 ราก จากทั้งหมด 39 ราก

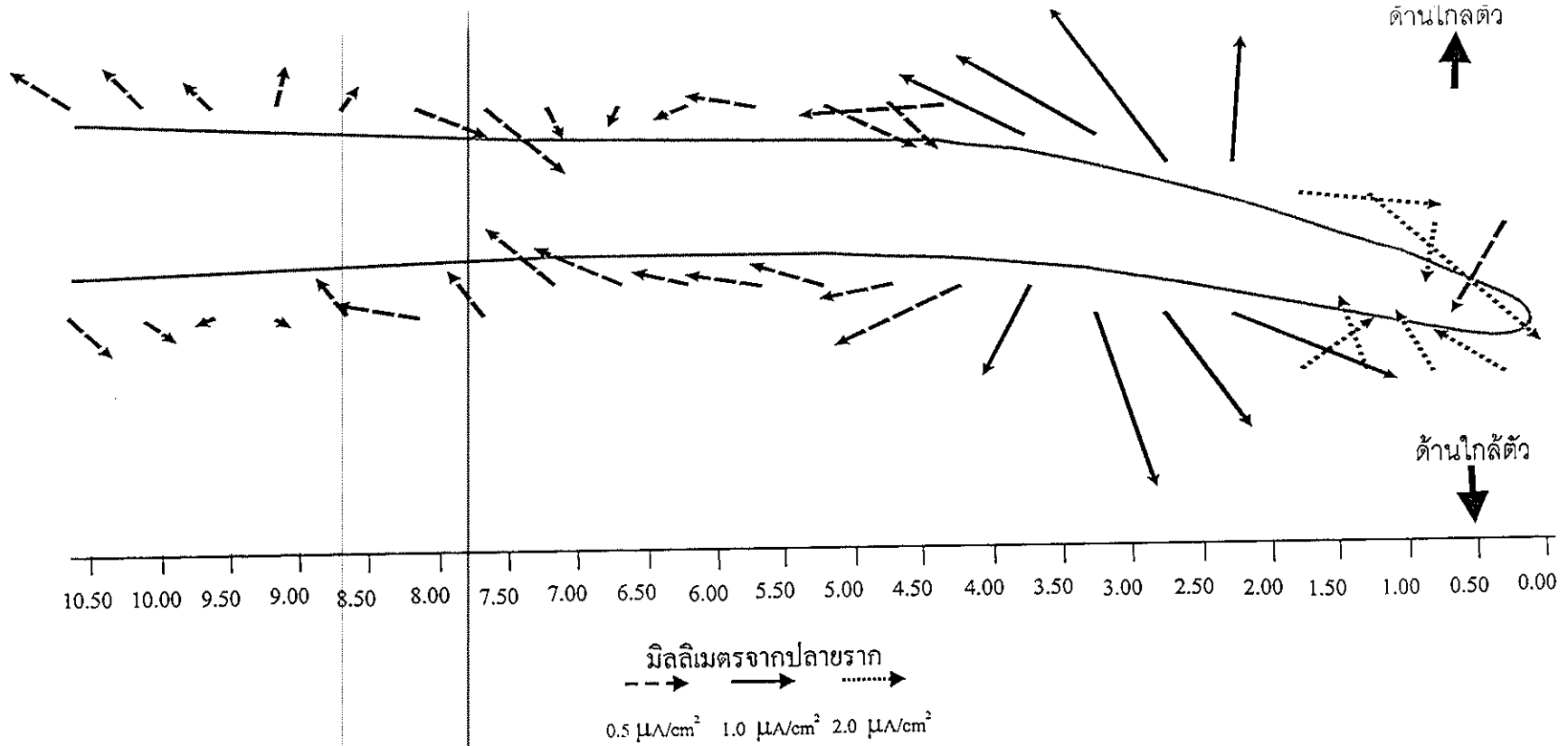
รูปแบบที่ 2 รูปแบบนี้พบมากที่สุดคือพบใน 17 ราก จาก 39 ราก (ภาพประกอบ 28) กระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รากบริเวณเนื้อเยื่อเจริญในช่วง 0.00-2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 1.34 - 5.14 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ช่วงถัดไปที่ 2.50-3.50 มิลลิเมตรจากปลายรากในส่วนต้นของอาณาเขตเซลล์ยึดตัวกระแสไฟฟ้าออกจากรากด้วยขนาด 1.72 - 2.22 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ต่อจากนั้นกระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากและออกจากรากอีกครั้งทั้ง 2 ด้านของราก โดยพบว่าส่วนใหญ่กระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากในส่วนปลายของอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและส่วนต้นของอาณาเขตขนรากในช่วง 4.00-7.00 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 0.66-1.99 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะตั้งแต่ 7.50 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนรากกระแสไฟฟ้าไอออนจะออกจากรากด้วยขนาด 0.36-0.59 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

รูปแบบที่ 3 (ภาพประกอบ 29) รูปแบบนี้ด้านหนึ่งของรากมีกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก เหมือนแบบที่ 1 ส่วนอีกด้านหนึ่งมีกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก-เข้า-ออก เหมือนรูปแบบที่ 2 โดยกระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากในช่วง 0.00-2.00 มิลลิเมตร จากปลายรากด้วยขนาด 0.98 - 4.07 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ช่วงถัดมาคือ 2.50-5.00 มิลลิเมตรจากปลายรากกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากรากด้วยขนาด 0.29 - 2.39 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่ถัดขึ้นไปด้านหนึ่งจะมีกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าและออกจากรากสลับกัน เพียงด้านเดียวของรากที่ตำแหน่งตั้งแต่ 5.50 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนราก ส่วนอีกด้านหนึ่งของรากกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากราก พบลักษณะเช่นนี้จำนวน 16 รากจากทั้งหมด 39 ราก

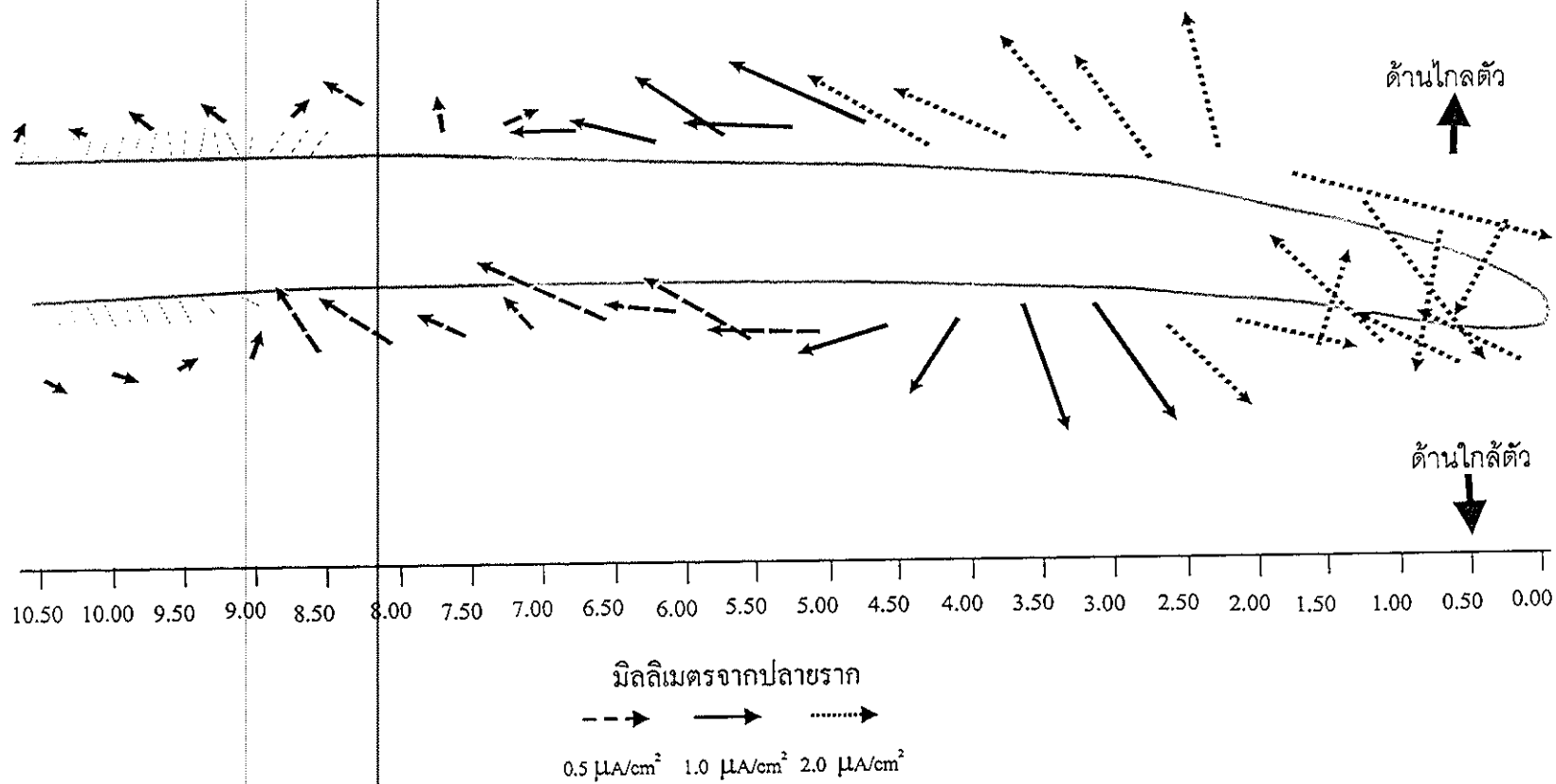
รูปแบบที่ 4 (ภาพประกอบ 30) รูปแบบนี้แตกต่างจากที่กล่าวมาทั้งหมด โดยพบเพียง 1 ราก ในกรณีนี้กระแสไฟฟ้าไอออนจะออกจากรากในอาณาเขตเนื้อเยื่อเจริญและอาณาเขตเซลล์ยึดตัวในช่วง 0.00-5.50 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 0.15 - 4.69 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและที่ตำแหน่งตั้งแต่ส่วนปลายของอาณาเขตเซลล์ยึดตัวที่ 6.00 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนรากกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากด้วยขนาด 0.15 - 2.51 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



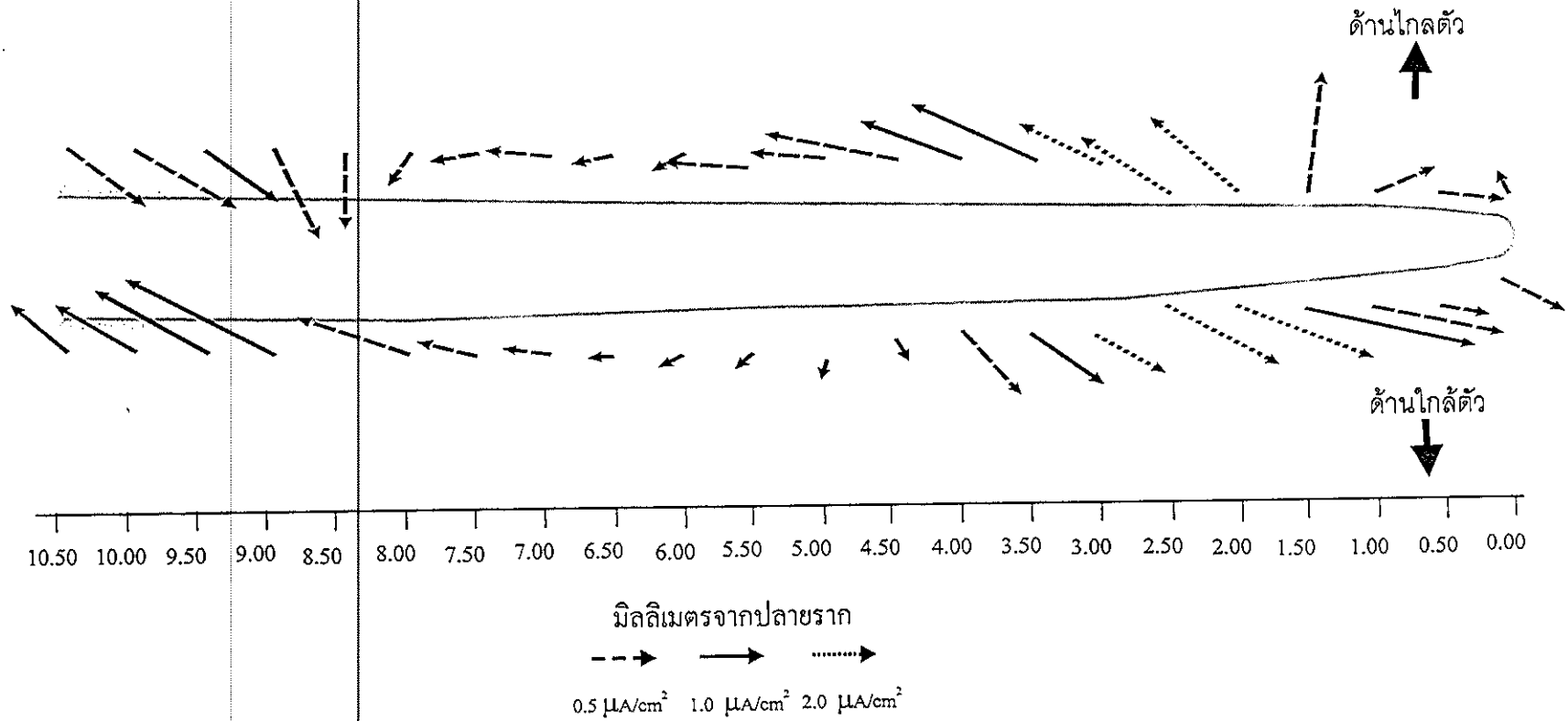
ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันที่ตัดหมดรอก (5 รากจาก 39 ราก) กระแสไฟฟ้าเข้าเฉพาะที่ปลายราก ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรอกทานตะวันที่ตัดหมวกรอก(17 รอกจาก 39 รอก) กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รอกและออกจาก รอกสลับกันไปทั้งสองด้านลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 29 ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมดราก (16 รากจาก 39 ราก) กระแสไฟฟ้าเข้าที่ปลายรากและมีด้านหนึ่งที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากอีกในบริเวณถัดขึ้นไป ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 30 ตัวอย่างรูปแบบที่ 4 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ตัดหมดราก (1 รากจาก 39 ราก) กระแสไฟฟ้าออกจากปลายราก
 ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน

3.2.2 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันที่ไม่ตัดหมวกราก

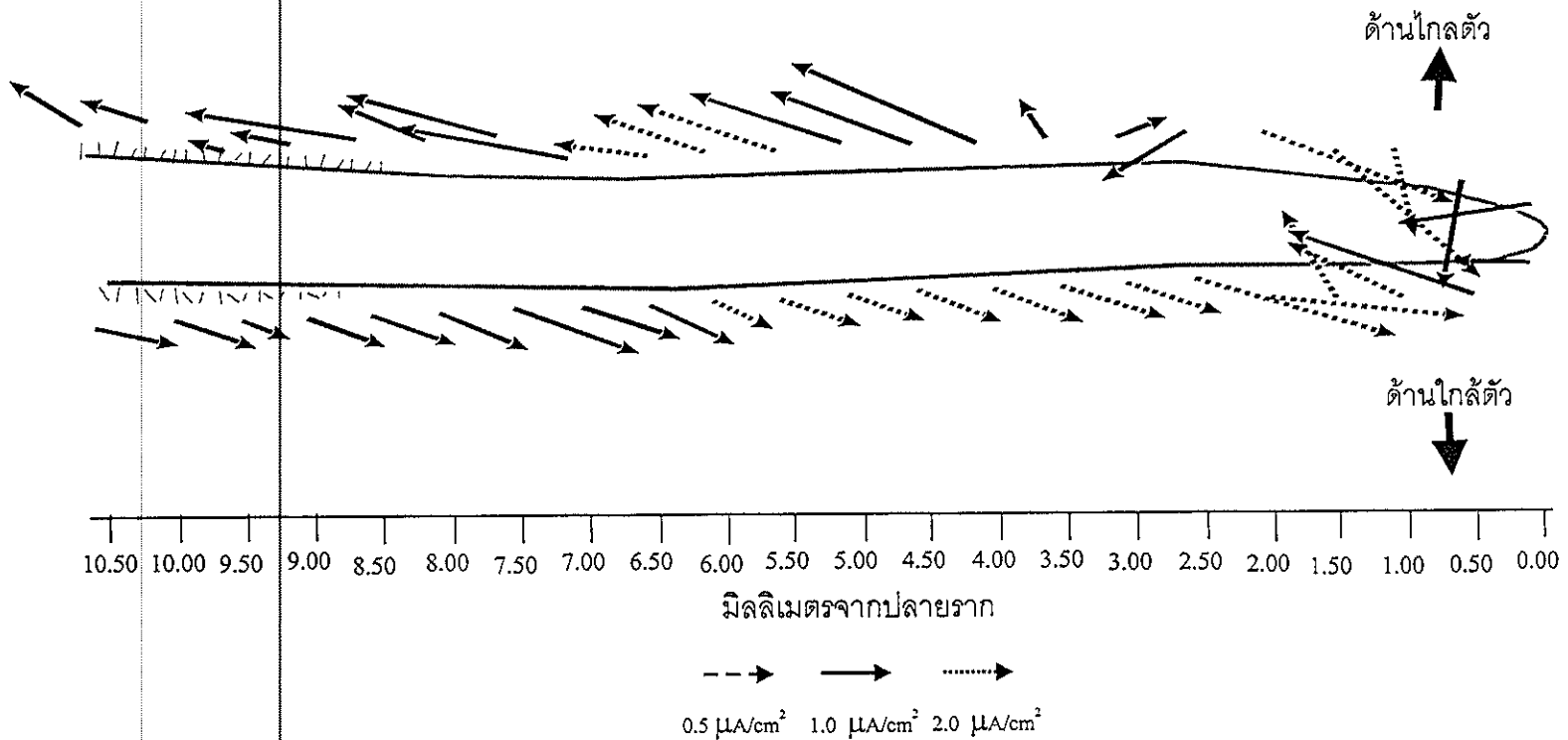
ในขณะที่วัดกระแสไฟฟ้าไอออนรากถูกวางในแนวระดับ เมื่อเวลาผ่านไปปลายรากจะงอลงเนื่องจากการตอบสนองต่อแรงโน้มถ่วงของโลก จุดประสงค์ของการตัดหมวกรากเพื่อให้รากไม่งอลง (Juniper and Groves, 1966) อย่างไรก็ตามพบว่าถึงแม้จะตัดหมวกราก รากก็ยังงอลงแต่ช้ากว่าเมื่อไม่ตัดหมวกราก ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากเนื้อเยื่อของหมวกรากถูกตัดออกไม่หมดจากการสังเกตพบว่าการงอของรากที่ยาวจะเร็วกว่าและมากกว่ารากที่สั้น ดังนั้นจึงได้ลองใช้รากที่สั้นลงแต่ยังมีส่วนต่างๆของรากครบถ้วน นั่นคือมีหมวกราก บริเวณที่เซลล์มีการแบ่งตัว บริเวณที่มีการยึดตัว และบริเวณขนราก จากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สั้นลงที่ไม่ตัดหมวกรากซึ่งยาว 1.00-1.50 เซนติเมตร พบว่าภายในช่วงเวลาที่ทดลอง (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ปัญหาการโค้งงอของรากจะน้อยมากและใกล้เคียงกับในรากที่มีความยาว 1.50-2.00 เซนติเมตรที่มีการตัดหมวกรากแล้ว ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้รากที่มีความยาว 1.00-1.50 เซนติเมตรโดยไม่ตัดหมวกรากแทน ซึ่งจะได้รากที่ใกล้เคียงสภาวะปกติมากที่สุด และได้วัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบ ๆ รากทานตะวันที่อยู่ในสารละลาย APW pH 6.00 ± 0.05 จำนวน 30 ราก โดยวัดที่ตำแหน่งต่างๆของรากทั้งด้านใกล้ตัวและไกลตัวของผู้วัด พบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน 4 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 ถึง 3 เหมือนกับในรากที่ตัดหมวกราก โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปแบบที่ 1 รูปแบบนี้พบมากที่สุดคือพบใน 18 รากจากทั้งหมด 30 ราก (ภาพประกอบ 31) กระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากในบริเวณหมวกรากและบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ ช่วง 0.00 - 2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 1.21 - 6.21 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือของรากมีกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากรากด้วยขนาด 1.07 - 3.80 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรพบลักษณะเช่นนี้ทั้ง 2 ด้านของราก

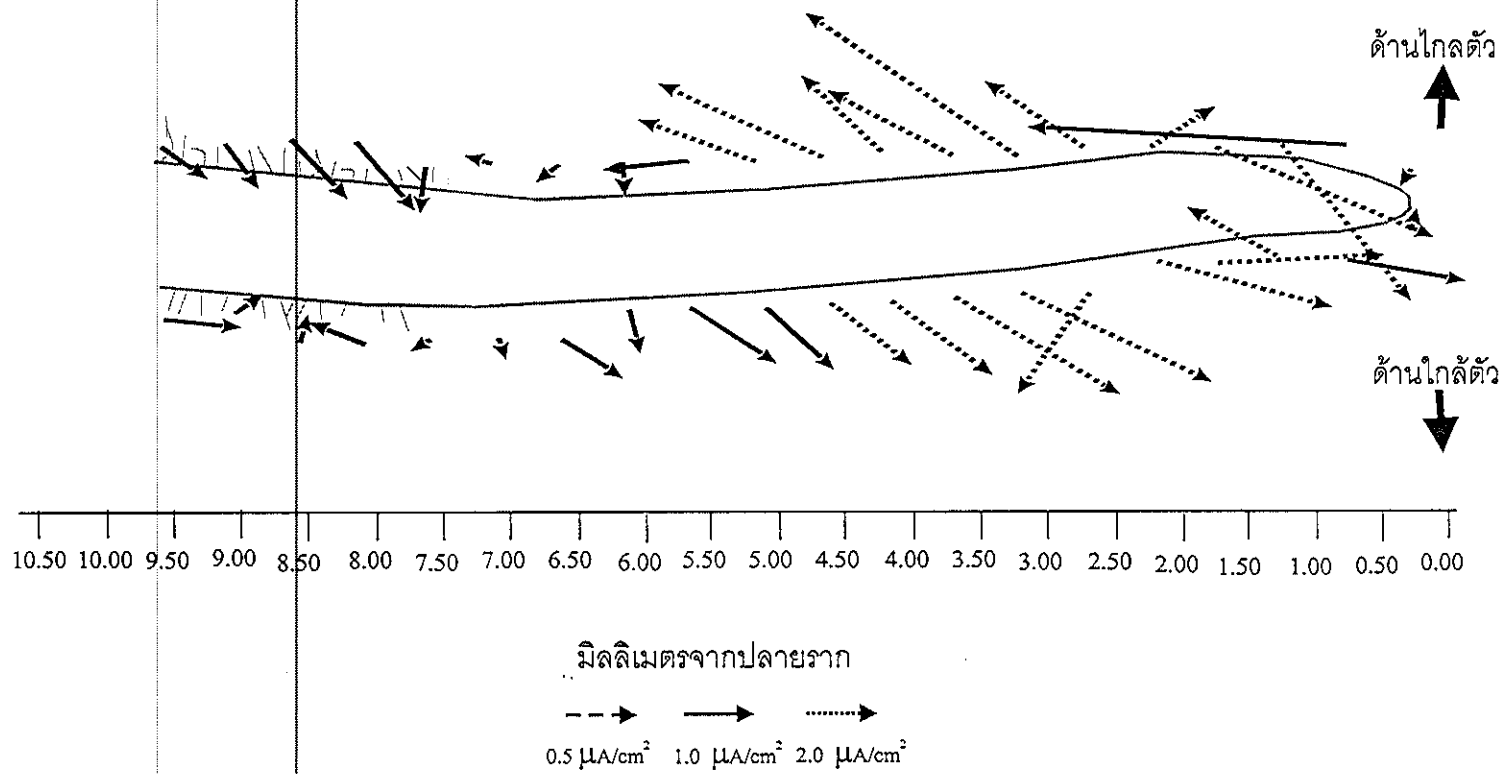
รูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบ 32) กระแสไฟฟ้าไอออนทั้งสองด้านของรากจะเข้าสู่ปลายรากในช่วง 0.00 - 2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากในบริเวณหมวกรากและบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ ด้วยขนาด 1.42 - 8.83 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะถัดมาในอาณาเขตเซลล์ยึดตัว กระแสไฟฟ้าจะออกจากรากในช่วง 2.50-5.50 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 2.45 - 4.70 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและที่เหนือขึ้นไปในบริเวณรอยต่อระหว่างอาณาเขตเซลล์ยึดตัวและขนรากกระแสไฟฟ้าจะเข้าสู่รากอีกครั้งที่ระยะตั้งแต่ 6.50 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนรากกระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากด้วยขนาด 0.26 - 1.83 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยพบรูปแบบลักษณะนี้จำนวน 3 รากจากทั้งหมด 30 ราก

รูปแบบที่ 3 (ภาพประกอบ 33) รูปแบบนี้ด้านหนึ่งของรากมีกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก เหมือนแบบที่ 1 ส่วนอีกด้านหนึ่งมีกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก-เข้า-ออก เหมือนรูปแบบที่ 2 กระแสไฟฟ้า ไอออนจะเข้าสู่รากในช่วง 0.00 - 2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากบริเวณหมวกรากและเนื้อเยื่อเจริญ ด้วยขนาด 0.98 - 8.80 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ช่วงถัดมาในอาณาเขตเซลล์ยึดตัวคือ 2.50-4.50 มิลลิเมตรจากปลายรากกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากรากด้วยขนาด 2.40-3.61 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่ถัดขึ้นไปด้านหนึ่งจะมีกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าและออกจากราก สลับกันเพียงด้านเดียวของรากที่ตำแหน่งตั้งแต่ 5.00 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนราก ส่วนอีกด้านหนึ่งของรากกระแสไฟฟ้าไอออนจะออกจากราก พบรูปแบบลักษณะนี้จำนวน 7 ราก จากทั้งหมด 30 ราก

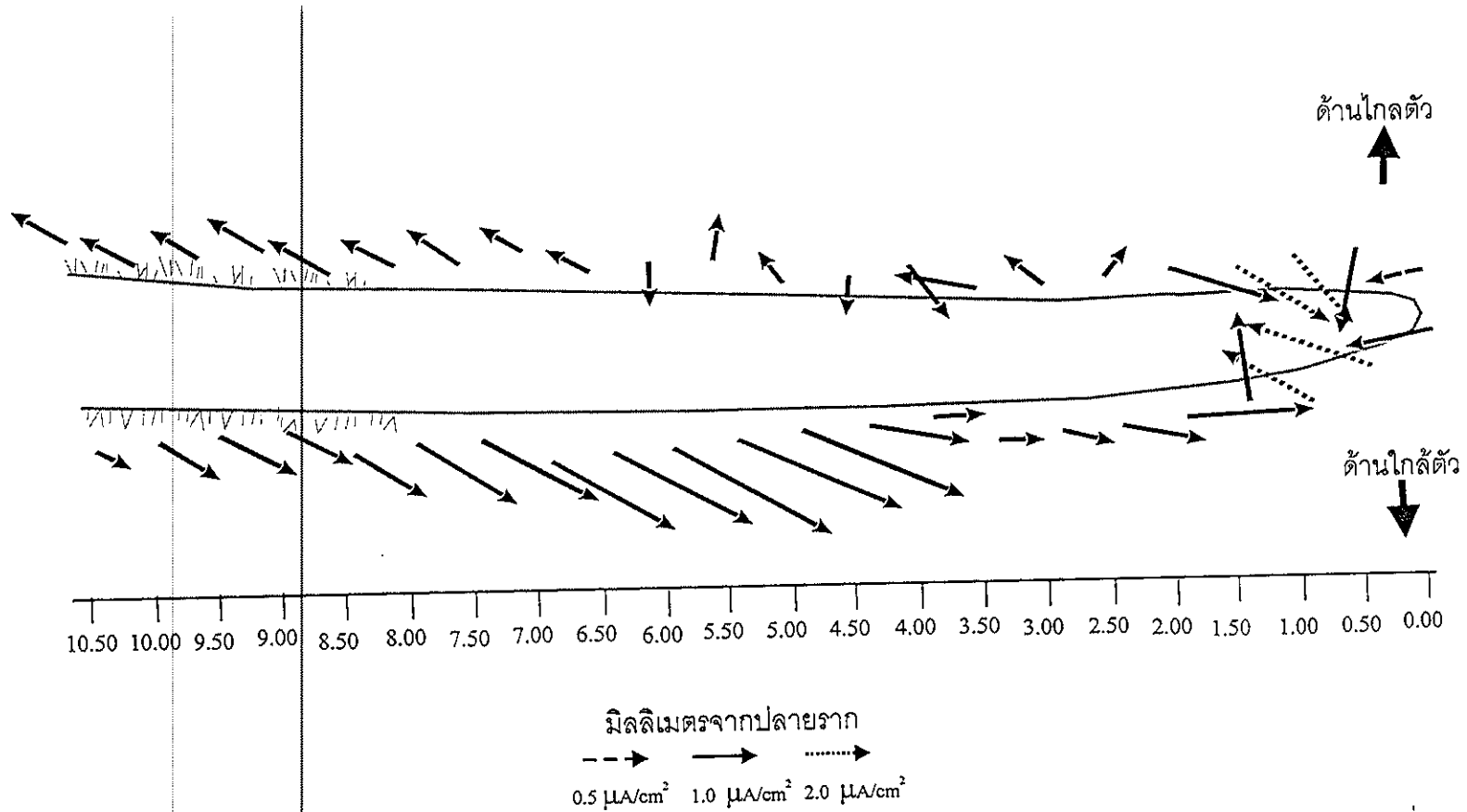
รูปแบบที่ 4 (ภาพประกอบ 34) รูปแบบนี้แตกต่างจากที่กล่าวมาทั้งหมดโดยกระแสไฟฟ้าไอออนออกจากรากในบริเวณหมวกรากและส่วนต้นของเนื้อเยื่อเจริญช่วง 0.00-1.00 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 0.58-1.81 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนปลายของเนื้อเยื่อเจริญและส่วนต้นของอาณาเขตเซลล์ยึดตัวช่วง 1.50-2.50 มิลลิเมตรจากปลายรากกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รากด้วยขนาด 0.23-2.57 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้า มีทิศออกจากรากที่ส่วนปลายอาณาเขตเซลล์ยึดตัวช่วง 2.50-5.50 มิลลิเมตรจากปลายรากด้วยขนาด 0.2-3.27 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและอาณาเขตขนรากที่ระยะตั้งแต่ 5.50 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนรากกระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากด้วยขนาด 0.16-1.68 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบรูปแบบลักษณะนี้จำนวน 2 รากจากทั้งหมด 30 ราก



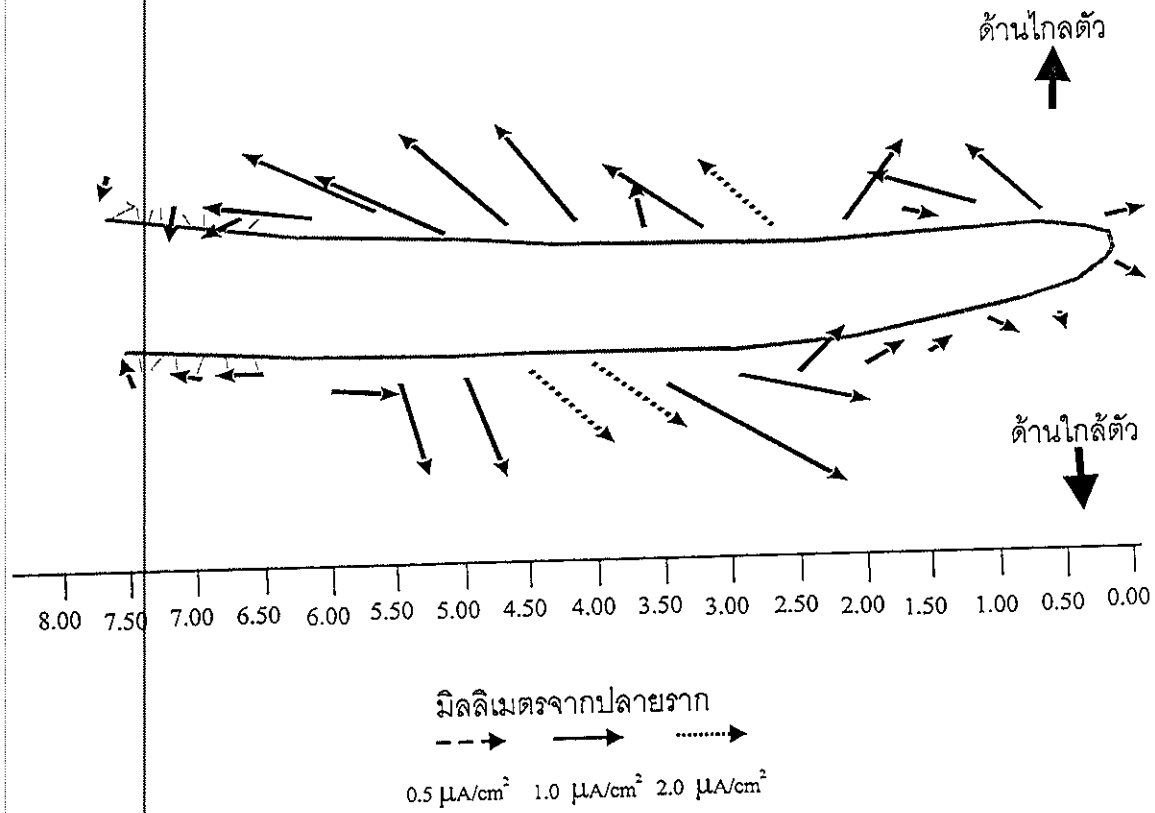
ภาพประกอบ 31 ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดหมวกราก (18 รากจาก 30 ราก) กระแสไฟฟ้าเข้าเฉพาะที่ปลายรากถูกครadleแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 32 แสดงตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ตัดหมดจากราก (3 รากจาก 30 ราก) กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากและออกจากรากสลับกันไปทั้งสองด้าน ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 33 ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวันที่ไม่ได้ตัดทอนราก (7 รากจาก 30 ราก) กระแสไฟฟ้าเข้าที่ปลายราก และมีด้านหนึ่งที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากอีกในบริเวณถัดขึ้นไป ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน



ภาพประกอบ 34 ตัวอย่างรูปแบบที่ 4 ของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ ร้าวทานตะวันที่ไม่ตัดหมดร้าว (2 ร้าวจาก 30 ร้าว) กระแสไฟฟ้าออกจากปลายร้าว
 ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน

3.2.3 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้า

จากผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในรากทานตะวันที่ตัดหมวกรากและไม่ตัดหมวกราก พบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆรากทานตะวัน 4 รูปแบบโดยมี 3 รูปแบบที่เหมือนกัน แต่สัดส่วนของรากในแต่ละรูปแบบไม่เท่ากัน โดยในรากที่ไม่ตัดหมวกราก (1.00-1.50 เซนติเมตร) พบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 1 มากที่สุด (18 รากจากทั้งหมด 30 ราก) ส่วนในรากที่ตัดหมวกราก (1.50-2.00 เซนติเมตร) พบรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 2 มากที่สุด (17 รากจากทั้งหมด 39 ราก) ดังแสดงในตาราง 6 โดยคาดว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนที่แตกต่างกันของรากทานตะวันน่าจะมีผลมาจากความยาวของราก

ตาราง 6 สัดส่วนการพบรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในรากทั้ง 2 ชนิด

รูปแบบ	จำนวนรากคิดเป็นร้อยละ	
	รากที่ตัดหมวกราก	รากที่ไม่ตัดหมวกราก
1	12.8 %	60.0 %
2	43.6 %	10.0 %
3	41.0 %	23.3 %
4	2.6 %	6.7 %

โดยในรากเกือบทั้งหมดกระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากในช่วง 0.00 - 2.00 มิลลิเมตรจากปลายราก (รูปแบบที่ 1, 2 และ 3) เหมือนกับที่พบในรากโคลเวอร์ *Trifolium repens* (Miller et al., 1986) รากถั่ว *Pisum sativum* L. (Hush and Overall, 1986) และรากข้าวโพด *Zea mays* (Miller, 1989) โดยในช่วง 0.00-2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากนี้เป็นบริเวณที่รากกำลังแบ่งเซลล์หรือเป็นบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่ากระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รากในบริเวณที่เซลล์กำลังแบ่งตัวหรือกำลังเจริญเติบโต สำหรับในช่วงถัดมาจนถึง 7.00 มิลลิเมตรจากปลายรากซึ่งเป็นบริเวณที่เซลล์มีการยึดตัว กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากซึ่งเหมือนกับที่พบในรากโคลเวอร์ (Miller et al., 1986) ซึ่งเป็นบริเวณที่รากจะมีการขยายตัวด้านยาวมากกว่าด้านข้าง

อย่างไรก็ตามจากทั้งหมด 69 ราก มีอยู่ 3 ราก ที่มีกระแสไฟฟ้าออกจากปลายราก (รูปแบบที่ 4) ข้อสังเกตของรากเหล่านี้คือถึงแม้อายุของรากจะเท่ากับรากอื่นๆ แต่มีความยาวน้อยกว่า นั่นคือ 1.1-1.3 เซนติเมตร ในขณะที่ในรากที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบอื่นมีความยาวของราก

ประมาณ 1.3-1.5 เซนติเมตร การที่รากสั้นกว่านี้เป็นไปได้ว่าอัตราการเจริญเติบโตของรากช้ากว่ารากอื่นๆ จึงมีรูปแบบของกระแสไฟฟ้าแตกต่างออกไป ลักษณะดังกล่าวเคยพบมาแล้วในเอ็มบริโอของแครอทซึ่งพบว่าเอ็มบริโอที่โตช้าและโตเร็วจะมีรูปแบบกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน (Rathore and Robinson, 1989)

ในการพิจารณาว่าที่ตำแหน่งใดๆ กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากหรือออกจากรากอย่างเป็นนัยสำคัญ นำผลการทดลองของรากที่ตัดหมวดรากทั้งหมด 39 ราก (ตาราง 7) มาทดสอบผลทางสถิติโดยใช้ "การทดสอบสัดส่วนของประชากรกลุ่มเดียว" ที่มี Z เป็นตัวสถิติทดสอบ (ดู 2.16.1) ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด แสดงในภาพประกอบ 35-36 ซึ่งสรุปได้ว่าทั้งสองด้านของปลายราก (0.00-1.00 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นบริเวณของเนื้อเยื่อเจริญ กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่รากอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.71 - 3.79 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือของรากซึ่งเป็นบริเวณที่เซลล์ยึดตัวและบริเวณขนรากส่วนใหญ่มีกระแสไฟฟ้าออกจากรากทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวของผู้วัดอย่างมีนัยสำคัญด้วยขนาดเฉลี่ย 0.33 - 2.46 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จุดที่น่าสังเกตคือบริเวณใกล้โคนรากที่ตำแหน่ง 8.5-9.0 มิลลิเมตรจากปลายราก ผลการทดสอบไม่สามารถระบุได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าหรือออกจากราก ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะในจำนวน 17 รากจาก 39 รากรูปแบบของกระแสไฟฟ้าเป็นรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะมีกระแสไฟฟ้าเข้าในส่วนนี้ ในขณะที่รูปแบบอื่นๆ จะมีกระแสไฟฟ้าออกจากราก เพื่อทดสอบแนวความคิดนี้จึงได้ทดสอบผลทางสถิติเฉพาะรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในตาราง 8 และภาพประกอบ 37-38 และพบว่าในช่วง 8.0-9.0 มิลลิเมตรจากปลายราก กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากอย่างมีนัยสำคัญตามที่คาดหมายไว้ ในภาพรวมของรูปแบบที่ 2 (ภาพประกอบ 37-38) กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ (0.00-1.00 มิลลิเมตรจากปลายราก) ด้วยขนาด 1.52-3.88 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และในบริเวณถัดมา ในอาณาเขตเซลล์ยึดตัว (2.00-6.50 มิลลิเมตรจากปลายราก) กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากรากด้วยขนาด 0.76-2.59 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากอีกครั้งที่บริเวณเริ่มเกิดขนรากด้วยขนาด 0.36-0.45 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับรากที่ไม่ตัดหมวดราก ผลการทดสอบทิศของกระแสไฟฟ้าไอออน (ตาราง 9 และภาพประกอบ 39-40) พบว่าที่บริเวณหมวดรากและบริเวณเนื้อเยื่อเจริญ (ตำแหน่ง 0.00 - 2.00 มิลลิเมตรจากปลายราก) กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศเข้าสู่ราก ด้วยขนาดเฉลี่ย 1.09 - 6.04 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่ามี 4 ตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ราก ซึ่งมากกว่าในรากที่ตัดหมวดราก ซึ่งมี 3 ตำแหน่ง ส่วนที่เพิ่มขึ้นก็คือตำแหน่งของหมวดรากซึ่งไม่ได้ตัดออก ส่วนใน


บริเวณที่เหลือของรากคือบริเวณเซลล์ยึดตัวและเริ่มมีขนราก (ตำแหน่ง 2.00 มิลลิเมตรจากปลายรากจนถึงโคนราก) กระแสไฟฟ้าไอออนมีทิศออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวของผู้วัด โดยมีขนาด 0.93 - 5.01 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

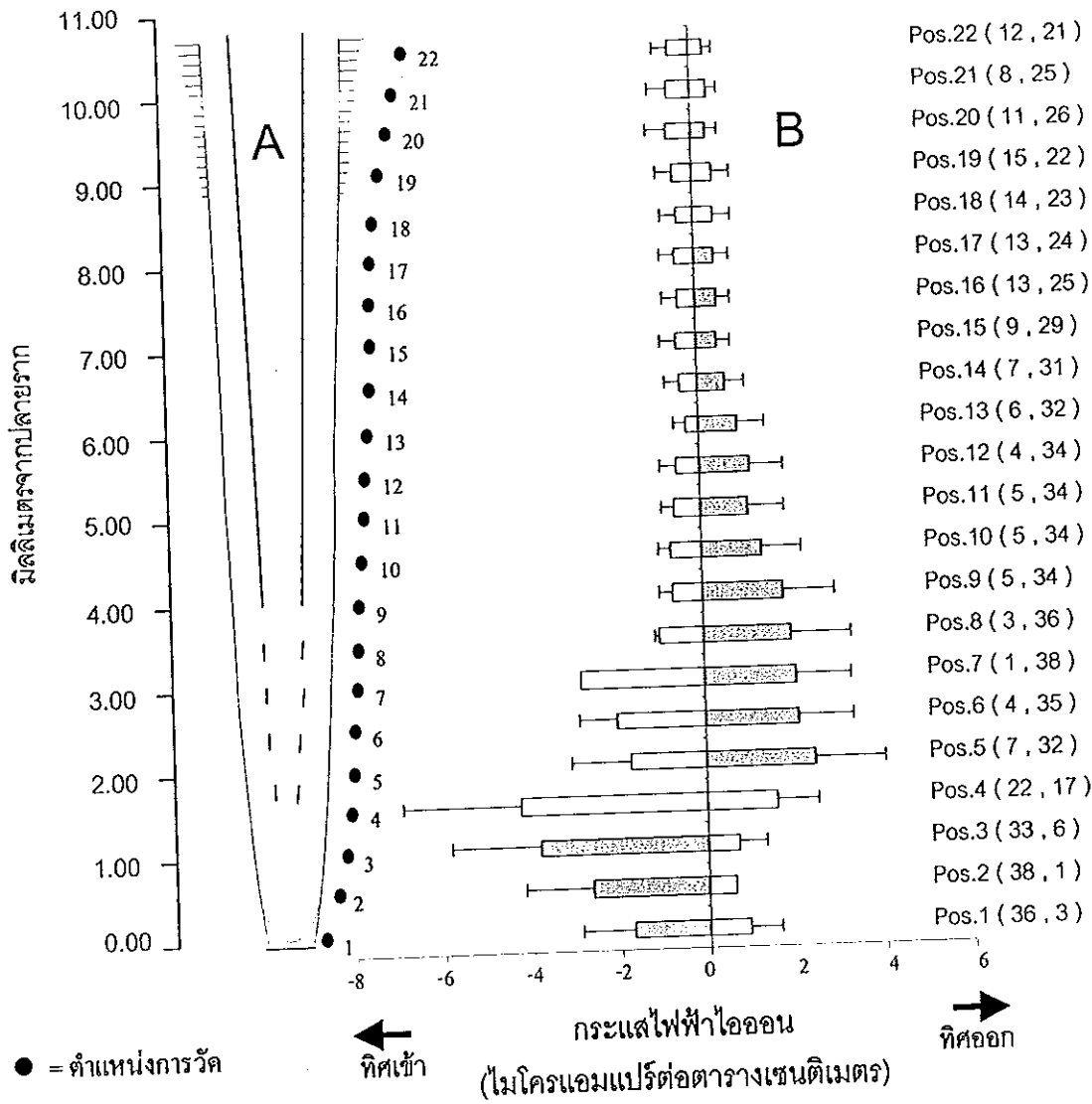
ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทวนตะวันที่ตัดทอนรากทั้งด้านใกล้ตัวและใกล้ตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

ตำแหน่งที่	ตำแหน่ง จาก ปลายราก mm.	กระแสไฟฟ้าไอออนหารากด้านใกล้ตัว ($\mu A/cm^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออนหารากด้านใกล้ตัว ($\mu A/cm^2$)			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.71 ^a	1.17	0.92	0.69	2.13 ^a	1.2	0.51	0.46
2	0.5	2.63 ^a	1.53	0.61	M	2.3 ^a	1.4	0.59	0.36
3	1	3.79 ^a	2	0.69	0.64	2.33 ^a	1.56	1.09	0.77
4	1.5	4.24	2.64	1.59	0.92	1.84	1.17	2.17	1.47
5	2	1.69	1.37	2.46 ^a	1.58	1.29	0.59	2.25 ^a	1.28
6	2.5	1.99	0.86	2.11 ^a	1.24	0.78	M	2.11 ^a	1.17
7	3	2.8	M	2.07 ^a	1.24	0	M	1.97 ^a	1.18
8	3.5	0.98	0.1	1.98 ^a	1.35	1.21	1.22	1.75 ^a	1.16
9	4	0.68	0.28	1.83 ^a	1.15	0.54	M	1.33 ^a	0.98
10	4.5	0.7	0.27	1.36 ^a	0.89	0.96	0.79	1.08 ^a	0.77
11	5	0.61	0.27	1.06 ^a	0.81	0.66	0.2	0.88 ^a	0.67
12	5.5	0.53	0.36	1.13 ^a	0.75	0.72	0.16	0.94 ^a	0.62
13	6	0.29	0.27	0.85 ^a	0.6	0.51	0.37	0.86 ^a	0.51
14	6.5	0.4	0.34	0.63 ^a	0.43	0.51	0.31	0.69 ^a	0.35
15	7	0.46	0.35	0.47 ^a	0.28	0.51	0.31	0.46 ^a	0.37
16	7.5	0.4	0.33	0.49 ^a	0.29	0.41	0.19	0.45	0.41
17	8	0.45	0.33	0.45 ^a	0.32	0.51	0.24	0.41	0.31
18	8.5	0.38	0.36	0.44	0.4	0.57	0.54	0.39	0.23
19	9	0.45	0.37	0.43	0.41	0.53	0.7	0.41	0.24
20	9.5	0.56	0.45	0.33 ^a	0.21	0.64	0.59	0.41 ^a	0.39
21	10	0.52	0.42	0.31 ^a	0.23	0.61	0.45	0.46 ^a	0.43
22	10.5	0.48	0.33	0.3	1.69	0.58	0.37	0.51 ^a	0.47

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

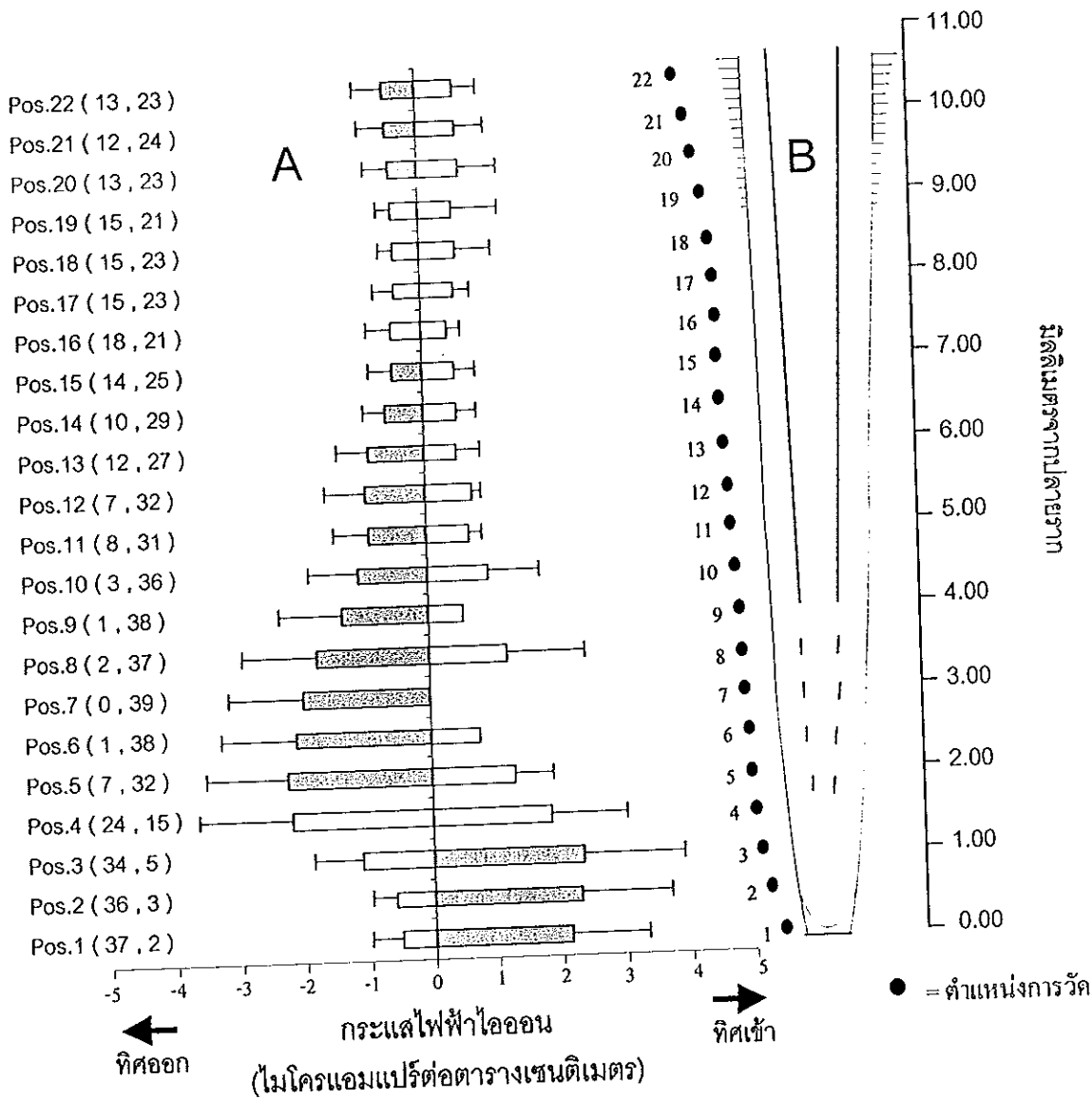
 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 35 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกภากรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรากที่ตัดหนวกรากวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก

A) ตำแหน่งการวัดจากปลายรากถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก



ภาพประกอบ 36 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากตามตำแหน่งของรากที่ตัดหนวรากวัดใน APW pH 6.00 ด้านใกล้ตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก

A) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

B) ตำแหน่งการวัดจากปลายรากถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร


ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทันทวนที่ตัดหมวกรากทั้งด้านใกล้ตัวและไกลตัวผู้วัดที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

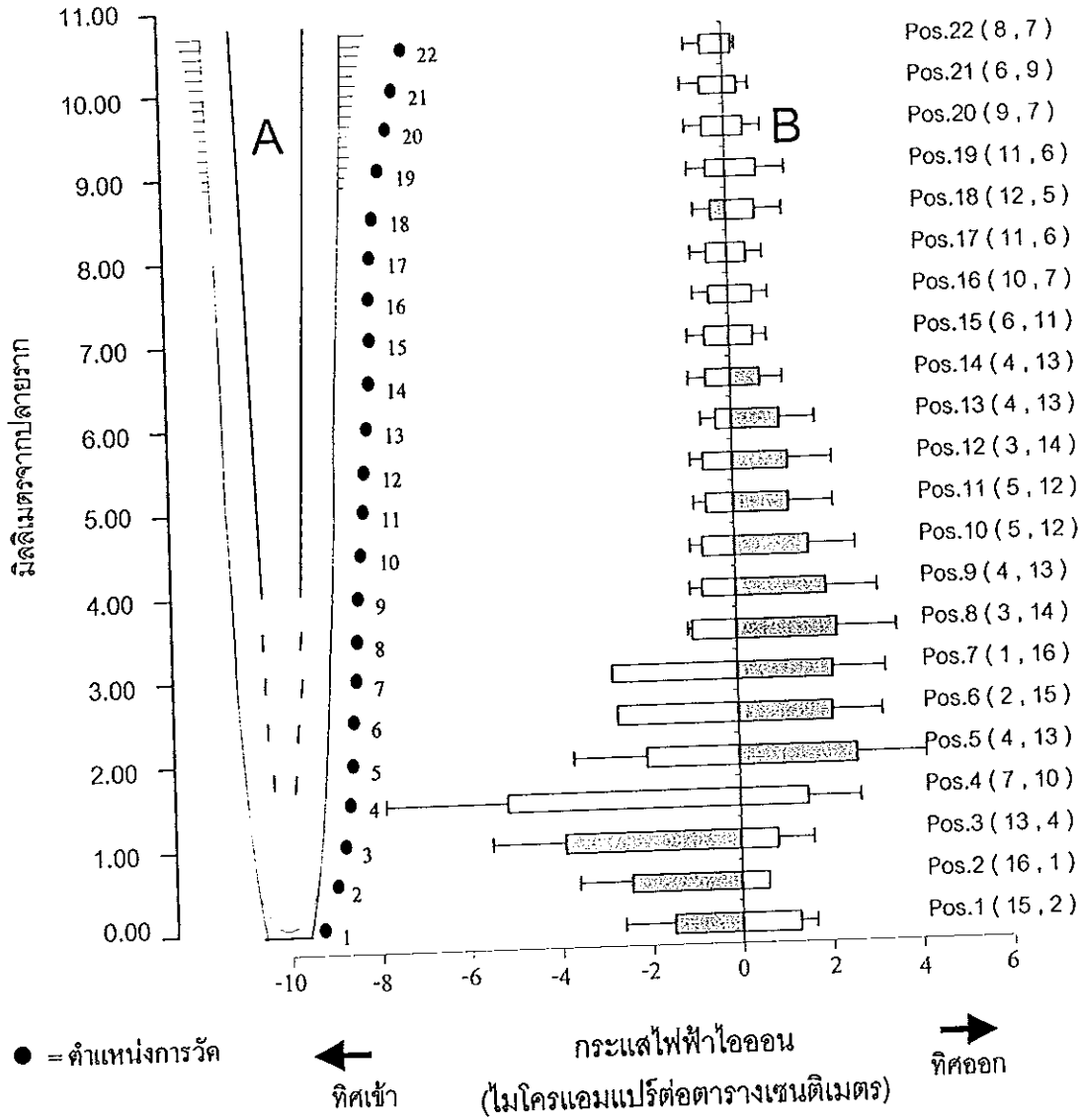
ตำแหน่งที่	ตำแหน่งจากปลายราก มม.	กระแสไฟฟ้าไอออนมีรากด้านใกล้ตัว($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออนมีรากด้านใกล้ตัว($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.52 ^a	1.08	1.29	0.36	1.89 ^a	1.20	0.18	M
2	0.5	2.46 ^a	1.13	0.61	M	2.08 ^a	1.23	0.35	M
3	1	3.88 ^a	1.61	0.83	0.78	2.26 ^a	1.13	0.41	0.19
4	1.5	5.14	2.74	1.52	1.13	1.76 ^a	0.92	2.03	1.18
5	2	2.07	1.60	2.59 ^a	1.55	1.34	0.22	2.23 ^a	1.26
6	2.5	2.68	0.00	2.09 ^a	1.09	N	M	1.93 ^a	0.94
7	3	2.80	M	2.11 ^a	1.15	N	M	1.97 ^a	1.29
8	3.5	0.98	0.09	2.22 ^a	1.30	2.07	M	1.72 ^a	1.31
9	4	0.75	0.28	1.99 ^a	1.13	0.53	M	1.35 ^a	1.16
10	4.5	0.69	0.27	1.64 ^a	1.01	0.51	0.16	1.05 ^a	0.91
11	5	0.60	0.27	1.24 ^a	0.96	0.63	0.25	0.86 ^a	0.57
12	5.5	0.66	0.27	1.24 ^a	0.96	0.62	0.14	0.84 ^a	0.62
13	6	0.34	0.33	1.06 ^a	0.78	0.38	0.21	0.76	0.39
14	6.5	0.54	0.39	0.66 ^a	0.49	0.41	0.28	0.55	0.22
15	7	0.53	0.38	0.52	0.30	0.59	0.39	0.32	0.20
16	7.5	0.44	0.36	0.53	0.35	0.44	0.24	0.28	0.15
17	8	0.48	0.36	0.42	0.34	0.51	0.24	0.26	0.09
18	8.5	0.36 ^b	0.38	0.63	0.59	0.45 ^b	0.27	0.25	0.09
19	9	0.45	0.41	0.68	0.64	0.43 ^b	0.47	0.33	0.29
20	9.5	0.50	0.36	0.42	0.37	0.46	0.43	0.46	0.54
21	10	0.53	0.43	0.31	0.24	0.42	0.27	0.56	0.63
22	10.5	0.49	0.36	0.19	0.08	0.46	0.27	0.64	0.65

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

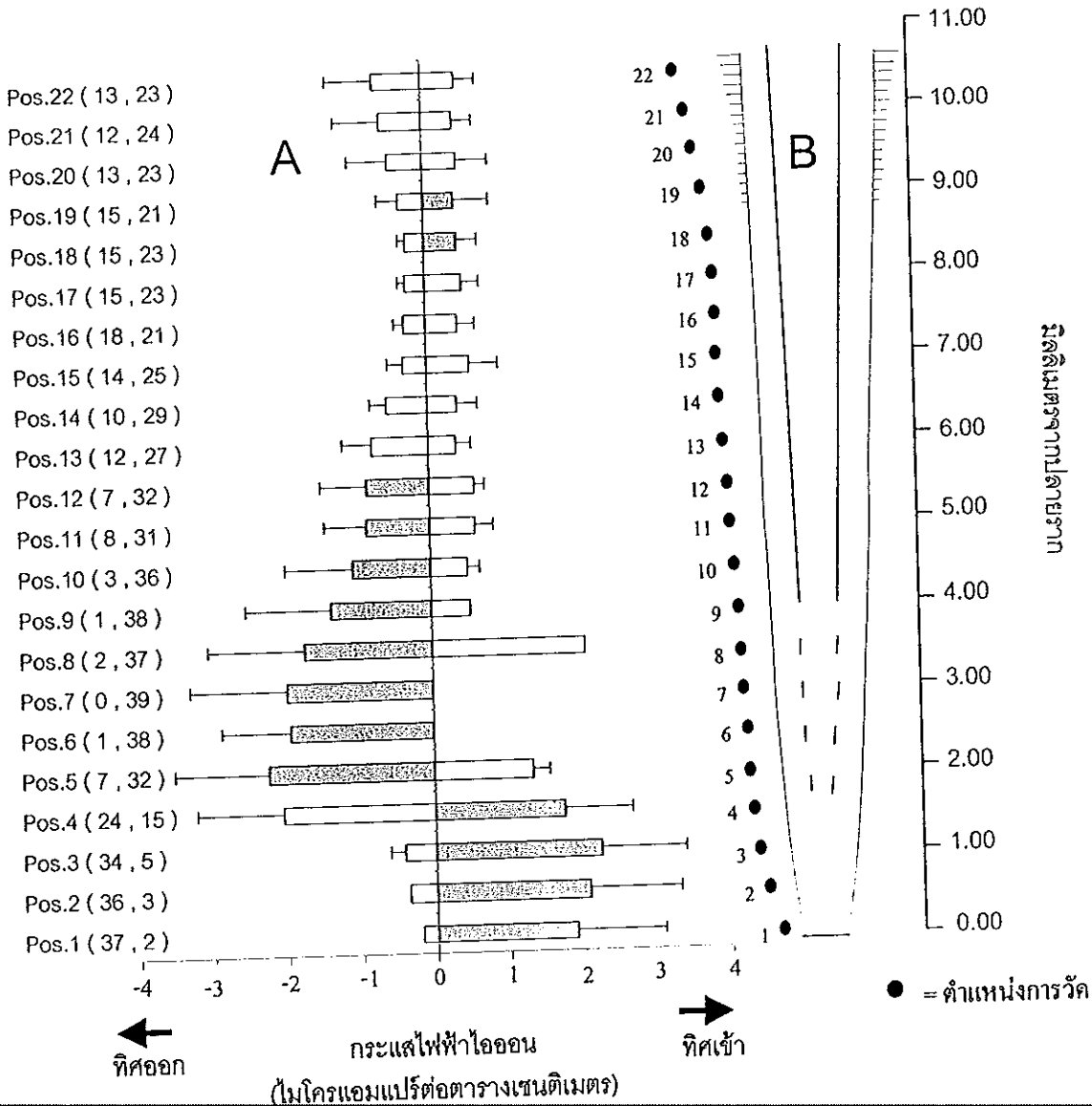
 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 37 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรอกทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดของรอกที่ติดหมวกวัดใน APW pH 6.00 ที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนรอก

A) ตำแหน่งการวัดจากปลายรอกถึงโคนรอกโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรอกที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รอก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรอกที่มีทิศออกจากรอก



ภาพประกอบ 38 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกภาวนตะวันของรากที่ตัดหมวดการวัดใน APW pH 6.00 ด้านใกล้ตัวผู้วัดที่มีกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก

A) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรงเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก


B) ตำแหน่งการวัดจากปลายรากถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

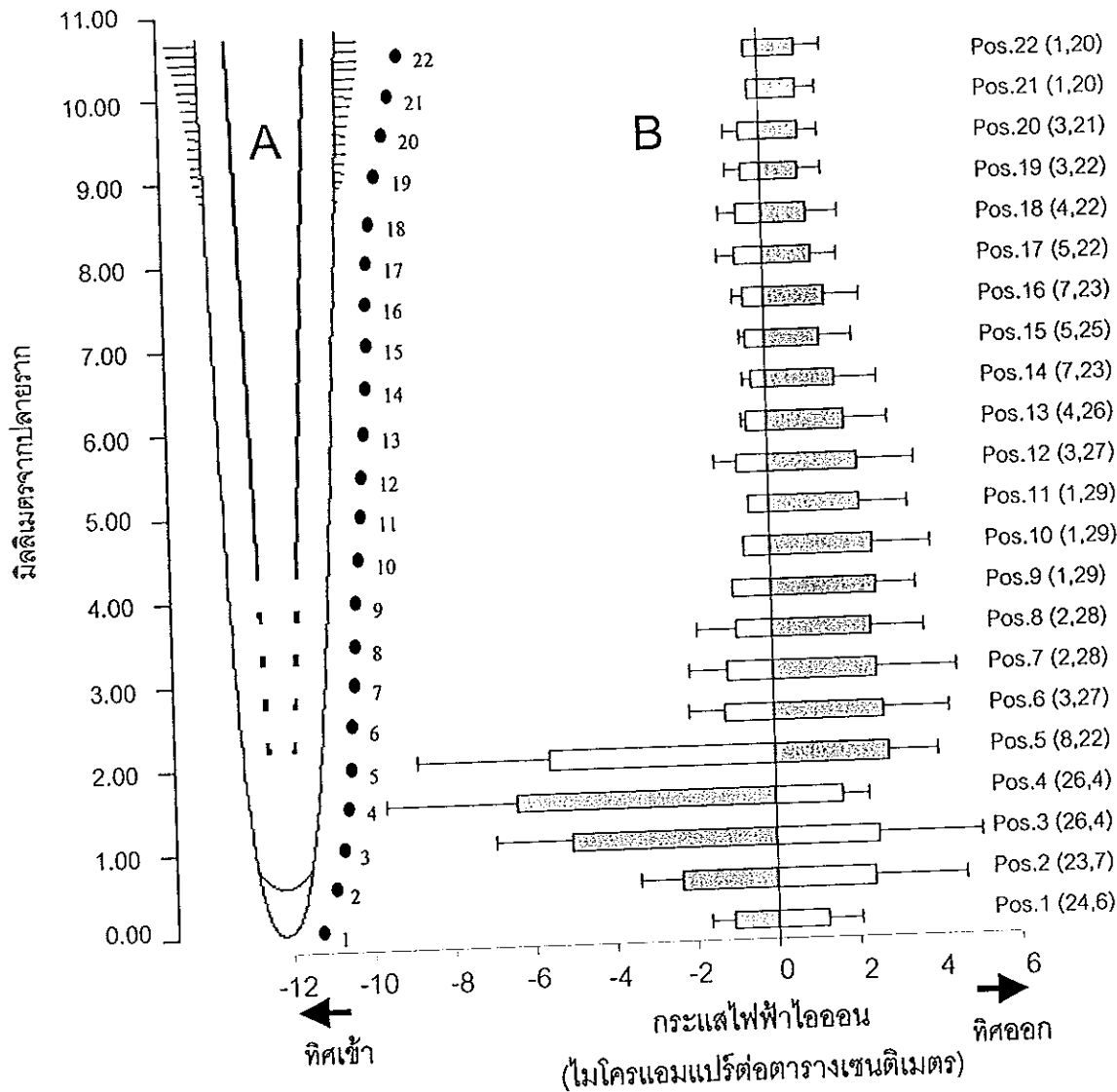
ตาราง 9 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ไม่ตัดหมวกรากด้านใกล้ตัวและไกลตัวผู้วัดที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

ตำแหน่งที่	ตำแหน่ง จาก ปลายราก mm.	กระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณรากด้านใกล้ตัว($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออนบริเวณรากด้านไกลตัว($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.09 ^a	0.56	1.24	0.83	1.84 ^a	0.91	0.86	0.78
2	0.5	2.34 ^a	1.05	2.42	2.25	4.27 ^a	2.21	0.62	0.78
3	1	5.06 ^a	1.89	2.53	2.54	4.78 ^a	2.67	0.26	0.2
4	1.5	6.41 ^a	3.24	1.64	0.66	3.48 ^a	2.26	3.41	1.55
5	2	5.58	3.26	2.84 ^b	1.2	2.06	1.64	5.01 ^a	2.36
6	2.5	1.2	0.88	2.7 ^a	1.64	2.13	1.56	3.61 ^a	1.55
7	3	1.12	0.93	2.55 ^a	1.97	N	M	3.24 ^a	1.7
8	3.5	0.89	0.98	2.44 ^a	1.31	N	M	3.32 ^a	1.76
9	4	0.94	M	2.58 ^a	0.97	N	M	3.16 ^a	1.58
10	4.5	0.66	M	2.62 ^a	1.43	N	M	2.9 ^a	1.44
11	5	0.51	M	2.23 ^a	1.18	N	M	2.32 ^a	1.36
12	5.5	0.76	0.55	2.2 ^a	1.4	N	M	2.27 ^a	1.31
13	6	0.49	0.11	1.91 ^a	1.07	0.09	M	2.03 ^a	1.19
14	6.5	0.37	0.21	1.7 ^b	1.03	0.42	M	1.67 ^a	1.09
15	7	0.48	0.14	1.35 ^a	0.79	0.2	0.14	1.57 ^a	0.96
16	7.5	0.49	0.27	1.51 ^a	0.83	0.19	0.06	1.56 ^a	1.14
17	8	0.69	0.44	1.21 ^a	0.6	0.52	0.41	1.46 ^a	0.98
18	8.5	0.63	0.44	1.12 ^a	0.78	0.3	0.2	1.34 ^a	0.94
19	9	0.46	0.39	0.95 ^a	0.54	0.27	0.05	1.38 ^a	0.85
20	9.5	0.51	0.37	0.96 ^a	0.48	0.35	0.08	1.26 ^a	0.72
21	10	0.26	M	0.93 ^a	0.48	0.45	0.16	1.3 ^a	0.68
22	10.5	0.32	M	0.95 ^a	0.61	0.56	M	1.26 ^a	0.83

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้ M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

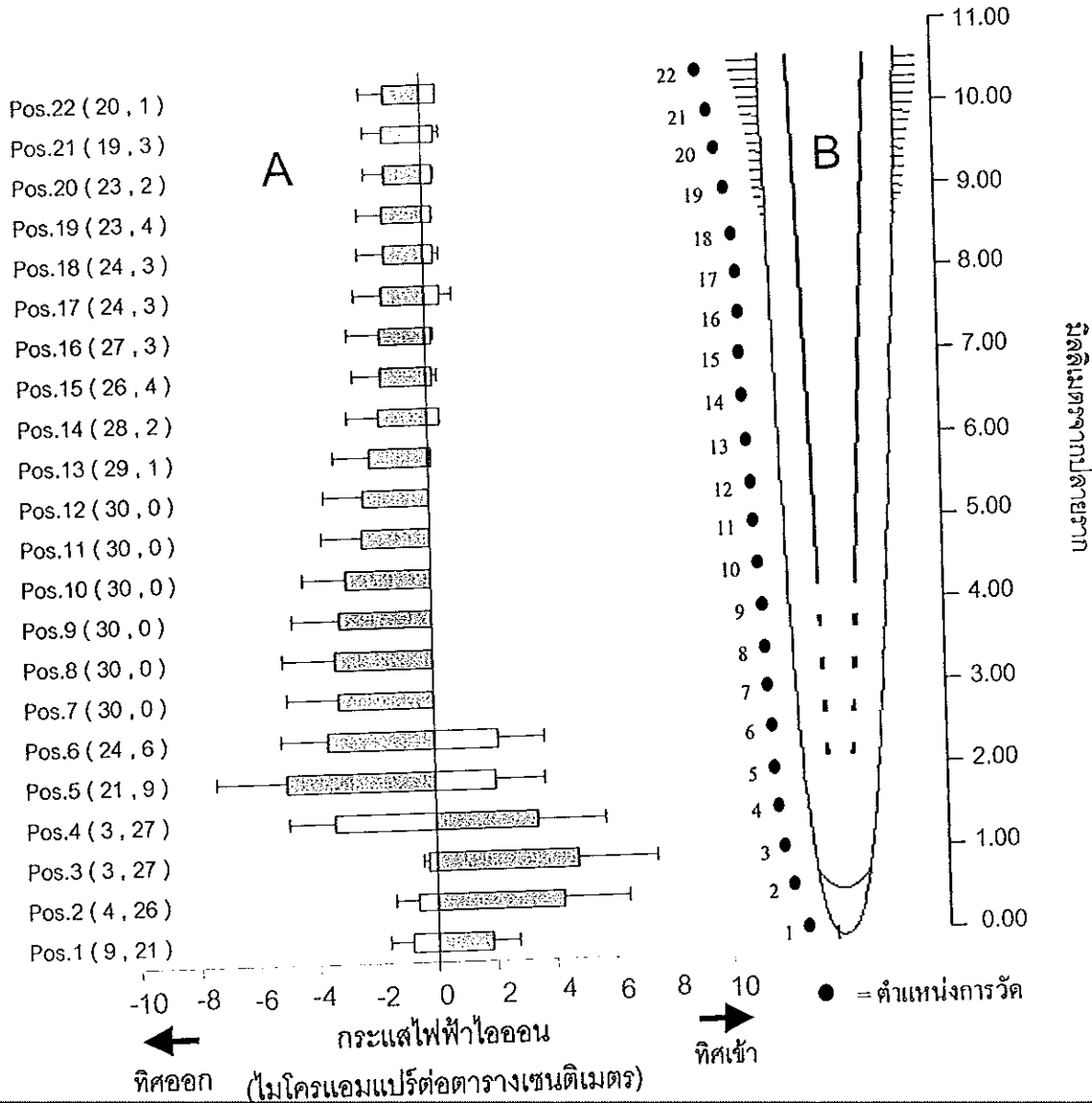


● = ตำแหน่งการวัด

ภาพประกอบ 39 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรกทวนตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรกที่ไม่ตัดนมรกวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนรก

A) ตำแหน่งการวัดจากปลายรกถึงโคนรกโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

B) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรกที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่รก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรกที่มีทิศออกจากรก



ภาพประกอบ 40 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากที่ไม่ตัดหนวกรากวัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก

A) ทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

B) ตำแหน่งการวัดจากปลายรากถึงโคนรากโดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

3.2.4 อัตราชีวิตของรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ

ในการทดลองกับรากที่ตัดหมวดราก 39 ราก มีผลของอัตราชีวิต 22 ราก (ตาราง 10) และในรากที่ไม่ตัดหมวดรากมีผลอัตราชีวิตใน 14 รากจาก 30 ราก (ตาราง 11) เหตุที่ไม่มีผลของอัตราชีวิตในทุกๆ รากที่ทำการวัดกระแสไฟฟ้า เนื่องจากในบางรากไม่มีจุดสังเกตที่มีลักษณะแตกต่างจากส่วนอื่นๆ จึงไม่สามารถวัดอัตราชีวิตได้ เมื่อพิจารณาอัตราชีวิตในตาราง 10-11 จะเห็นว่ารากที่มีความยาวต่างกันมีอัตราชีวิตของรากแตกต่างกันโดยรากที่ตัดหมวดรากซึ่งยาวกว่าและมีอายุมากกว่า (47.7 ± 2.2 ชั่วโมง) มีอัตราชีวิตเฉลี่ย 12.8 ± 6.1 ไมโครเมตรต่อนาที่ ซึ่งมากกว่ารากที่ไม่ตัดหมวดราก (อายุเฉลี่ย 42.9 ± 2.6 ชั่วโมง) ที่มีอัตราชีวิตเฉลี่ย 2.2 ± 0.8 ไมโครเมตรต่อนาที่ ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมายเนื่องจากรากที่มีอายุมากกว่าและยาวกว่าจะมีอัตราชีวิตมากกว่า (Beemster and Baskin, 1998) แต่สิ่งที่น่าสนใจคือรูปแบบ และ/หรือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า ไอออนจะมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างของการเจริญเติบโตนี้หรือไม่

พิจารณารูปแบบของกระแสไฟฟ้า ในรากที่ตัดหมวดรากที่มีอัตราชีวิตมากกว่ารากที่ไม่ตัดหมวดราก รูปแบบของกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นรูปแบบที่ 2 และ 3 (33 จาก 39 ราก) ซึ่งในสองรูปแบบนี้กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากสองช่วงคือที่ปลายรากในส่วนของเนื้อเยื่อเจริญและในบริเวณขนราก ส่วนรากที่ไม่ตัดหมวดรากส่วนใหญ่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 1 (18 จาก 30 ราก) ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญเท่านั้น ดังนั้นรูปแบบกระแสไฟฟ้าน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการยึดตัวของราก ซึ่งเหมือนกับในงานวิจัยของ Iwabushi และคณะ (1989) ที่พบว่าในขณะที่รากมีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ 2 บริเวณคือบริเวณเนื้อเยื่อเจริญและบริเวณขนรากจะมีอัตราชีวิตมากกว่าตอนที่รากมีกระแสไฟฟ้าเข้าเฉพาะที่บริเวณเนื้อเยื่อเจริญ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราชีวิตและกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มีทิศเข้าสู่ราก ดังแสดงในภาพประกอบ 41 และ 42 จะเห็นว่าปริมาณทั้งสองไม่น่าจะมีความสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาข้างต้นจะเห็นว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้ามีผลต่ออัตราชีวิต ดังนั้นจึงได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราชีวิตและกระแสไฟฟ้าของรากในแต่ละรูปแบบ นั่นคือรูปแบบที่ 2 และ 3 ในรากที่ตัดหมวดรากและรูปแบบที่ 1 ในรากที่ไม่ตัดหมวดราก ดังแสดงในภาพประกอบ 43, 44 และ 45 ตามลำดับ จะเห็นว่ามียังรากที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 1 (ภาพประกอบ 45) ที่มีแนวโน้มว่าอัตราชีวิตของรากจะเพิ่มตามขนาดของกระแสไฟฟ้า ส่วนรากที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 (ภาพประกอบ 43 และ 44) ไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะลักษณะการเข้า-ออกของกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 และ 3 ซับซ้อนกว่าในแบบ

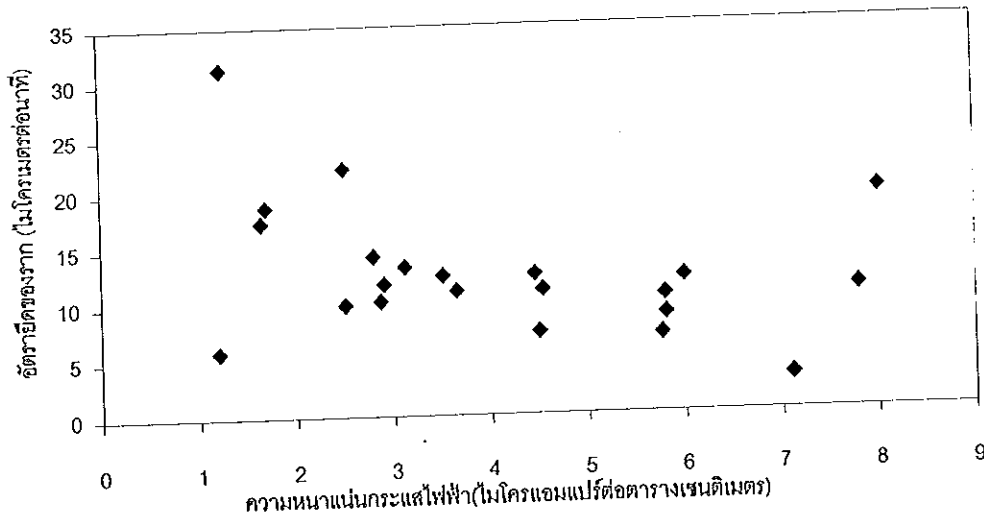
ที่ 1 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายึดและขนาดกระแสไฟฟ้าน่าจะมีความซับซ้อนมากกว่ารูปแบบที่ 1 เช่นกัน

ตาราง 10 อัตรายึดของรากที่ตัดหมวกรากมีความยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าในตารางคือกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายรากด้วยขนาดสูงสุด

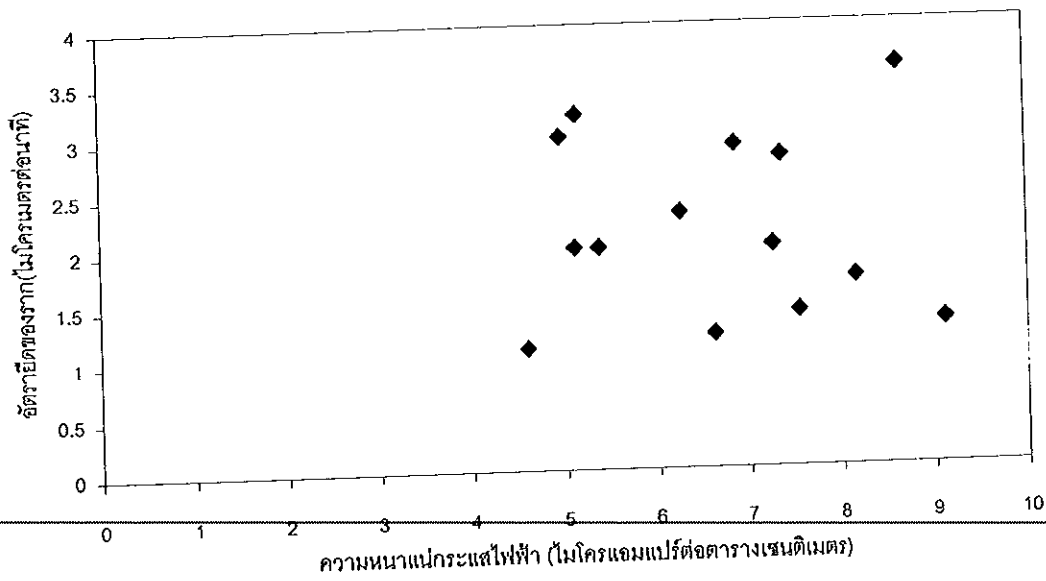
รากที่	รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออน	อายุราก (hr)	ความยาวรากเริ่มต้นก่อนการทดลอง (cm)	อัตรายึด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	กระแสไฟฟ้า ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	2	46.8	1.7	10.0	2.51
2	2	46.2	1.8	11.1	4.54
3	2	48.4	1.8	12.5	3.52
4	2	45.7	1.7	5.9	1.20
5	2	41.7	1.5	11.1	3.66
6	2	50.8	1.5	11.8	2.94
7	2	51.3	1.6	18.8	1.03
8	2	49.5	1.7	12.5	4.46
9	2	46.3	1.8	7.3	4.50
10	2	46.0	2.0	8.8	5.81
11	3	46.8	1.7	19.6	8.01
12	3	48.0	1.7	31.3	1.25
13	3	44.3	1.9	12.1	6.00
14	3	46.8	1.9	3.1	7.11
15	3	48.7	1.5	10.3	2.87
16	3	48.8	1.6	13.3	3.13
17	3	49.0	1.6	22.2	2.50
18	3	50.0	1.8	10.5	5.80
19	3	47.7	2.0	17.4	1.65
20	3	46.0	1.6	11.0	7.80
21	3	48.3	1.7	14.3	3.26
22	3	48.8	1.6	7.0	5.77
เฉลี่ย		47.7 ± 2.22	1.7 ± 0.15	12.8 ± 6.1	4.1 ± 2.1

ตาราง 11 อัตรายึดของรากที่ไม่ตัดหมวกรากมีความยาว 1.0-1.5 เซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าใน
ตารางคือกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายรากด้วยขนาดสูงสุด

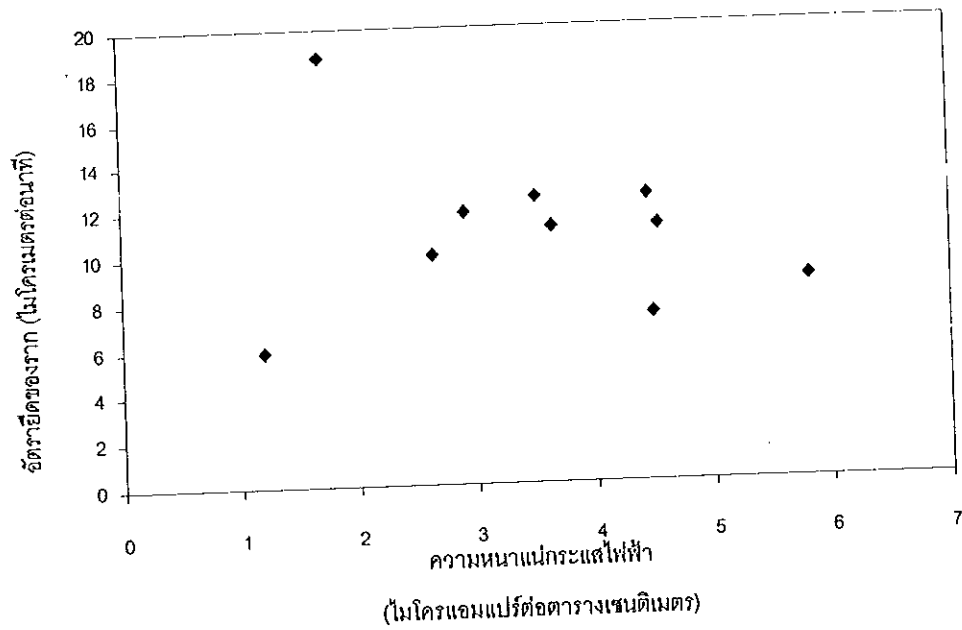
รากที่	รูปแบบ ของกระแสไฟฟ้าไอออน	อายุราก (hr)	ความยาวรากเริ่มต้น ก่อนการทดลอง(cm)	อัตรายึด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	กระแสไฟฟ้า ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	1	43.0	1.3	2.0	7.27
2	1	40.6	1.5	2.9	6.87
3	1	42.5	1.4	1.3	9.12
4	1	42.4	1.4	1.2	6.63
5	1	40.9	1.2	2.3	6.27
6	1	40.8	1.2	1.4	7.54
7	1	43.6	1.3	3.6	8.64
8	1	45.1	1.1	2.8	7.37
9	1	47.8	1.0	3.2	5.15
10	1	38.8	1.5	1.7	8.16
11	1	47.8	1.1	2.0	5.12
เฉลี่ย		43.0 ± 2.9	1.27 ± 0.17	2.2 ± 0.8	7.1 ± 1.3



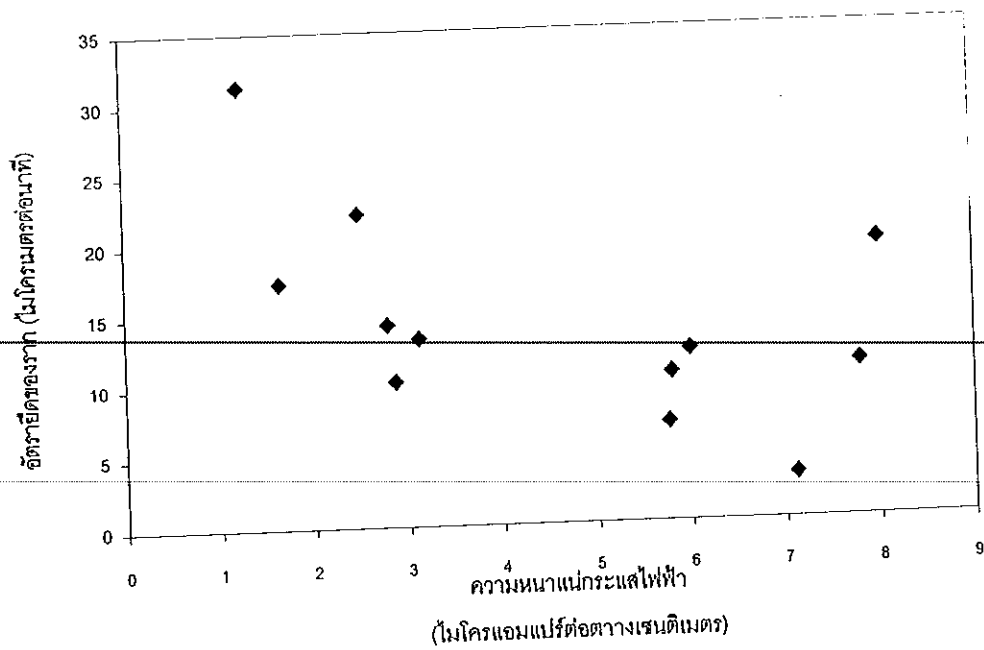
ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ของอัตราไข่ของรากและกระแสดังกล่าวในรากที่ตัดหมวกราก



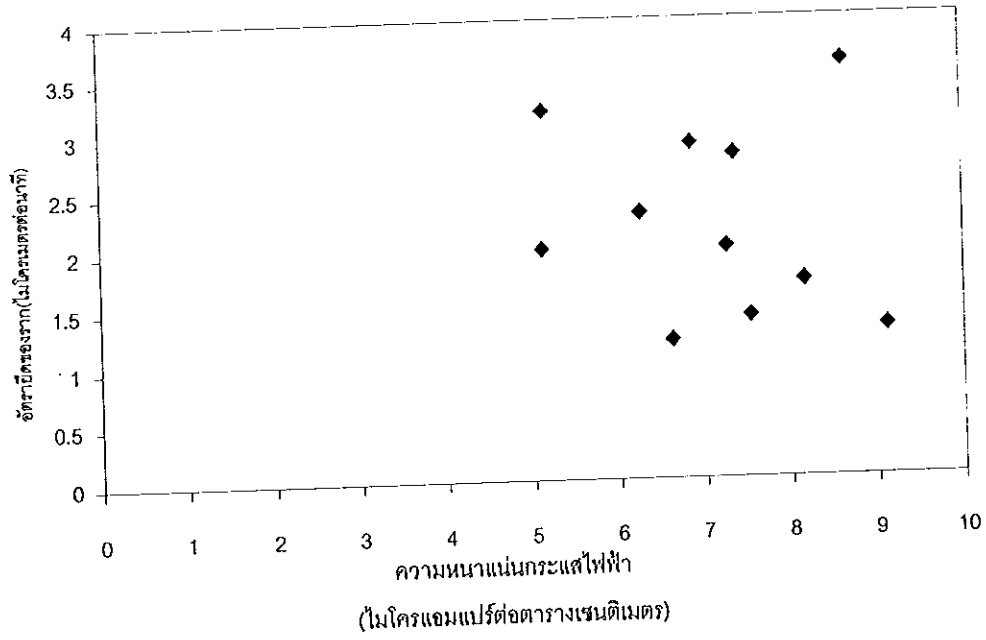
ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ของอัตราไข่ของรากและกระแสดังกล่าวในรากที่ไม่ตัดหมวกราก



ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ของอัตรายี่ดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 2 ในรากที่ตัดหมวกราก



ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ของอัตรายี่ดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 3 ในรากที่ตัดหมวกราก



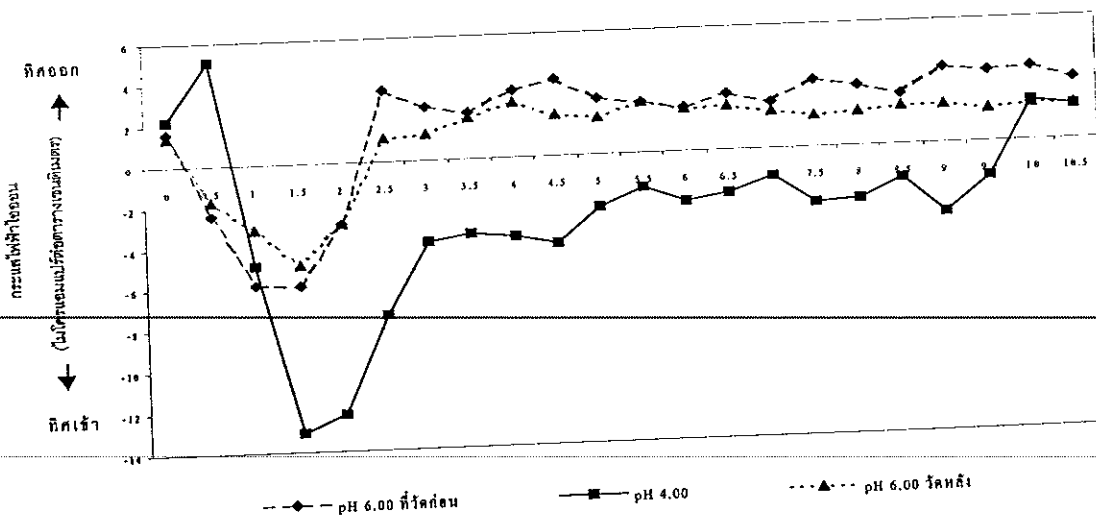
ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ของอัตรายี่ดของรากและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 1 ในรากที่ไม่ตัดหมวกราก

3.3 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่มีค่า pH ต่างๆ

ในการพิจารณาว่า pH (ปริมาณ H^+) จะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าอย่างไร ทดลองโดยวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ pH 6.00 เปรียบเทียบกับที่ pH 4.00 และ 8.00 จากการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่าหากใช้เวลาในการวัดนานเกินไปรากจะโค้งงอลงทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงวัดเพียงด้านใกล้ตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียวโดยวัดจากปลายรากถึงโคนราก โดยแต่ละตำแหน่งของการวัดห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

3.3.1 pH 6.00 และ 4.00

เริ่มการทดลองโดยวัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่สภาวะปกติ (pH 6.00) หลังจากนั้นจึงวัดที่ pH 4.00 และวัดครั้งสุดท้ายที่ pH 6.00 อีกครั้ง พบว่าที่ pH 4.00 ทั้งขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าแตกต่างจากที่ pH 6.00 อย่างชัดเจน (ภาพประกอบ 46) โดยที่ pH 4.00 กระแสไฟฟ้ามีขนาดมากกว่าที่ pH 6.00 และมีทิศเข้าสู่รากเกือบตลอดความยาวราก ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 ทั้งก่อนและหลังการวัดที่ pH 4.00 มีขนาดและทิศทางใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 46 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 4.00

เมื่อนำผลการทดลองจากทั้ง 17 ราก มาทดสอบทางสถิติ โดยพิจารณาที่แต่ละตำแหน่งของการวัดเพื่อหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนที่มีนัยสำคัญ ได้ผลการทดสอบแสดงในตาราง 12 และภาพประกอบ 47 จะเห็นว่าที่ pH 6.00 กระแสไฟฟ้าจะเข้าสู่รากบริเวณเนื้อเยื่อเจริญที่ปลายรากและออกจากรากในบริเวณถัดไปที่เป็นบริเวณเซลล์ยึดตัว ส่วนใน pH 4.00 จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนทั้งทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้า ในกรณีของทิศทางที่ปลายรากกระแสไฟฟ้าก็มีทิศเข้าเหมือนที่ pH 6.00 แต่มีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าในบริเวณเซลล์ยึดตัวและบริเวณขนราก (2.50-10.00 มิลลิเมตรจากปลายราก) จะเปลี่ยนจากที่มีทิศออกใน pH 6.00 เป็นมีทิศเข้าใน pH 4.00

เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 ทั้งที่วัดก่อนและหลังการวัดที่ pH 4.00 มีขนาดน้อยกว่า คือมีขนาดเฉลี่ย 0.28-5.54 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ pH 4.00 กระแสไฟฟ้ามีขนาดเฉลี่ย 0.56-8.93 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี "การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม กรณีข้อมูลแบบจับคู่" (ดู 2.16.1) พบว่าอย่างน้อย 13 รากจากทั้งหมด 17 ราก (ตาราง 13a) ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนที่ pH 4.00 มากกว่าที่ pH 6.00 อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.10$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 ก่อนและหลังจากการวัดที่ pH 4.00 (ตาราง 13c) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดภายหลังจะน้อยกว่าที่วัดในตอนแรก ซึ่งอาจจะหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจาก pH 6.00 เป็น pH 4.00 อาจจะมีผลในระยะยาวกับราก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดภายหลังลดลงไป หรืออาจจะเนื่องจากเป็นช่วงเวลากการวัดที่ต่างกัน เนื่องจากมีผู้พบว่าในรากเดียวกันหากเวลาเปลี่ยนไป ขนาดของกระแสไฟฟ้าก็อาจจะเปลี่ยนไปได้เช่นกัน (Iwabuchi, 1989) แต่ในกรณีของ pH 4.00 ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าน่าจะเป็นผลของ pH มากกว่าเป็นผลของเวลาเนื่องจากลักษณะเช่นนี้เคยพบในพืชชนิดอื่นเช่นกัน เช่นในรากข้าวโพด (Miller, 1989) และในสาหร่ายน้ำจืด *Micrasterias* และ *Closterium* (Troxell, 1989) ที่พบว่าเมื่อลดค่า pH ของสารละลายตัวกลางจะทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนเพิ่มขึ้น

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันสภาพปกติ pH 6.00 และสภาพ pH 4.00 โดยวัดเพียงด้านใกล้ตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก แต่ละตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งจากปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาพ pH = 6.00 ที่วัดก่อน				สภาพ pH = 4.00				สภาพ pH = 6.00 ที่วัดหลัง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.53	0.86	1.29	0.92	N	M	2.26 ^a	1.29	1.97	1.15	1.32	1.06
2	0.5	2.16 ^b	0.74	1.75	0.62	2.91 ^b	2.60	3.90	0.94	2.85 ^b	2.29	0.31	M
3	1	3.35 ^c	1.45	0.90	M	5.86 ^c	3.91	2.22	M	4.89 ^b	4.21	1.17	1.14
4	1.5	5.54	1.97	1.45	0.65	6.93 ^c	4.53	N	M	3.84 ^b	3.72	1.49	0.85
5	2	2.07	1.04	2.60	1.35	8.44 ^c	4.15	1.87	M	2.44	2.29	1.44 ^b	0.38
6	2.5	2.41	2.68	3.05 ^a	1.60	6.16 ^b	3.26	1.39	0.46	0.73	0.35	1.73 ^b	0.46
7	3	1.34	1.19	2.91 ^a	1.78	5.22 ^b	3.13	1.33	0.55	0.32	0.14	2.19 ^b	1.11
8	3.5	1.18	0.66	3.00 ^a	1.51	3.62 ^b	2.37	1.76	0.11	0.28	0.17	2.56 ^b	1.21
9	4	1.30	0.49	2.69 ^a	1.33	3.42 ^b	2.07	1.09	M	0.44	0.32	2.39 ^b	0.97
10	4.5	0.98	1.01	2.45 ^a	1.32	3.73 ^b	2.02	0.56	0.18	0.37	0.34	2.01 ^b	0.91
11	5	0.93	0.48	2.10 ^a	1.47	3.26 ^b	2.08	1.28	1.36	0.43	0.24	1.62 ^b	0.73
12	5.5	0.77	0.55	2.17 ^a	1.56	3.55 ^b	1.73	1.23	1.05	0.57	M	1.74 ^b	0.86
13	6	0.78	0.53	1.68 ^a	0.86	3.02 ^b	1.39	0.95	0.88	0.76	M	1.50 ^b	0.76
14	6.5	0.74	0.60	1.51 ^a	0.87	3.10 ^b	1.55	0.94	0.76	0.87	M	1.60 ^b	0.81
15	7	0.77	0.23	1.40 ^a	0.78	3.03 ^b	1.54	0.70	0.38	0.96	M	1.47 ^b	0.69
16	7.5	1.08	0.53	1.45 ^a	0.82	2.96 ^b	1.37	0.74	0.23	0.97	M	1.46 ^b	0.83
17	8	0.63	M	1.45 ^a	0.80	3.29 ^b	2.01	0.79	0.38	0.81	M	1.61 ^b	0.94
18	8.5	1.08	M	2.27 ^a	1.39	2.95	1.43	1.04	0.37	N	M	1.65 ^b	0.98
19	9	1.43	M	2.43 ^a	1.04	2.40	0.77	1.04	0.37	N	M	1.53 ^b	0.67
20	9.5	0.95	M	2.16	1.13	2.10 ^a	1.30	0	M	N	M	1.64 ^b	0.89
21	10	0.95	M	2.07	1.35	0.97	0.31	1.94	M	N	M	2.25 ^b	0.99
22	10.5	0	M	1.99	1.40	1.48	M	1.66	M	N	M	2.09	0.49

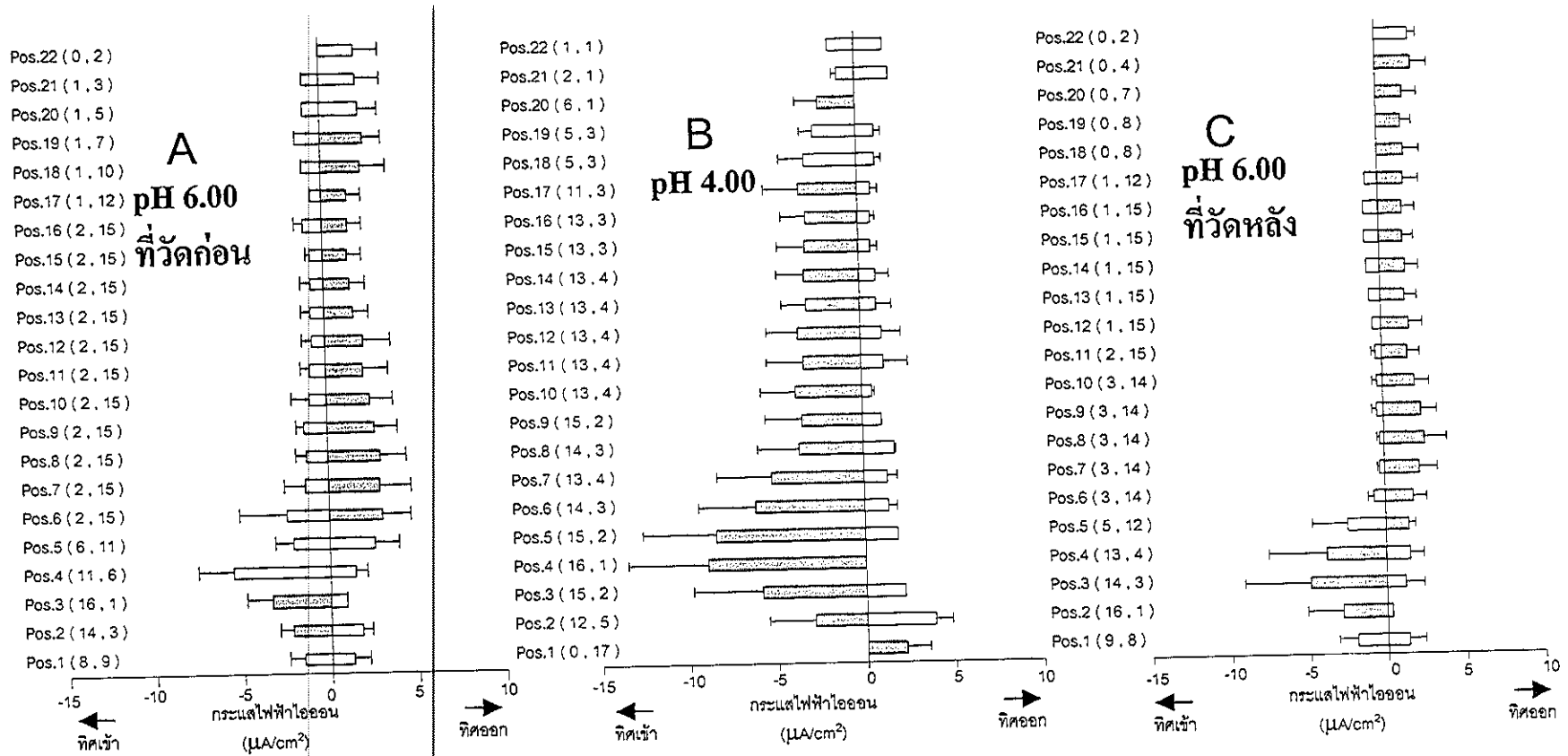
N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$



แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 47 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 6.00 และ 4.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

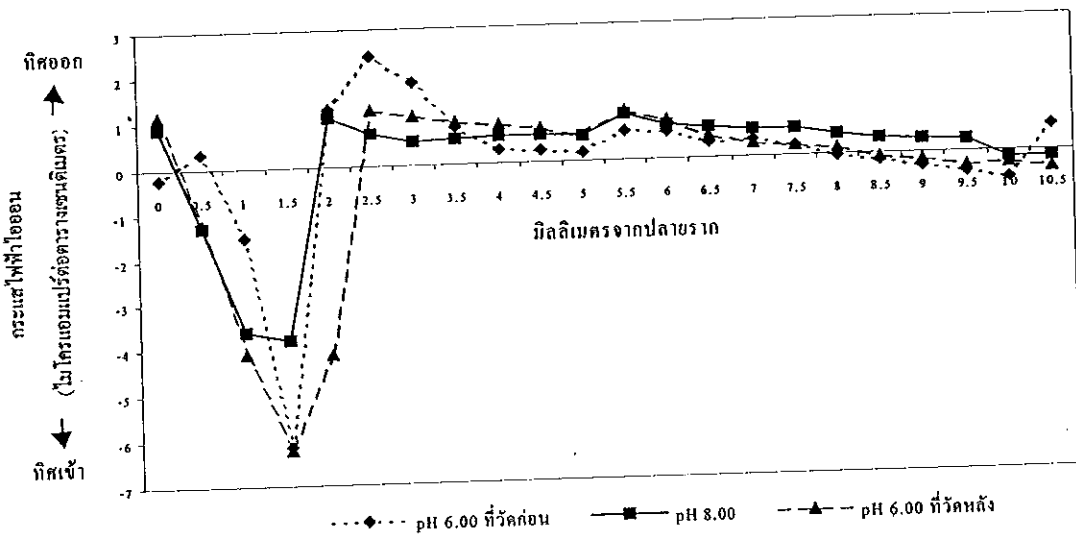
- (A) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 6.00 ที่วัดก่อน
- (B) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 4.00
- (C) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 6.00 ที่วัดหลัง

ตาราง 13 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ 4.00 เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) pH 4.00 และ 6.00 ที่วัดก่อน b) pH 4.00 และ 6.00 ที่วัดหลัง และ c) pH 6.00 ที่วัดหลังและ pH 6.00 ที่วัดก่อน

รากที่	df	a) pH 4.00-pH 6.00 ที่วัดก่อน		b) pH 4.00-pH 6.00 ที่วัดหลัง		c) pH 6.00 ที่วัดหลัง-pH 6.00 ที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	15	2.569	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.025)	2.192	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.025)	-0.682	ไม่มีความแตกต่าง
2	19	1.711	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	3.644	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-2.379	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.025)
3	16	4.306	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	0.253	ไม่มีความแตกต่าง	-0.119	ไม่มีความแตกต่าง
4	21	3.151	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	2.49	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.025)	2.047	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.05)
5	16	4.212	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	5.591	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-0.404	ไม่มีความแตกต่าง
6	20	1.474	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	1.182	ไม่มีความแตกต่าง	0.283	ไม่มีความแตกต่าง
7	15	0.656	ไม่มีความแตกต่าง	2.104	pH 4.00 < pH 6.00 (P<0.05)	2.236	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.025)
8	21	1.340	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	3.209	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-6.324	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.005)
9	13	0.398	ไม่มีความแตกต่าง	1.544	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	-1.629	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.10)
10	16	5.668	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	6.468	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-0.976	ไม่มีความแตกต่าง
11	15	3.189	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	3.681	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-1.971	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.05)
12	19	0.694	ไม่มีความแตกต่าง	7.342	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-3.999	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.005)
13	15	5.009	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	7.457	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-1.884	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.05)
14	18	1.688	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	2.209	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.025)	-0.675	ไม่มีความแตกต่าง
15	19	1.678	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	2.036	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.05)	-1.012	ไม่มีความแตกต่าง
16	18	1.467	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.1)	2.312	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.025)	-2.158	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.025)
17	16	3.282	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	3.625	pH 4.00 > pH 6.00 (P<0.005)	-0.488	ไม่มีความแตกต่าง

3.3.2 pH 6.00 และ 8.00

เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที pH 6.00 และ 8.00 จำนวน 8 ราก พบว่ากระแสไฟฟ้าในรากส่วนใหญ่ทั้งที pH 6.00 และ 8.00 มีขนาดและทิศทางใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 48) และจากการทดสอบทางสถิติสามารถกล่าวได้ว่ากระแสไฟฟ้าที pH 6.00 และ 8.00 มีทิศเข้าสู่และออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ทีบริเวณใกล้เคียงกัน (ตาราง 14 และภาพประกอบ 49)



ภาพประกอบ 48 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที pH 6.00 และ 8.00

ในกรณีของขนาดของกระแสไฟฟ้า เมื่อทดสอบทางสถิติ (ตาราง 15) พบว่าความแตกต่างของขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่ชัดเจนเท่ากับใน pH 4.00 กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนจาก pH 6.00 เป็น 8.00 กระแสไฟฟ้าที pH 8.00 มีขนาดน้อยกว่าที pH 6.00 2 รากและมีขนาดมากกว่า 2 ราก ส่วนอีก 4 ราก ความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญ (ตาราง 15a) เมื่อเปลี่ยนสารละลายจาก pH 8.00 เป็น 6.00 ใน 6 รากจากทั้งหมด 8 ราก ขนาดของกระแสไฟฟ้าและที pH 8.00 จะน้อยกว่าที pH 6.00 (ตาราง 15b) ($P < 0.10$) อย่างไรก็ตามก็พอจะเห็นแนวโน้มว่า เมื่อ pH เพิ่มกระแสไฟฟ้าจะมีขนาดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับที่พบในรากข้าวโพด (Miller, 1989)

ในทำนองเดียวกันกับที่พบใน pH 4.00 การเปลี่ยนสภาพแวดล้อมจาก pH 6.00 เป็น pH 8.00 และกลับไป pH 6.00 อีกครั้ง ทำให้มีความแตกต่างของขนาดของกระแสไฟฟ้าที pH 6.00 ที่วัดก่อนและหลังการวัดกระแสไฟฟ้าที pH 8.00 โดยใน 4 ราก (จาก 8 ราก) กระแสไฟฟ้าที

วัดภายหลังจะมากกว่าและน้อยกว่าใน 2 ราก ส่วนในอีก 2 รากกระแสไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างกัน
ใน 2 ราก (ตาราง 15c)


ตาราง 14 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันสภาวะปกติ pH 6.00 และ
pH 8.00 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนราก
แต่ละตำแหน่งการวัดห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

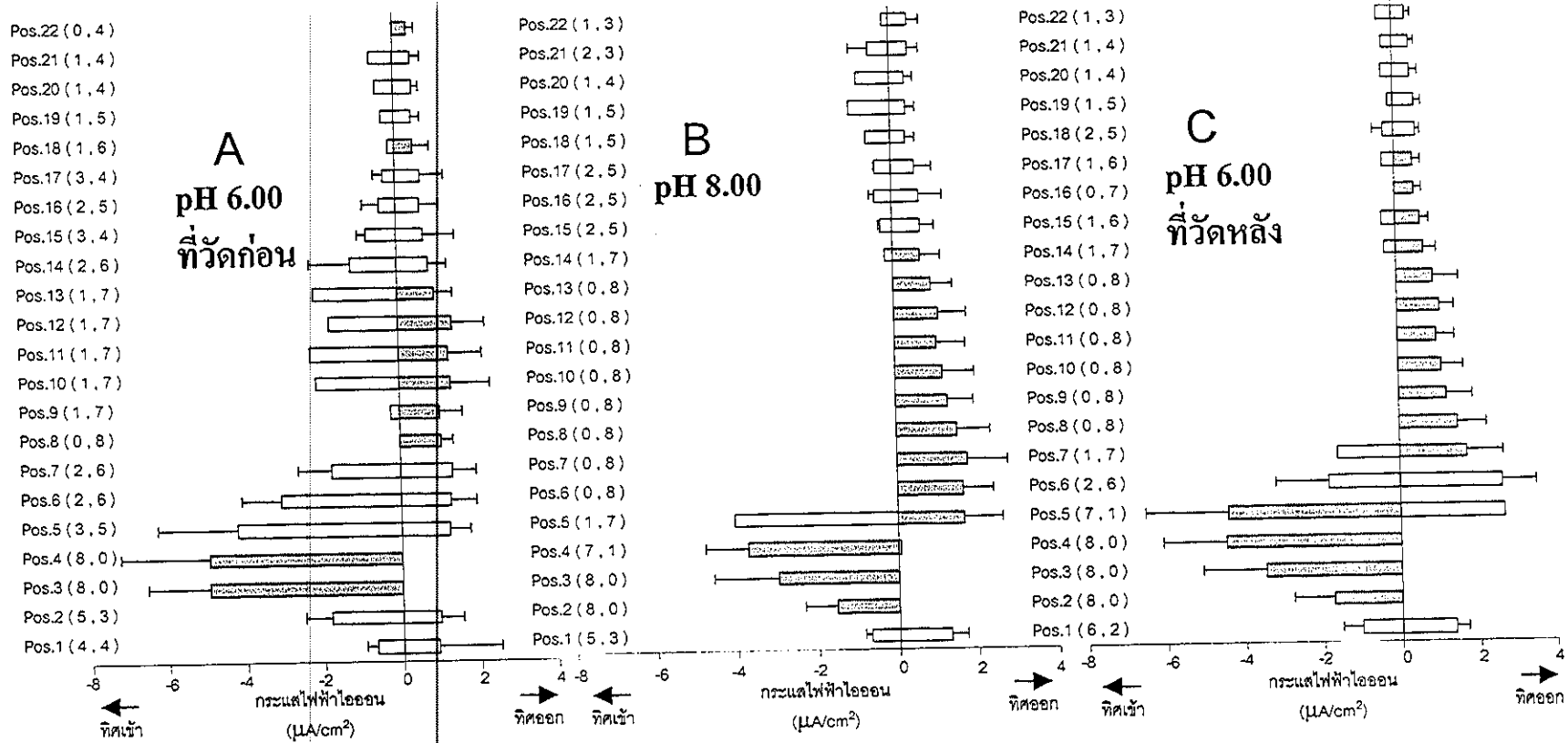
ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง จาก ปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาวะ pH = 6.00 ที่วัดก่อน				สภาวะ pH = 8.00				สภาวะ pH = 6.00 ที่วัดหลัง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	0.66	0.27	0.93	1.60	0.69	0.15	1.29	0.41	1.03	0.49	1.36	0.34
2	0.5	1.81	0.68	0.97	0.57	1.53 ^a	0.81	N	M	1.73 ^b	1.01	N	M
3	1	4.92 ^a	1.61	N	M	2.97 ^a	1.59	N	M	3.45 ^b	1.60	N	M
4	1.5	4.92 ^a	2.31	N	M	3.71 ^a	1.06	0.06	M	4.47 ^b	1.61	N	M
5	2	4.19	2.07	1.25	0.53	4.04	M	1.67 ^a	0.97	4.41 ^b	2.11	2.68	M
6	2.5	3.07	1.02	1.29	0.64	N	M	1.64 ^a	0.75	1.83	1.36	2.62	0.87
7	3	1.77	0.84	1.34	0.62	N	M	1.76 ^a	1.01	1.59	M	1.71 ^a	0.95
8	3.5	N	M	1.07 ^a	0.29	N	M	1.50 ^a	0.64	N	M	1.49 ^a	0.75
9	4	0.21	M	1.04 ^a	0.57	N	M	1.30 ^a	0.63	N	M	1.23 ^a	0.66
10	4.5	2.11	M	1.33 ^a	1.00	N	M	1.19 ^a	0.79	N	M	1.11 ^a	0.55
11	5	2.27	M	1.29 ^a	0.85	N	M	1.05 ^a	0.72	N	M	0.99 ^a	0.46
12	5.5	1.77	M	1.39 ^a	0.85	N	M	1.11 ^a	0.69	N	M	1.08 ^a	0.37
13	6	2.16	M	0.95 ^a	0.48	N	M	0.93 ^a	0.55	N	M	0.93 ^a	0.65
14	6.5	1.19	1.05	0.82	0.47	0.19	M	0.69 ^a	0.60	0.29	M	0.70 ^a	0.32
15	7	0.76	0.23	0.70	0.80	0.29	0.05	0.69	0.35	0.35	M	0.62 ^a	0.23
16	7.5	0.41	0.46	0.61	0.50	0.42	0.12	0.67	0.58	N	M	0.40 ^a	0.19
17	8	0.29	0.24	0.65	0.61	0.39	0.02	0.59	0.41	0.32	M	0.47 ^a	0.19
18	8.5	0.15	M	0.48 ^a	0.43	0.62	M	0.37	0.22	0.27	0.26	0.54	0.12
19	9	0.32	M	0.45	0.22	1.02	M	0.38	0.24	0.15	M	0.53	0.16
20	9.5	0.47	M	0.47	0.18	0.83	M	0.37	0.22	0.29	M	0.43	0.20
21	10	0.59	M	0.45	0.25	0.51	0.48	0.46	0.29	0.27	M	0.42	0.12
22	10.5	N	M	0.38 ^a	0.20	0.15	M	0.47	0.29	0.39	M	0.33	0.14

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 49 ขนาดและทิศทางของกระแสดไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกภาควานตะวันตกด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 6.00 และ 8.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสดไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสดไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

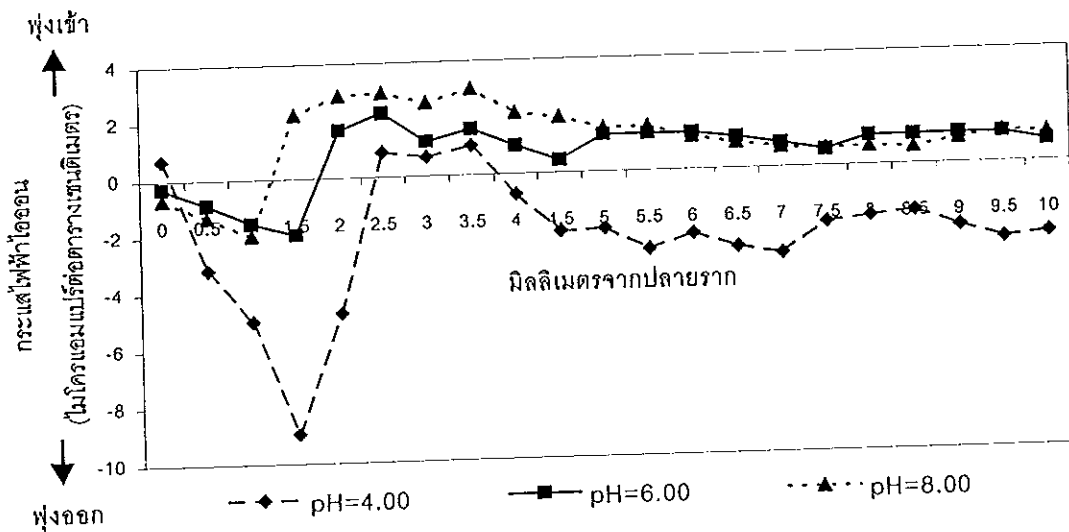
- (A) ขนาดและทิศทางของกระแสดไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 6.00 ที่วัดก่อน
- (B) ขนาดและทิศทางของกระแสดไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 8.00
- (C) ขนาดและทิศทางของกระแสดไฟฟ้าไอออนวัดใน APW pH 6.00 ที่วัดหลัง

ตาราง 15 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 และ 8.00เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) pH 8.00 และ 6.00 ที่วัดก่อน b) pH 8.00 และ 6.00 ที่วัดหลัง และ c) pH 6.00 ที่วัดหลังและ pH 6.00 ที่วัดก่อน

ภาคที่	df	a) pH 8.00-pH 6.00 ที่วัดก่อน		b) pH 8.00-pH 6.00 ที่วัดหลัง		c) pH 6.00 ที่วัดหลัง-pH 6.00 ที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	21	1.135	ไม่มีความแตกต่าง	2.229	pH 8.00 > pH 6.00 (P<0.025)	-0.703	ไม่มีความแตกต่าง
2	13	-3.347	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.005)	-0.010	ไม่มีความแตกต่าง	-2.663	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.025)
3	21	-1.105	ไม่มีความแตกต่าง	-1.769	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.05)	0.769	ไม่มีความแตกต่าง
4	18	0.605	ไม่มีความแตกต่าง	-1.776	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.05)	1.938	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.05)
5	21	-0.038	ไม่มีความแตกต่าง	-1.792	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.05)	1.605	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.10)
6	20	1.723	pH 8.00 > pH 6.00 (P<0.1)	-2.917	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.005)	3.854	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.005)
7	17	2.519	pH 8.00 > pH 6.00 (P<0.025)	-2.666	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.01)	3.648	pH 6.00 ที่วัดหลัง > pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.005)
8	21	-4.420	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.005)	-2.045	pH 8.00 < pH 6.00 (P<0.05)	-4.607	pH 6.00 ที่วัดหลัง < pH 6.00 ที่วัดก่อน (P<0.005)

3.2.3 pH 4.00 , 6.00 และ 8.00

จากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00 จำนวน 7 ราก พบว่าที่ pH 6.00 และ 8.00 กระแสไฟฟ้าในรากส่วนใหญ่จะมีทิศและขนาดใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 50) แต่ที่ pH 4.00 กระแสไฟฟ้าไอออนส่วนใหญ่จะมีทิศเข้าสู่รากและมีขนาดมากกว่าที่ pH อื่นๆ เมื่อทดสอบผลทางสถิติสามารถกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ว่าที่ pH 4.00 (ตาราง 16 และภาพประกอบ 51) กระแสไฟฟ้าไอออนจะเข้าสู่รากเด่นชัดกว่าที่ pH 6.00 และ 8.00 ในขณะที่ pH 6.00 และ 8.00 จะมีทิศของกระแสไฟฟ้าออกจากรากเด่นชัดกว่า



ภาพประกอบ 50 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนของทั้ง 3 pH (ตาราง 17) สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนที่ pH 4.00 มากกว่าที่ pH 6.00 (5 จาก 7 ราก - ตาราง 17a) และ pH 8.00 (7 จาก 7 ราก - ตาราง 17b) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.10$) ส่วนที่ pH 6.00 และ 8.00 มีแนวโน้มว่ากระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 มากกว่าที่ pH 8.00 (3 จาก 7 ราก - ตาราง 17c) แต่ไม่ชัดเจนเท่าใน pH 4.00 โดยสรุปแล้วขนาดของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่ pH น้อยและจะลดลง เมื่อ pH เพิ่มขึ้น

ตาราง 16 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะ pH 4.00 6.00 และ 8.00 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

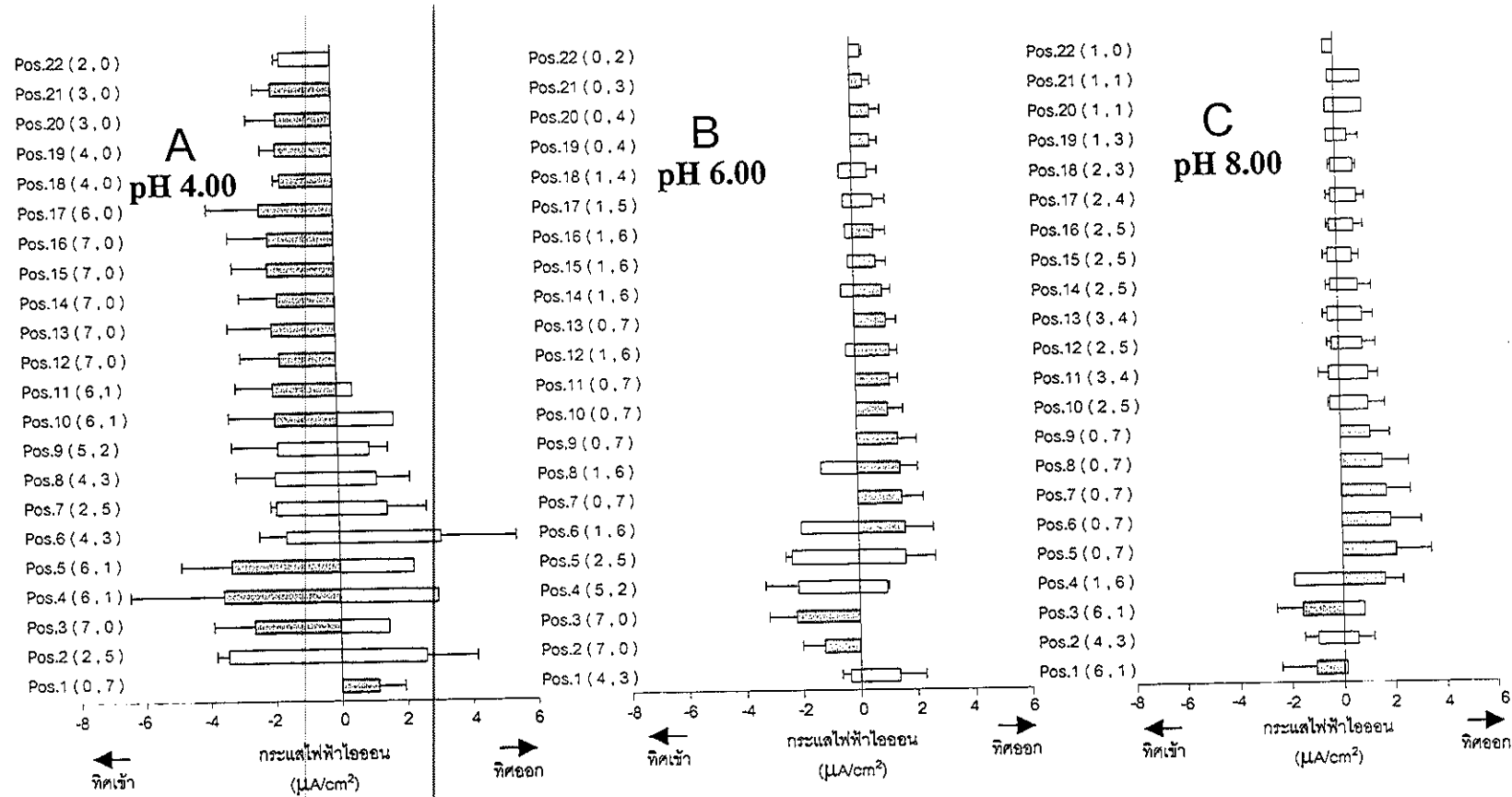
ตำแหน่งที่	ตำแหน่งจากปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาวะ pH = 4.00				สภาวะ pH = 6.00				สภาวะ pH = 8.00			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	N	M	1.13 ^a	0.8	0.35	0.29	1.37	0.91	1.06 ^a	1.32	0.12	M
2	0.5	3.44	0.38	2.59	1.55	1.25 ^b	0.76	N	M	0.99	0.51	0.56	0.63
3	1	2.64 ^a	1.25	1.46	M	2.2 ^b	0.96	N	M	1.56 ^a	0.99	0.81	M
4	1.5	3.67 ^a	2.87	2.99	M	2.14	1.14	0.97	0.06	1.87	M	1.65	0.7
5	2	3.32 ^a	1.64	2.24	M	2.35	0.21	1.64	1.03	M	M	2.1 ^b	1.37
6	2.5	1.62	0.81	3.07	2.32	2	M	1.63 ^c	0.99	N	M	1.9	1.19
7	3	1.91	0.16	1.47	1.19	N	M	1.64 ^b	0.75	N	M	1.75 ^b	0.94
8	3.5	1.94	1.19	1.14	1.03	1.27	M	1.5 ^b	0.61	N	M	1.61 ^b	1.03
9	4	1.84	1.4	0.96	0.57	N	M	1.44 ^b	0.65	N	M	1.16 ^b	0.77
10	4.5	1.91 ^a	1.42	1.71	M	N	M	1.09 ^b	0.55	0.38	0.06	1.1	0.66
11	5	1.96 ^a	1.14	0.47	M	N	M	1.2 ^b	0.28	0.39	0.39	1.13	0.38
12	5.5	1.73 ^b	1.19	N	M	0.31	M	1.21 ^b	0.27	0.25	0.2	0.93	0.5
13	6	1.94 ^b	1.35	N	M	0	M	1.11 ^b	0.34	0.39	0.19	0.93	0.43
14	6.5	1.77 ^b	1.17	N	M	0.45	M	0.99 ^b	0.3	0.26	0.19	0.79	0.51
15	7	2.06 ^b	1.07	N	M	0.18	M	0.79 ^b	0.36	0.36	0.17	0.6	0.25
16	7.5	2.03 ^b	1.22	N	M	0.26	M	0.74 ^b	0.41	0.25	0.13	0.67	0.36
17	8	2.28 ^b	1.61	N	M	0.3	M	0.73	0.41	0.19	0.18	0.81	0.3
18	8.5	1.61 ^b	0.19	N	M	0.45	M	0.54	0.36	0.16	0.11	0.68	0.11
19	9	1.74 ^b	0.47	N	M	N	M	0.65 ^b	0.27	0.31	M	0.48	0.41
20	9.5	1.7 ^b	0.91	N	M	N	M	0.66 ^b	0.45	0.34	M	1.09	M
21	10	1.87 ^b	0.53	N	M	N	M	0.46 ^b	0.24	0.22	M	1.03	M
22	10.5	1.56	0.17	N	M	N	M	0.39	0.07	0.37	M	N	M

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 51 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW pH 4.00 6.00 และ 8.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรงแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

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

ตาราง 17 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 4.00 และ 8.00 เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) pH 4.00 และ 6.00 b) pH 4.00 และ 8.00 และ c) pH 6.00 และ 8.00

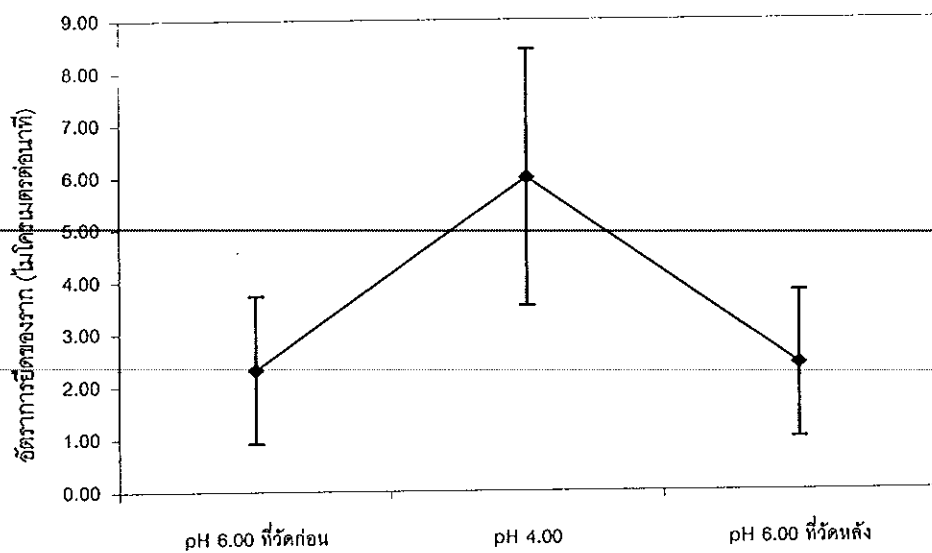
รากที่	df	a) pH 4.00-pH 6.00		b) pH 4.00-pH 8.00		c) pH 6.00-pH 8.00	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	20	3.558	pH 4.00>pH 6.00 (P<0.005)	2.342	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.025)	-3.041	pH 6.00<pH 8.00 (P<0.005)
2	18	4.62	pH 4.00>pH 6.00 (P<0.005)	3.226	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.005)	-0.759	ไม่มีความแตกต่าง
3	15	0.0429	ไม่มีความแตกต่าง	4.796	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.005)	4.35	pH 6.00>pH 8.00 (P<0.005)
4	21	-0.0356	ไม่มีความแตกต่าง	6.336	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.005)	6.091	pH 6.00>pH 8.00 (P<0.005)
5	18	4.43	pH 4.00>pH 6.00 (P<0.005)	3.846	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.005)	-0.04	ไม่มีความแตกต่าง
6	16	1.471	pH 4.00>pH 6.00 (P<0.10)	5.695	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.005)	3.704	pH 6.00>pH 8.00 (P<0.005)
7	16	5.318	pH 4.00>pH 6.00 (P<0.005)	2.9	pH 4.00>pH 8.00 (P<0.01)	-1.59	pH 6.00<pH 8.00 (P<0.1)

3.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กระแสไฟฟ้าและอัตรายืด

จากการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.00 มีขนาดมากกว่าที่ pH 6.00 และ 8.00 โดยที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 จะมีขนาดมากกว่าที่ pH 8.00 เช่นกัน จึงสรุปได้ว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH น้อยลง (มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น) ซึ่งมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น แสดงว่าไฮโดรเจนไอออนน่าจะเป็นไอออนหลักของการเกิดกระแสไฟฟ้านี้ เนื่องจากเมื่อปริมาณของไฮโดรเจนไอออนใน APW เพิ่มขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตรายืดของรากที่ pH 4.00 มากกว่าที่ pH 6.00 ทั้งก่อน ($df = 6, t = 6.246$) และหลังการวัดที่ pH 4.00 ($df = 6, t = -3.834$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.005$) (ตาราง 18 และภาพประกอบ 52) และอัตรายืดของที่ pH 6.00 มากกว่าที่ pH 8.00 ก่อน ($df = 6, t = -2.792$) และหลังการวัดที่ pH 4.00 ($df = 6, t = 3.657$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.01$) เช่นกัน (ตาราง 19 และภาพประกอบ 53) นอกจากนี้ยังพบอีกว่ารากทานตะวันที่อยู่ในสารละลาย APW pH 4.00 มีอัตรายืดมากกว่ารากที่อยู่ในสารละลาย APW pH 6.00 ($df = 2, t = -2.268$) และ 8.00 ($df = 2, t = -2.243$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.10$) (ตาราง 20 และภาพประกอบ 54) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 4.00 6.00 และ 8.00 จึงสรุปได้ว่าอัตรายืดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากไฮโดรเจนไอออน ความสัมพันธ์ดังกล่าวเหมือนกับผลการทดลองในรากข้าวโพด (Miller, 1989) และรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) ซึ่งพบว่าเมื่อ pH ของสารละลายภายนอกเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนลดลงและเมื่อลดค่า pH ขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนจะเพิ่มขึ้นและการยืดตัวของรากจะมากกว่าที่สภาวะปกติ กลไกของ pH ต่ออัตรายืดของรากยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่คาดว่าอาจจะเป็นไปตามทฤษฎี acid growth (Cosgrove, 2000) ที่คาดว่าในผนังเซลล์ (cell wall) มีโปรตีน expansin ที่เกี่ยวข้องกับการขยายตัวของผนังเซลล์ (cell wall) (Cosgrove, 2000) โดยโปรตีนนี้จะทำหน้าที่ได้ดีที่ pH ที่เป็นกรดจึงทำให้เซลล์ขยายและเจริญเติบโตได้มากขึ้น

ตาราง 18 อัตรายี้ดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 และ 6.00

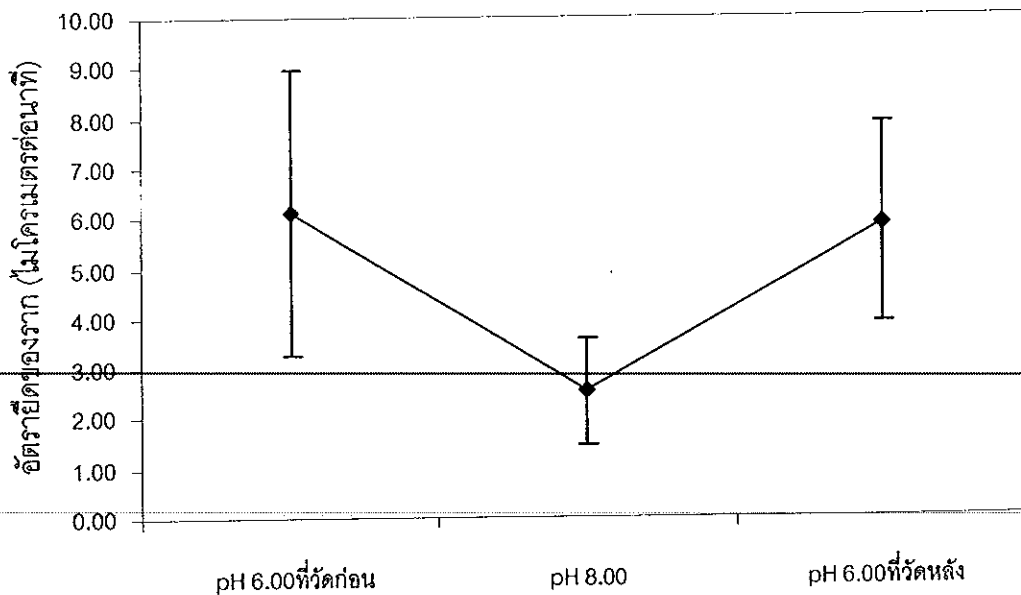
รากที่ทำการทดลอง	ความยาวรากหลัง การทดลอง (cm)	อัตรายี้ดของรากทานตะวัน (ไมโครเมตรต่อนาทีก)		
		pH 6.00 ที่วัดก่อน	pH 4.00	pH 6.00 ที่วัดหลัง
1	1.0	1.67	4.17	1.39
2	1.3	1.52	7.50	1.67
3	1.3	2.78	9.00	1.09
4	1.4	2.78	3.75	1.92
5	1.1	1.92	6.94	2.50
6	1.3	2.78	6.58	1.79
7	1.3	5.88	9.72	5.00
8	1.3	1.39	6.25	4.69
9	1.3	1.25	2.50	1.19
10	1.3	1.25	3.33	2.78
ค่าเฉลี่ย	1.26 ± 0.12	2.32 ± 1.40	5.97 ± 2.45	2.40 ± 1.39



ภาพประกอบ 52 อัตรายี้ดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 4.00

ตาราง 19 อัตรายี้ดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 8.00

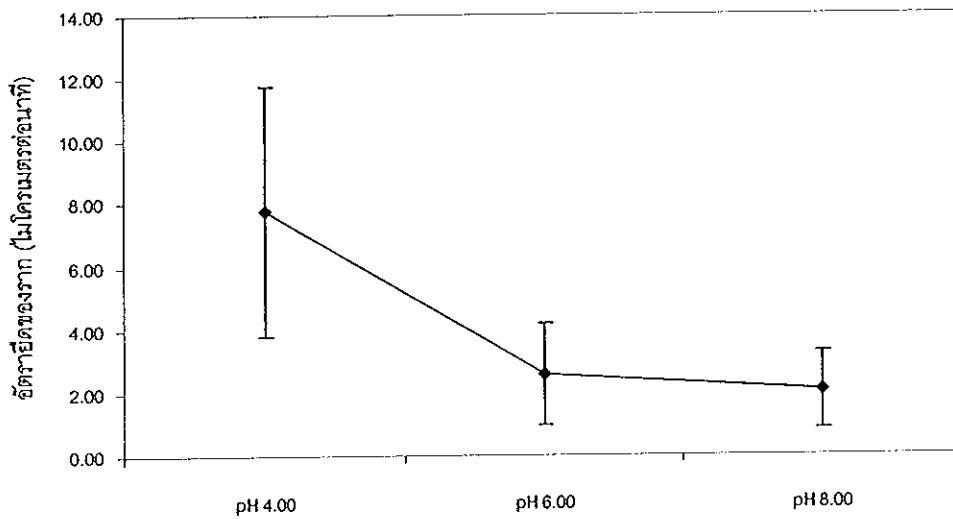
รากที่ทำกรทดลอง	ความยาวราก หลังการทดลอง (cm)	อัตรายี้ดของรากทานตะวัน (ไมโครเมตรต่อนาท)		
		pH 6.00 ที่วัดก่อน	pH 8.00	pH 6.00 ที่วัดหลัง
1	1.4	3.37	2.52	2.08
2	1.1	4.17	1.92	6.67
3	1.5	6.30	3.37	7.57
4	1.5	6.67	1.67	5.05
5	1.4	11.25	2.37	7.13
6	1.3	7.70	1.30	7.57
7	1.3	3.33	4.45	5.00
ค่าเฉลี่ย	1.36 ± 0.14	6.11 ± 2.84	2.51 ± 1.08	5.87 ± 1.99



ภาพประกอบ 53 อัตรายี้ดของรากทานตะวันที่ pH 6.00 และ 8.00

ตาราง 20 อัตรายึดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00

รากที่ทำการทดลอง	ความยาวราก หลังการทดลอง (cm)	อัตรายึดของรากทานตะวัน (ไมโครเมตรต่อนาที)		
		pH 4.00	pH 6.00	pH 8.00
1	1.3	8.83	4.45	3.33
2	1.3	3.33	1.67	1.92
3	1.3	11.1	1.67	0.88
ค่าเฉลี่ย	1.3 ± 0.00	7.75 ± 4.00	2.60 ± 1.61	2.04 ± 1.23



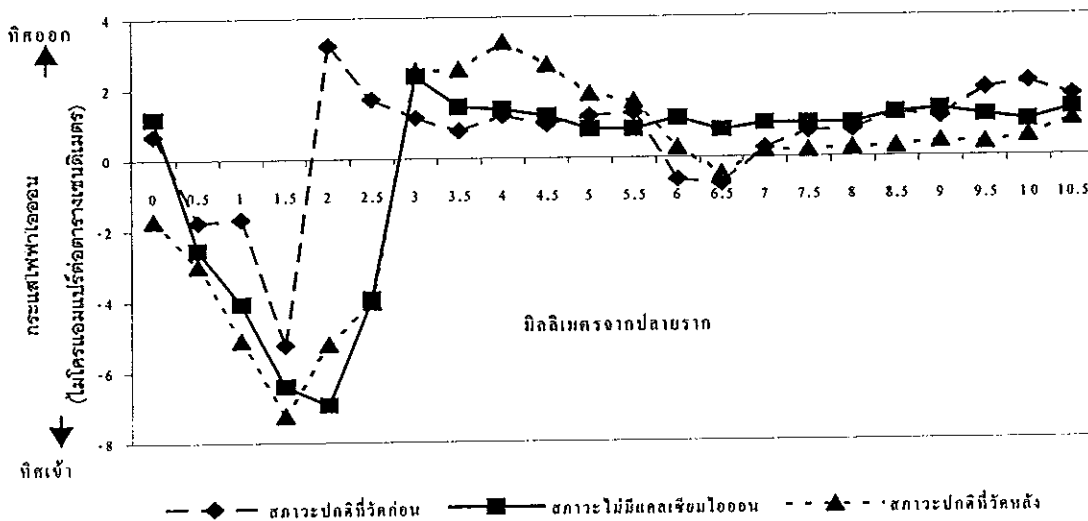
ภาพประกอบ 54 อัตรายึดของรากทานตะวันที่ pH 4.00 , 6.00 และ 8.00

3.4 ผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

การทดลองนี้ต้องการศึกษาว่าไอออนในสารละลาย APW มีผลต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนอย่างไร โดยวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่มีไอออนที่ต้องการศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของไอออนของแคลเซียม โพแทสเซียม โซเดียม และคลอไรด์ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

3.4.1 ผลของแคลเซียมไอออน

การวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติและสภาวะที่ไม่มีแคลเซียมไอออน จำนวน 16 ราก พบว่าขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไม่แตกต่างกันมากนัก (ภาพประกอบ 55)



ภาพประกอบ 55 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีแคลเซียมไอออน

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีทางสถิติไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัด เนื่องจากพบว่าเมื่อเปลี่ยนจาก APW ปกติเป็น APW ที่ไม่มีแคลเซียม ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ 5 ราก เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ 7 ราก และมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญอีก 4 ราก (ตาราง 21a) เมื่อพิจารณาเพียงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่รากด้วยขนาดสูงสุด (peak inward current) ในบริเวณปลายราก พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าสภาวะปกติที่วัดก่อนและหลังมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับสภาวะไม่มีแคลเซียม (df = 12 และ t = -0.047 , 0.615 ตามลำดับ) ผลดังกล่าวแตกต่างจากที่พบในรากของ *Lepidium* (Iwabuchi et

al., 1989) ซึ่งพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนจะลดลงเมื่อไม่มีแคลเซียมไอออนในสารละลาย อย่างไรก็ตามก็ตามผลการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนในรากข้าวโพด (Miller, 1989) กลับพบว่ากระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่สูงสุดเฉลี่ย (average peak current) ที่สภาวะไม่มีแคลเซียมไอออนมีขนาดมากกว่าที่สภาวะปกติประมาณ 15 % ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่ารากพืชแต่ละชนิดมีชนิดของไอออนที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าต่างกัน อีกประการหนึ่งในงานวิจัยในรากข้าวโพดนี้ Miller (1989) นำเอาค่ากระแสไฟฟ้าเข้าสู่สูงสุดของทุกรากเมื่อมีและไม่มีแคลเซียมไอออนมาหาค่าเฉลี่ยหลังจากนั้นจึงนำมาหาค่าผลต่าง แต่ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีและไม่มีแคลเซียมไอออนของแต่ละราก โดยให้การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม กรณีข้อมูลแบบจับคู่ ซึ่งน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า ซึ่งอาจจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งทำให้ผลการทดลองต่างไปจากของ Miller (1989) ส่วนทิศของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของรากที่อยู่ใน APW ปกติและใน APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน (ตาราง 22 และ ภาพประกอบ 56)

ตาราง 21 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่แคลเซียมไอออน
เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) สภาวะไม่มีแคลเซียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดก่อน b)
สภาวะไม่มีแคลเซียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดหลัง และ c) สภาวะปกติที่วัดหลังและสภาวะปกติที่
วัดก่อน

รอกที่	df	a) ไม่มี Ca^{2+} -APW ปกติที่วัดก่อน		b) ไม่มี Ca^{2+} -APW ปกติที่วัดหลัง		c) APWปกติที่วัดหลัง-APWปกติที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	T	ผลการทดสอบ
1	15	-3.135	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.005)	-1.644	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.10)	-2.927	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.01)
2	21	2.299	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.025)	-0.159	ไม่มีความแตกต่าง	1.941	APWปกติหลัง>APW ปกติก่อน (P<0.05)
3	17	1.993	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.05)	3.294	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	-1.867	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.05)
4	21	3.687	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	4.785	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	-0.668	ไม่มีความแตกต่าง
5	16	-0.152	ไม่มีความแตกต่าง	2.388	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.025)	-2.587	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.01)
6	19	0.759	ไม่มีความแตกต่าง	4.458	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	-1.322	ไม่มีความแตกต่าง
7	18	-2.540	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.01)	-1.629	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.10)	-1.099	ไม่มีความแตกต่าง
8	16	-3.626	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.005)	-0.673	ไม่มีความแตกต่าง	-4.713	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.005)
9	21	-2.687	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.01)	0.775	ไม่มีความแตกต่าง	-5.055	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.005)
10	16	0.499	ไม่มีความแตกต่าง	1.408	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.10)	-0.184	ไม่มีความแตกต่าง
11	21	1.888	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.05)	4.064	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	-1.787	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.05)
12	20	-2.027	ไม่มี Ca^{2+} <APW ปกติ (P<0.05)	4.066	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	-4.134	APWปกติหลัง<APW ปกติก่อน (P<0.005)
13	18	4.666	ไม่มี Ca^{2+} >APW ปกติ (P<0.005)	0.690	ไม่มีความแตกต่าง	3.862	APWปกติหลัง>APW ปกติก่อน (P<0.005)

ตาราง 21 (ต่อ)

รากที่	df	a) ไม่มี Ca^{2+} -APW ปกติที่วัดก่อน		b) ไม่มี Ca^{2+} -APW ปกติที่วัดหลัง		c) APWปกติที่วัดหลัง-APWปกติที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	T	ผลการทดสอบ
14	18	2.384	ไม่มี Ca^{2+} > APW ปกติ ($P < 0.025$)	1.969	ไม่มี Ca^{2+} > APW ปกติ ($P < 0.05$)	-1.867	APWปกติหลัง < APWปกติก่อน ($P < 0.05$)
15	21	3.178	ไม่มี Ca^{2+} > APW ปกติ ($P < 0.005$)	0.262	ไม่มีความแตกต่าง	-6.130	APWปกติหลัง < APWปกติก่อน ($P < 0.005$)
16	21	-1.200	ไม่มีความแตกต่าง	-1.552	ไม่มี Ca^{2+} < APW ปกติ ($P < 0.10$)	-0.539	ไม่มีความแตกต่าง


ตาราง 22 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทันทะวันที่สภาวะปกติและที่สภาวะไม่มีแคลเซียมไอออน โดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

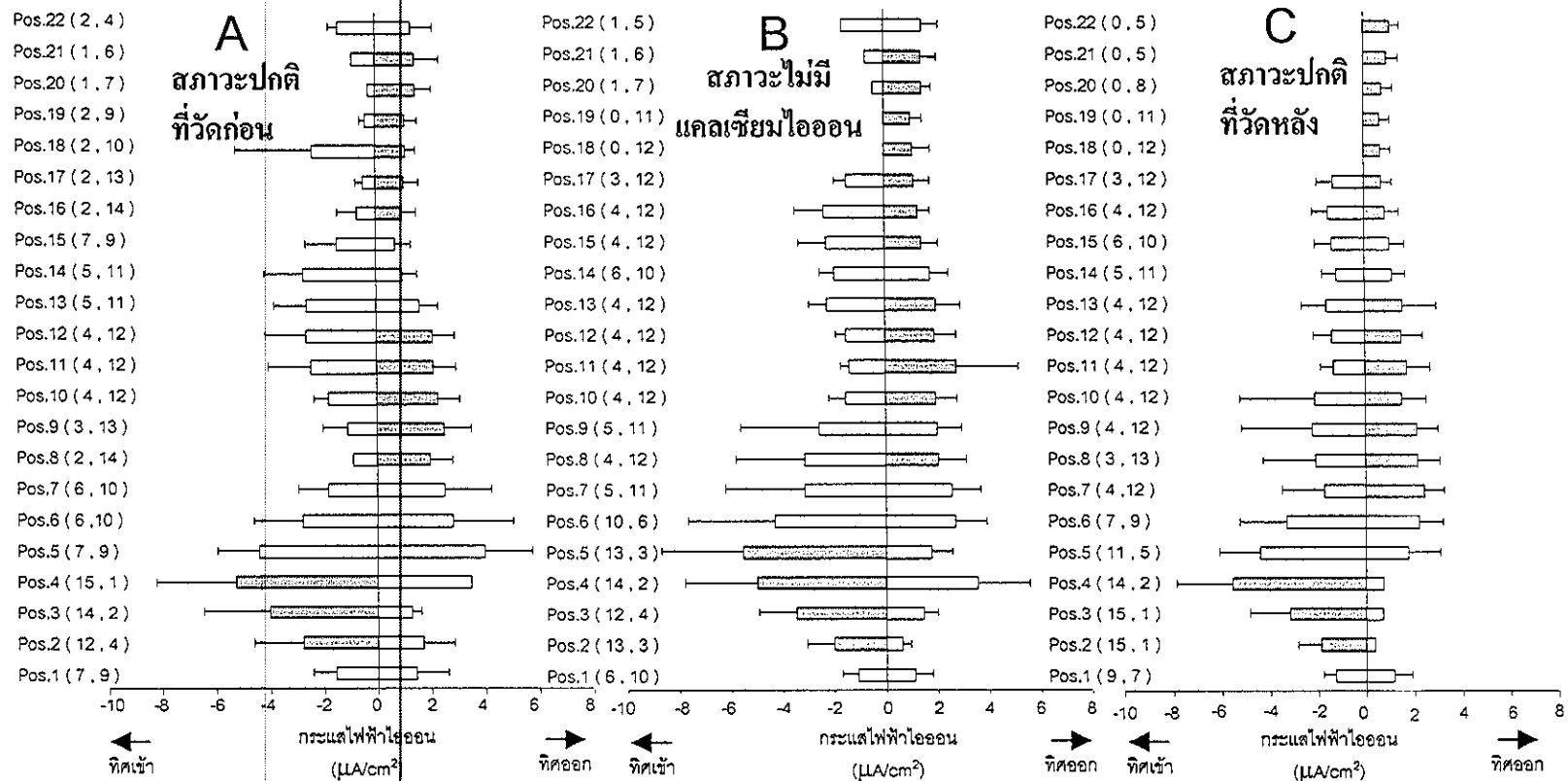
ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง จาก ปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาวะปกติที่วัดก่อน				สภาวะไม่มีแคลเซียมไอออน				สภาวะปกติที่วัดหลัง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.56	0.86	1.44	1.19	1.10	0.58	1.11	0.69	1.26	0.51	1.16	0.73
2	0.5	2.78 ^a	1.81	1.69	1.17	2.01 ^b	1.04	0.64	0.31	1.90 ^b	0.94	0.36	M
3	1	4.02 ^b	2.44	1.27	0.35	3.48 ^b	1.42	1.46	0.54	3.17 ^b	1.68	0.70	M
4	1.5	5.28 ^b	2.94	3.48	M	4.99 ^b	2.80	3.53	2.04	5.57 ^b	2.29	0.73	0.01
5	2	4.41	1.54	4.00	1.76	5.64 ^b	3.16	1.77	0.81	4.40	1.69	1.76	1.31
6	2.5	2.79	1.81	2.80	2.27	4.30	3.36	2.69	1.21	3.28	1.97	2.22	0.98
7	3	1.84	1.11	2.51	1.73	3.12	3.08	2.54	1.14	1.72	1.78	2.43	0.82
8	3.5	0.89	0.02	1.97 ^b	0.83	3.13	2.64	2.04 ^b	1.07	2.09	2.17	2.17 ^b	0.91
9	4	1.08	0.93	2.50 ^b	1.00	2.57	3.03	2.01	0.93	2.20	2.95	2.11 ^b	0.81
10	4.5	1.81	0.54	2.28 ^b	0.81	1.53	0.64	1.95 ^b	0.84	2.10	3.13	1.51 ^b	1.01
11	5	2.45	1.58	2.10 ^b	0.84	1.38	0.33	2.75 ^c	2.41	1.30	0.55	1.73 ^b	0.95
12	5.5	2.63	1.49	2.08 ^b	0.81	1.50	0.40	1.90 ^b	0.85	1.38	0.76	1.50 ^b	0.89
13	6	2.59	1.22	1.60	0.69	2.24	0.68	1.98 ^b	0.94	1.61	1.03	1.56 ^b	1.39
14	6.5	2.72	1.43	0.96	0.55	1.95	0.57	1.75	0.71	1.17	0.60	1.12	0.56
15	7	1.46	1.16	0.72	0.58	2.26	1.04	1.44 ^b	0.84	1.36	0.69	1.02	0.64
16	7.5	0.71	0.73	0.97 ^b	0.53	2.33	1.11	1.28 ^b	0.47	1.51	0.64	0.86 ^b	0.69
17	8	0.46	0.28	1.03 ^b	0.58	1.45	0.47	1.14 ^b	0.60	1.29	0.68	0.72 ^b	0.43
18	8.5	2.37	2.83	1.11 ^b	0.38	N	M	1.11 ^b	0.68	N	M	0.68 ^b	0.42
19	9	0.37	0.21	1.09 ^b	0.45	N	M	1.05 ^b	0.42	N	M	0.66 ^b	0.42
20	9.5	0.27	M	1.49 ^b	0.60	0.41	M	1.47 ^b	0.38	N	M	0.75 ^b	0.44
21	10	0.86	M	1.46 ^b	0.91	0.70	M	1.44 ^b	0.60	N	M	0.96 ^b	0.49
22	10.5	1.40	0.34	1.33	0.80	1.59	M	1.48 ^b	0.64	N	M	1.07 ^b	0.42

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

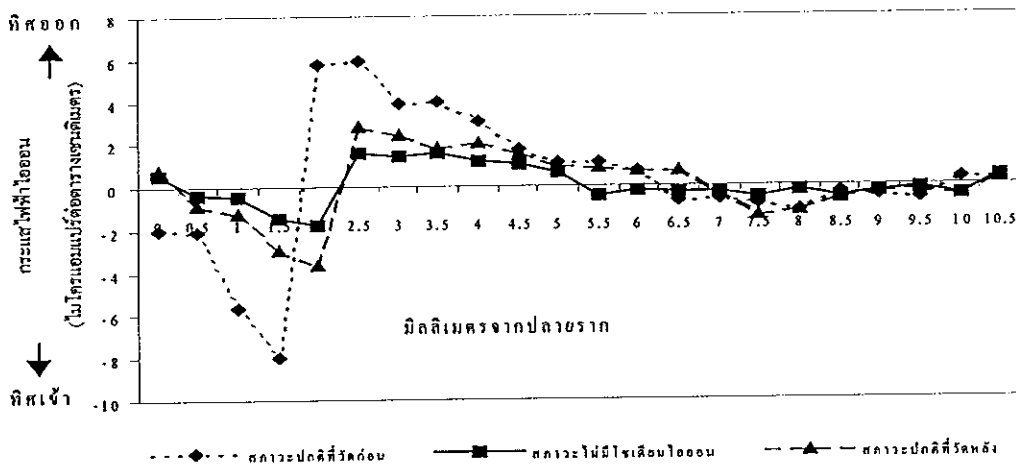


ภาพประกอบ 56 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีแคลเซียมไอออน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

- (A) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดก่อน
- (B) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ที่ไม่มีแคลเซียมไอออน
- (C) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดหลัง

3.4.2 ผลของไซเตียมไอออน

ในรอกทานตะวันจำนวน 11 รอก กระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกที่สภาวะปกติและเมื่อไม่มีไซเตียมไอออนมีขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าดังตัวอย่างในภาพประกอบ 57 ซึ่งจะเห็นว่าทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ขนาดของกระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีไซเตียมไอออนจะน้อยกว่าใน APW ปกติ



ภาพประกอบ 57 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรอกทานตะวันที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีไซเตียมไอออน

เมื่อทดสอบขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนทางสถิติ พบว่าเมื่อไม่มีไซเตียมไอออนขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออนจะน้อยกว่าที่สภาวะปกติ 6 รอก และมีขนาดมากกว่า 2 รอกและไม่มี ความแตกต่าง 3 รอก (ตาราง 23a) นั่นคือเมื่อไม่มีไซเตียมไอออนขนาดของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปลี่ยนสารละลายกลับไปเป็น APW ปกติ จำนวนรอกที่มีความแตกต่างดังกล่าวจะลดลง กล่าวคือขนาดของกระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีไซเตียมไอออนจะน้อยกว่าที่สภาวะปกติ เพียง 4 จาก 7 รอก (ตาราง 23b) ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากการขาดไซเตียมไอออนมีผลในระยะยาวต่อกระแสไฟฟ้า เพราะขนาดของกระแสไฟฟ้าใน APW ปกติที่วัดรอบหลังจะน้อยกว่ารอบแรกอย่างเห็นได้ชัด (6 จาก 11 รอก - ตาราง 23c)

เมื่อพิจารณาเฉพาะกระแสไฟฟ้าไอออนที่มีขนาดสูงสุดที่เข้าสู่ปลายรอก โดย การทดสอบทางสถิติ พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($df = 10$ และ $t = -0.793, -0.603$)

ตาราง 23 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มีโซเดียมไอออน
เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) สภาวะไม่มีโซเดียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดก่อน b)
สภาวะไม่มีโซเดียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดหลัง และ c) สภาวะปกติที่วัดหลังและสภาวะปกติที่
วัดก่อน

รอกที่	df	a) ไม่มี Na ⁺ -APWปกติที่วัดก่อน		b) ไม่มี Na ⁺ -APWปกติที่วัดหลัง		c) APWปกติที่วัดหลัง-APWปกติที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	18	-2.287	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.025)	-1.134	ไม่มีความแตกต่าง	-1.703	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.10)
2	15	-2.378	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.025)	-0.928	ไม่มีความแตกต่าง	-2.139	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.025)
3	15	1.520	ไม่มี Na ⁺ >APWปกติ (P<0.10)	3.502	ไม่มี Na ⁺ >APWปกติ (P<0.005)	-0.320	ไม่มีความแตกต่าง
4	14	-2.974	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.01)	2.191	ไม่มี Na ⁺ >APWปกติ (P<0.025)	-5.650	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.005)
5	13	1.007	ไม่มีความแตกต่าง	0.500	ไม่มีความแตกต่าง	0.868	ไม่มีความแตกต่าง
6	15	4.488	ไม่มี Na ⁺ >APWปกติ (P<0.005)	-2.180	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.025)	4.628	APWปกติหลัง>APWปกติก่อน (P<0.005)
7	19	-1.921	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.05)	-3.945	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.005)	0.753	ไม่มีความแตกต่าง
8	17	-0.056	ไม่มีความแตกต่าง	2.279	ไม่มี Na ⁺ >APWปกติ (P<0.025)	-1.755	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.05)
9	21	-3.947	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.005)	4.967	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.005)	-3.190	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.005)
10	19	-0.137	ไม่มีความแตกต่าง	-0.225	ไม่มีความแตกต่าง	0.002	ไม่มีความแตกต่าง
11	17	-3.428	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.005)	-1.580	ไม่มี Na ⁺ <APWปกติ (P<0.10)	-2.718	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.01)


ตาราง 24 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทันทันที่สภาวะปกติและที่สภาวะไม่มีโซเดียมไอออนโดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

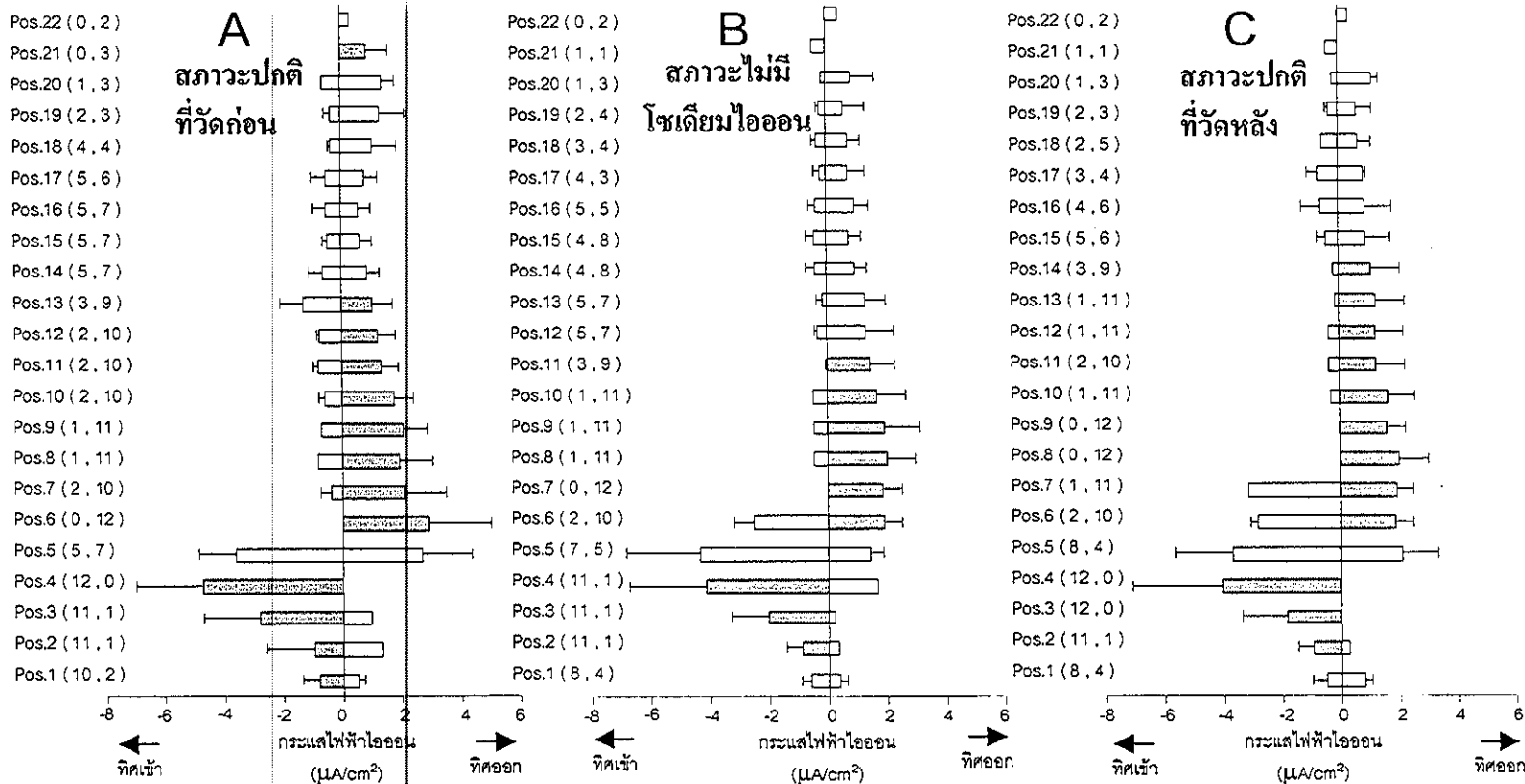
ตำแหน่งที่	ตำแหน่งจากปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu A/cm^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu A/cm^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu A/cm^2$)			
		สภาวะปกติที่วัดก่อน				สภาวะไม่มีโซเดียมไอออน				สภาวะปกติที่วัดหลัง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	0.83 ^a	0.54	0.49	0.21	0.59	0.32	0.39	0.25	0.51	0.46	0.79	0.26
2	0.5	0.98 ^a	1.63	1.30	M	0.89 ^a	0.51	0.34	M	0.94 ^a	0.55	0.27	M
3	1	2.8 ^a	1.92 ^a	0.96	M	2.07 ^b	1.23	0.22	M	1.83 ^b	1.53	N	M
4	1.5	4.74 ^a	2.24 ^a	N	M	4.10 ^b	2.61	1.68	M	4.02 ^b	3.07	N	M
5	2	3.61	1.25	2.66	1.70	4.31	2.52	1.46	0.43	3.67	1.96	2.08	1.19
6	2.5	N	M	2.92 ^a	2.09	2.48	0.68	1.90 ^a	0.63	2.82	0.24	1.86 ^a	0.59
7	3	0.36	0.36	2.10 ^a	1.40	N	M	1.86 ^a	0.67	3.12	M	1.89 ^a	0.55
8	3.5	0.83	M	1.96 ^a	1.09	0.45	M	2.02 ^b	0.95	N	M	1.99 ^a	1.00
9	4	0.71	M	2.09 ^a	0.79	0.45	M	1.92 ^b	1.20	N	M	1.57 ^a	0.63
10	4.5	0.57	0.20	1.75 ^a	0.65	0.46	M	1.67 ^b	0.99	0.33	M	1.60 ^b	0.90
11	5	0.79	0.17	1.35 ^a	0.59	0.02	0.07	1.45 ^a	0.82	0.39	0	1.23 ^a	0.96
12	5.5	0.75	0.10	1.24 ^a	0.59	0.31	0.10	1.32	0.96	0.39	M	1.20 ^b	0.96
13	6	1.30	0.74	1.05 ^a	0.65	0.14	0.19	1.28	0.71	0.16	M	1.22 ^b	0.97
14	6.5	0.62	0.47	0.86	0.45	0.39	0.28	0.94	0.43	0.22	0.03	1.06 ^b	0.96
15	7	0.46	0.17	0.64	0.42	0.41	0.27	0.77	0.40	0.46	0.29	0.87	0.82
16	7.5	0.50	0.44	0.58	0.43	0.37	0.22	0.95	0.48	0.64	0.66	0.85	0.89
17	8	0.51	0.46	0.77	0.49	0.19	0.20	0.74	0.57	0.72	0.35	0.80	0.09
18	8.5	0.35	0.06	1.07	0.82	0.31	0.17	0.73	0.43	0.59	M	0.63	0.45
19	9	0.36	0.19	1.32	0.88	0.23	0.08	0.59	0.71	0.36	0.09	0.58	0.52
20	9.5	0.62	M	1.41	0.40	0.13	M	0.85	0.79	0.23	M	1.11	0.21
21	10	N	M	0.85 ^a	0.76 ^a	0.44	M	N	M	0.44	M	N	M
22	10.5	N	M	0.33	M	N	M	0.41	M	N	M	0.31	M

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$

 แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 58 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกกรากตามระดับด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีโซเดียมไอออน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

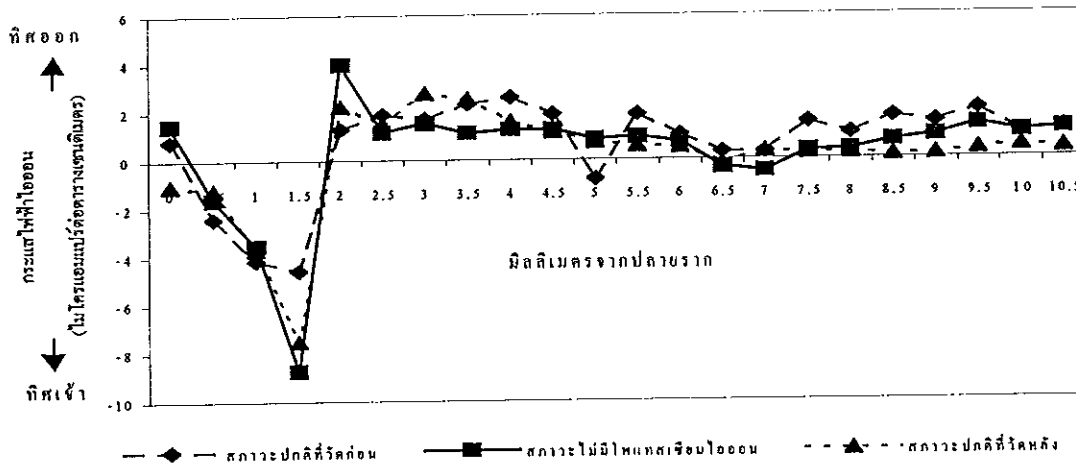
(A) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดก่อน

(B) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ที่ไม่มีโซเดียมไอออน

(C) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดหลัง

3.4.3 ผลของโพแทสเซียมไอออน

ในกรณีที่สารละลาย APW ไม่มีโพแทสเซียมไอออน รากส่วนใหญ่มีขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนใกล้เคียงกับเมื่อใช้สารละลาย APW ปกติ (ภาพประกอบ 59 ตาราง 25 และภาพประกอบ 60)



ภาพประกอบ 59 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับที่สภาวะที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน

เมื่อเปลี่ยนสารละลายจาก APW ปกติ เป็น APW ที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง (ตาราง 26a) โดยมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ใน 4 ราก มีกระแสไฟฟ้าลดลง 2 ราก ($P < 0.10$) และไม่มีความแตกต่าง 5 ราก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดของกระแสไฟฟ้าที่วัดใน APW ที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออนกับกระแสไฟฟ้าใน APW ปกติที่วัดภายหลัง พบว่าการเปลี่ยนแปลงมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเช่นกัน (ตาราง 26b) ในกรณีนี้คาดว่ากราดโพแทสเซียมไอออนในช่วงการทดลองไม่น่ามีผลกับรากเนื่องจากขนาดของกระแสไฟฟ้าที่วัดก่อนและหลังที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออนไม่มีความแตกต่างกัน (ตาราง 26c) เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกระแสไฟฟ้าไอออนที่มีขนาดสูงสุดที่เข้าสู่ปลายราก โดยการทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อไม่มีโพแทสเซียมไอออนขนาดของกระแสไฟฟ้ามากกว่าที่สภาวะปกติที่วัดก่อน ($t = 1.37, df = 10$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.10$) แต่เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่วัดหลังจากที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน พบว่าความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวแตกต่างจากผลการวัดกระแสไฟฟ้าในรากข้าวโพด (Miller, 1989) ที่พบว่ามีการไหลเข้าสูงสุดเฉลี่ยลดลงเมื่อไม่มี

โพแทสเซียมไอออน ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากวิธีวิเคราะห์ผลการทดลองที่แตกต่างกันดังที่กล่าวใน
3.4.1

ตาราง 25 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันทีสภาวะปกติและทีสภาวะไม่มีโพแทสเซียมไอออน
โดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50
มิลลิเมตร

ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง จาก ปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาวะปกติ				สภาวะไม่มีโพแทสเซียมไอออน				สภาวะปกติ			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	0.76	0.35	0.67	0.41	0.84	0.34	0.83	0.63	0.90 ^a	0.22	0.79	0.11
2	0.5	1.53 ^a	0.62	N	M	1.57 ^a	0.60	1.57	0.36	1.33 ^a	0.37	N	M
3	1	2.85 ^a	1.44	N	M	3.21 ^b	1.62	2.96	M	3.50 ^b	1.39	N	M
4	1.5	4.71 ^b	1.18	6.13	M	6.12 ^b	3.14	N	M	5.81 ^b	2.20 ^b	N	M
5	2	2.75	1.08	2.66	1.79	5.83	2.03	2.21 ^a	1.27	4.62 ^b	1.86	1.69	0.76
6	2.5	0.61	0.28	2.12	1.85	3.21	0.36	2.13 ^a	0.85	1.84	M	1.92 ^b	0.56
7	3	2.06	M	2.02 ^a	1.59	N	M	2.24 ^a	1.05	N	M	2.49 ^a	0.70
8	3.5	N	M	2.15 ^a	1.09	N	M	2.51 ^a	1.25	N	M	2.67 ^a	0.87
9	4	N	M	2.53 ^a	0.91	N	M	2.27 ^a	1.33	1.93	M	2.35 ^b	1.16
10	4.5	N	M	2.53 ^a	1.09	0.80	M	1.85 ^b	0.72	N	M	2.01 ^a	1.03
11	5	0.81	M	2.02 ^b	1.09	0.54	M	1.85 ^b	0.99	N	M	1.56 ^a	0.76
12	5.5	N	M	2.12 ^b	1.14	0.63	M	1.93 ^b	0.97	N	M	1.37 ^a	0.79
13	6	0.29	M	1.47 ^b	0.83	0.57	0.11	1.70 ^b	0.95	N	M	1.39 ^a	0.90
14	6.5	0.39	0.30	1.57 ^b	1.10	0.48	0.19	1.59 ^b	0.73	0.16	M	1.52 ^b	0.86
15	7	0.21	M	1.46 ^b	0.79	0.55	0.07	1.71 ^b	0.81	0.24	M	1.63 ^b	0.89
16	7.5	0.64	M	1.51 ^b	0.79	0.48	0.47	1.39 ^b	0.89	0.12	M	1.26 ^b	0.53
17	8	0.41	M	0.73 ^b	0.53	0.32	0.27	0.48	0.91	N	M	0.85 ^b	0.65
18	8.5	N	M	0.87 ^b	0.61	0.32	M	0.95	0.52	N	M	0.60 ^b	0.36
19	9	N	M	0.92 ^b	0.56	0.48	M	0.93	0.44	N	M	0.68 ^b	0.39
20	9.5	N	M	1.08 ^b	0.76	N	M	1.13 ^b	0.49	N	M	0.62 ^b	0.53
21	10	N	M	1.38	0.47	N	M	1.25	0.12	N	M	0.61	0.16
22	10.5	1.05	M	1.21	M	N	M	1.44	0.38	N	M	0.51	0.15

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

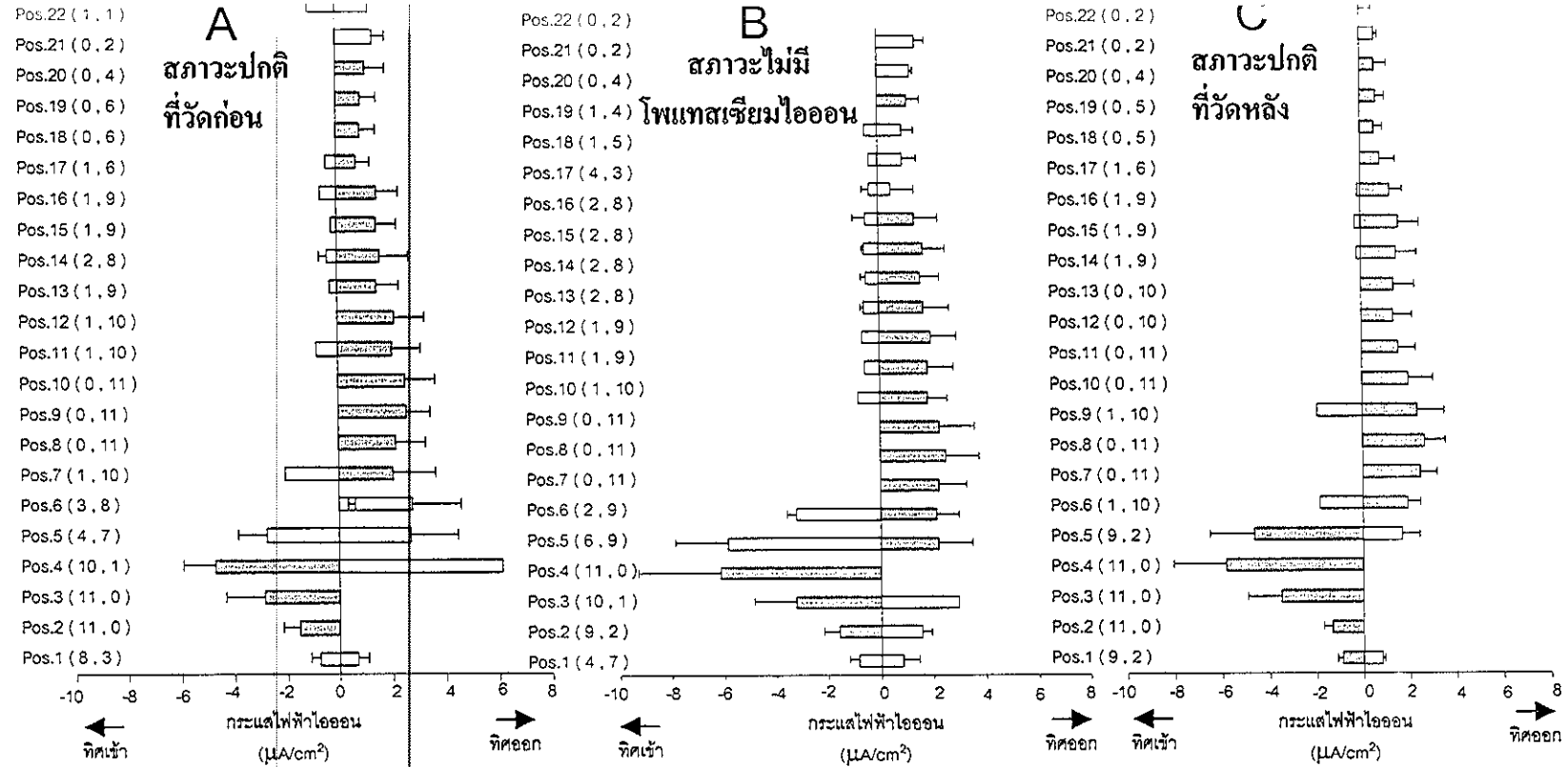
a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$



แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

ตาราง 26 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มีโพแทสเซียมไอออน
เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) สภาวะไม่มีโพแทสเซียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดก่อน b)
สภาวะไม่มีโพแทสเซียมไอออนและสภาวะปกติที่วัดหลัง และ c) สภาวะปกติที่วัดหลังและสภาวะ
ปกติที่วัดก่อน

รอกที่	df	a) ไม่มี K^+ -APWปกติที่วัดก่อน		b) ไม่มี K^+ -APWปกติที่วัดหลัง		c) APWปกติที่วัดหลัง-APWปกติที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	15	2.119	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.05$)	2.381	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.025$)	1.474	APWปกติหลัง>APWปกติก่อน ($P<0.10$)
2	21	-0.519	ไม่มีความแตกต่าง	1.592	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.10$)	-1.710	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน ($P<0.10$)
3	19	-1.332	ไม่มี K^+ <APWปกติ ($P<0.10$)	-2.064	ไม่มี K^+ <APWปกติ ($P<0.05$)	1.847	APWปกติหลัง>APWปกติก่อน ($P<0.05$)
4	19	-3.107	ไม่มี K^+ <APWปกติ ($P<0.005$)	0.802	ไม่มีความแตกต่าง	-3.195	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน ($P<0.005$)
5	15	2.598	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.025$)	2.440	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.025$)	1.143	ไม่มีความแตกต่าง
6	18	-0.736	ไม่มีความแตกต่าง	-3.587	ไม่มี K^+ <APWปกติ ($P<0.005$)	2.402	APWปกติหลัง>APWปกติก่อน ($P<0.025$)
7	16	1.935	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.05$)	-1.428	ไม่มี K^+ <APWปกติ ($P<0.10$)	4.056	APWปกติหลัง>APWปกติก่อน ($P<0.005$)
8	21	3.812	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.005$)	2.514	ไม่มี K^+ >APWปกติ ($P<0.025$)	1.207	ไม่มีความแตกต่าง
9	10	0.651	ไม่มีความแตกต่าง	0.628	ไม่มีความแตกต่าง	0.464	ไม่มีความแตกต่าง
10	15	-0.038	ไม่มีความแตกต่าง	0.167	ไม่มีความแตกต่าง	-0.110	ไม่มีความแตกต่าง
11	16	-1.284	ไม่มีความแตกต่าง	0.100	ไม่มีความแตกต่าง	-1.767	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน ($P<0.05$)

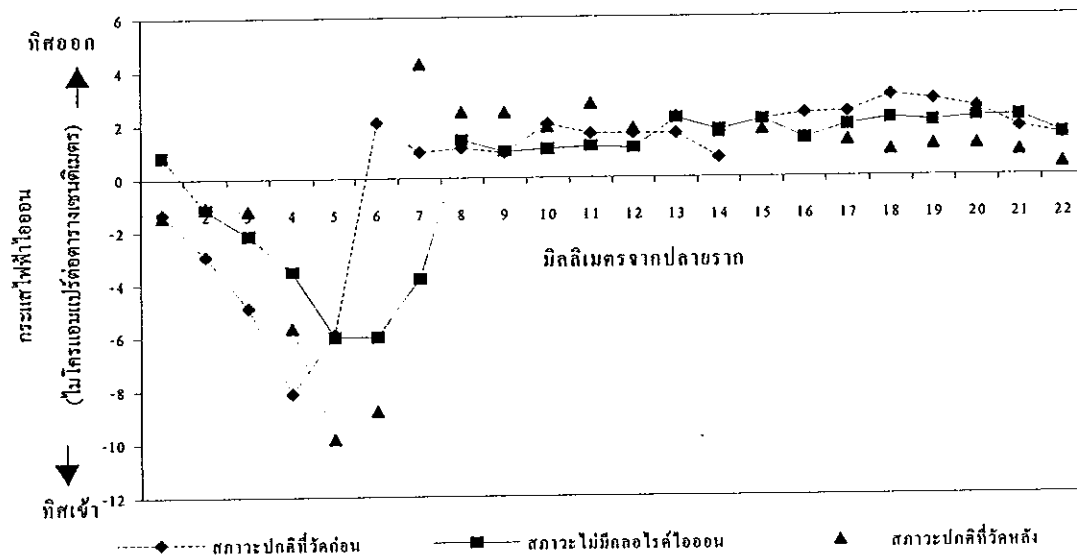


ภาพประกอบ 60 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย ($\pm\text{SD}$)ภายนอกกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดของรากวัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรงแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

- (A) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดก่อน
- (B) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ที่ไม่มีโพแทสเซียมไอออน
- (C) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดหลัง

3.4.4 ผลของคลอไรด์ไอออน

จากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันจำนวน 10 ราก ที่สภาวะปกติ และสภาวะที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน พบว่าในรากส่วนใหญ่มีขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน (ภาพประกอบ 61 ตาราง 27 และภาพประกอบ 62)



ภาพประกอบ 61 ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับสภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออน

เมื่อพิจารณาขนาดของกระแสไฟฟ้าโดยการทดสอบทางสถิติ พบว่าเมื่อไม่มีคลอไรด์ไอออนขนาดของกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าที่สภาวะปกติที่วัดก่อนและหลัง 7 และ 6 ราก (จาก 10 ราก) ตามลำดับ (ตาราง 28a และ b) ส่วนขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติก่อนและหลังการวัดมีขนาดใกล้เคียงกัน (ตาราง 28c) หากพิจารณาเฉพาะกระแสไฟฟ้าไอออนที่มีขนาดสูงสุดที่เข้าสู่ปลายราก พบว่าขนาดกระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีคลอไรด์ไอออนน้อยกว่าที่สภาวะปกติทั้งที่วัดก่อน ($t=-8.76, df=9$) และหลัง ($t=-7.38, df=9$) จากที่ไม่มีคลอไรด์ไอออนอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.005$) นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติที่วัดก่อนมีขนาดมากกว่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติที่วัดหลังจากเมื่อไม่มีคลอไรด์ไอออน ($t=2.16, df=9$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) แต่ผลดังกล่าวอาจจะไม่ใช่เนื่องจากการไม่มีคลอไรด์ไอออนในสารละลาย แต่อาจจะเนื่องจากจำนวนของโซเดียมและโพแทสเซียมไอออนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมสารละลายในการทดลองนี้ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แทนที่โซเดียมคลอไรด์และโพแทสเซียม

คลอไรด์ ในจำนวนโมลาร์ที่เท่ากัน ดังนั้นในสารละลายนี้จึงมีโซเดียมและโพแทสเซียมไอออนมากกว่าใน APW ปริมาณ 2 เท่า

ตาราง 27 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทันทวันทีสภาวะปกติและสภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออน โดยวัดด้านไกลตัวของผู้วัดเพียงด้านเดียววัดจากปลายรากถึงโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.50 มิลลิเมตร

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งจากปลายราก mm	กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				กระแสไฟฟ้าไอออน($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		สภาวะปกติที่วัดก่อน				สภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออน				สภาวะปกติที่วัดหลัง			
		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก		ทิศเข้าสู่ราก		ทิศออกจากราก	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0	1.17 ^a	0.81	1.44	0.60	1.34	0.17	0.87 ^a	0.59	0.91	0.50	1.32	0.89
2	0.5	2.87 ^a	1.51	N	M	1.15	0.58	2.63	2.27	1.31 ^a	0.73	N	M
3	1	4.64 ^a	1.48	N	M	2.03 ^a	1.06	N	M	2.93 ^a	2.34	N	M
4	1.5	7.27 ^a	2.28	N	M	3.00 ^a	1.12	N	M	4.49 ^a	1.43	N	M
5	2	4.32	0.90	4.48	1.94	2.91 ^a	1.87	N	M	5.30	3.11	2.07	0.51
6	2.5	1.79	0.28	3.43 ^a	3.08	3.54	2.69	1.31	0.73	7.24	3.23	2.00	0.80
7	3	4.70	1.76	1.78 ^a	1.06	1.96	1.46	1.46	0.64	N	M	2.61 ^a	1.42
8	3.5	N	M	2.61 ^a	1.27	0.84	0.08	1.56 ^b	0.87	N	M	1.87 ^a	1.44
9	4	0.45	0.26	2.81 ^a	1.08	0.56	M	1.25 ^b	0.60	N	M	1.87 ^a	0.98
10	4.5	N	M	2.12 ^a	0.96	0.44	M	1.40 ^b	0.56	N	M	1.70 ^a	0.77
11	5	N	M	1.67 ^a	1.10	0.55	M	1.26 ^b	0.51	0.87	M	1.71 ^a	0.62
12	5.5	N	M	1.68 ^a	1.15	0.56	M	1.15 ^b	0.43	0.48	M	1.45 ^b	0.62
13	6	0.17	M	1.66 ^b	0.94	1.23	M	1.11 ^b	0.64	0.73	M	1.48 ^b	0.83
14	6.5	0.38	0.27	1.17	0.59	0.53	0.54	1.06	0.66	0.96	M	1.17 ^b	0.69
15	7	0.60	0.03	1.23 ^c	0.60	0.48	0.44	1.16	0.67	1.07	M	1.05 ^b	0.57
16	7.5	0.45	0.05	1.44 ^c	0.57	0.71	0.31	1.25	0.67	N	M	0.87 ^b	0.52
17	8	0.67	0.59	1.54 ^c	0.70	0.78	0.55	1.41	0.75	1.00	M	0.84 ^b	0.53
18	8.5	0.54	0.17	1.55	0.99	0.81	0.61	1.13	0.92	1.03	M	0.69 ^b	0.29
19	9	N	M	1.43 ^c	0.94	0.46	0.42	1.25	0.92	N	M	0.87 ^b	0.25
20	9.5	N	M	1.62 ^c	0.87	0.46	0.21	1.75	1.21	N	M	0.85 ^b	0.23
21	10	0.88	M	1.16	0.68	0.34	0.07	1.79	1.31	N	M	0.65 ^b	0.51
22	10.5	N	M	1.44 ^c	1.17	0.32	M	1.45	1.04	N	M	0.86 ^b	0.84

N คือไม่มีค่ากระแสไฟฟ้าในทิศทางนี้

M คือไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 2 ค่า

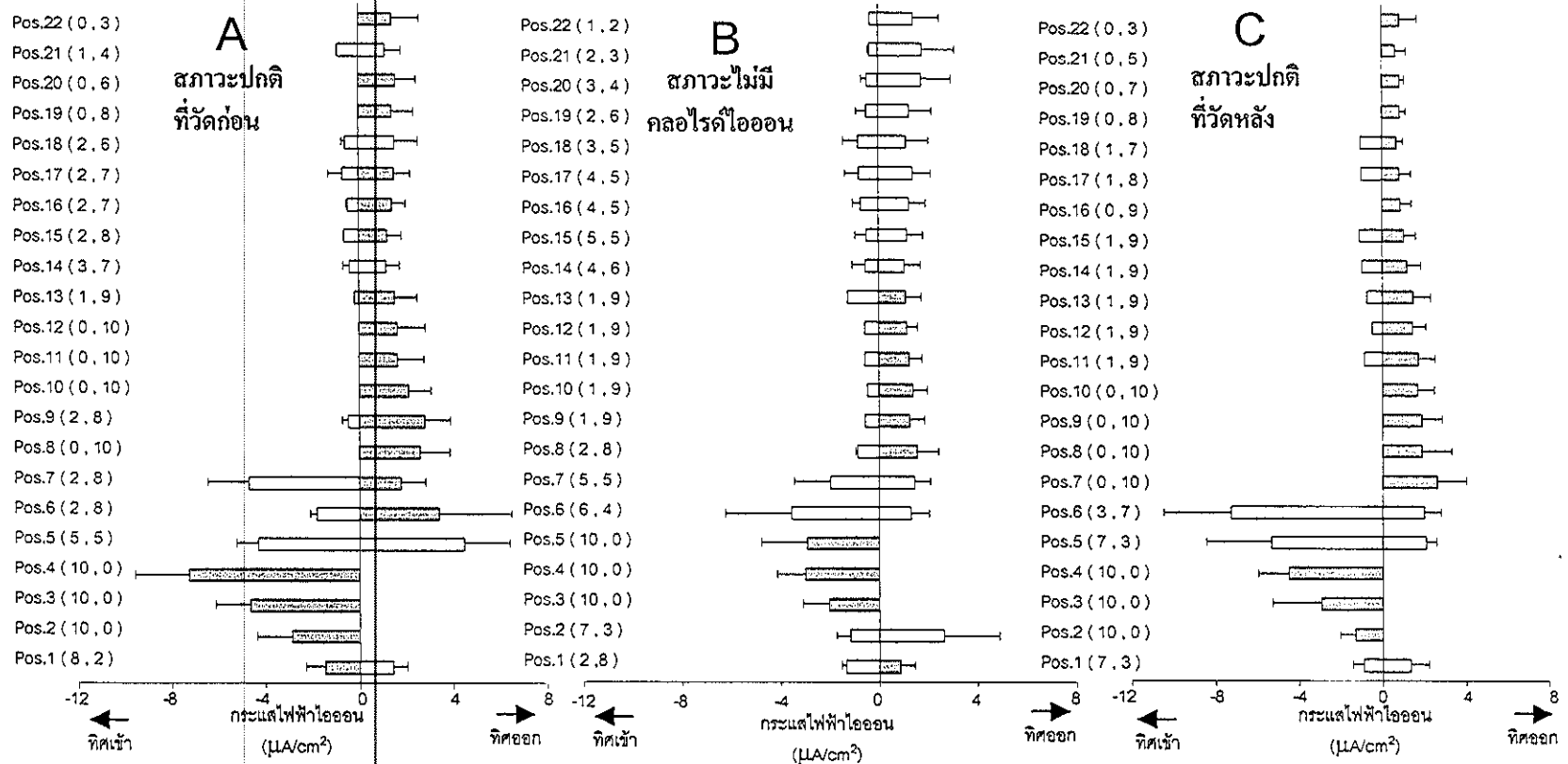
a คือ $P < 0.001$ b คือ $P < 0.01$ และ c คือ $P < 0.05$



แสดงทิศของกระแสไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญ

ตาราง 28 ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติและสภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออน
เปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ a) สภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออนและสภาวะปกติที่วัดก่อน b)
สภาวะไม่มีคลอไรด์ไอออนและสภาวะปกติที่วัดหลัง และ c) สภาวะปกติที่วัดหลังและสภาวะปกติที่
วัดก่อน

รอกที่	df	a)ไม่มี Cl ⁻ APWปกติที่วัดก่อน		b)ไม่มี Cl ⁻ APWปกติที่วัดหลัง		c)APWปกติที่วัดหลัง-APWปกติที่วัดก่อน	
		t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ	t	ผลการทดสอบ
1	18	-3.347	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-3.125	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-2.484	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.025)
2	19	-3.389	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-1.826	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.05)	-2.244	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.025)
3	16	-2.244	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.025)	-0.890	ไม่มีความแตกต่าง	-0.578	ไม่มีความแตกต่าง
4	20	-3.181	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-1.903	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.05)	-3.003	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.005)
5	21	-2.415	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.025)	-2.053	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.05)	-1.409	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.10)
6	19	-5.246	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-0.078	ไม่มีความแตกต่าง	-6.218	APWปกติหลัง<APWปกติก่อน (P<0.005)
7	21	-0.718	ไม่มีความแตกต่าง	-1.214	ไม่มีความแตกต่าง	0.200	ไม่มีความแตกต่าง
8	21	-0.660	ไม่มีความแตกต่าง	-2.080	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.025)	0.840	ไม่มีความแตกต่าง
9	18	-4.682	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.005)	-2.724	ไม่มี Cl ⁻ <APWปกติ (P<0.01)	-0.967	ไม่มีความแตกต่าง
10	14	-0.636	ไม่มีความแตกต่าง	-0.570	ไม่มีความแตกต่าง	-0.185	ไม่มีความแตกต่าง



ภาพประกอบ 62 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (\pm SD) ภายนอกรากทวนตะวันด้านไกลตัวผู้วัดของรากวัดใน APW ปกติ และที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายถึงโคนราก ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออน จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และตัวเลขแรกในวงเล็บแสดงจำนวนของรากที่มีทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนเข้าสู่ราก ส่วนตัวเลขที่สองแสดงจำนวนรากที่มีทิศออกจากราก

- (A) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดก่อน
- (B) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ที่ไม่มีคลอไรด์ไอออน
- (C) ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนวัดใน APW ปกติที่วัดหลัง

บทที่ 4

บทสรุป

งานวิจัยนี้วัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวันที่ถูกวางไว้ในแนวระดับโดยใช้ระบบไวเบรติงโพรบ ซึ่งเป็นระบบที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยระดับนาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรได้ (Jaffe and Nuccitelli, 1974) โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน เริ่มจากการวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ (pH 6.00) หลังจากนั้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่ pH ต่างๆ (pH 4.00 , 6.00 และ 8.00) และในที่สุดท้ายศึกษาผลของไอออนต่างๆ (แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียมและคลอไรด์) ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน

การศึกษาระแสไฟฟ้าไอออนเมื่อรากทานตะวันอยู่ในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติใช้รากทานตะวัน 2 ชุด ชุดแรกเป็นรากที่มีความยาวอยู่ในช่วง 1.5-2.0 เซนติเมตร ในชุดนี้รากจะถูกตัดทอนรากเพื่อลดปัญหาการโค้งงอของรากเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Juniper and Groves, 1966) ส่วนในชุดที่ 2 ใช้รากที่ไม่ตัดทอนรากแต่มีความยาวน้อยกว่าคืออยู่ในช่วง 1.0-1.5 เซนติเมตร เนื่องจากพบว่ารากที่สั้นถึงแม้ว่าไม่ตัดทอนรากจะโค้งงอเนื่องจากแรงโน้มถ่วงซ้ำกว่ารากที่ยาวแต่ตัดทอนราก รูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนในรากทั้ง 2 ชุดแบ่งเป็น 4 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 กระแสไฟฟ้าเข้าสู่บริเวณปลายรากและออกจากส่วนอื่นๆ ของราก ในรูปแบบที่ 2 กระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากใน 2 ช่วงคือบริเวณปลายรากและในส่วนของรอยต่อระหว่างอาณาเขตเซลล์ชิดตัวกับอาณาเขตขนราก ในส่วนอื่นๆ ของรากกระแสไฟฟ้ามักออกจากราก ส่วนรูปแบบที่ 3 ด้านหนึ่งของรากมีทิศของกระแสไฟฟ้าเหมือนรูปแบบที่ 1 และอีกด้านหนึ่งมีกระแสไฟฟ้าเหมือนรูปแบบที่ 2 ส่วนรูปแบบที่ 4 จะแตกต่างจากทั้งหมดที่กล่าวมาโดยมีกระแสไฟฟ้าออกจากปลายรากและเข้าสู่รากในบริเวณถัดขึ้นมา ในชุดที่ 1 ที่รากยาวกว่าพบกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 และ 3 มากที่สุด (17+16 จาก 39 ราก) ส่วนในรากชุดที่ 2 ซึ่งไม่ได้ตัดทอนรากแต่สั้นกว่า พบกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 1 มากที่สุด (18 จาก 30 ราก) โดยคาดว่ารูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันของรากน่าจะมีผลเนื่องจากความยาวของราก เมื่อนำทิศของกระแสไฟฟ้าของทุกรากในแต่ละชุดมาทดสอบผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าทั้งรากที่ตัดทอนรากซึ่งยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร และรากที่ไม่ตัดทอนรากซึ่งยาว 1.00-1.50 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้ามักเข้าสู่รากในบริเวณจากปลายรากจนสุดอาณาเขตเนื้อเยื่อเจริญอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในบริเวณ

เซลล์ยึดตัวและบริเวณที่จะมีขนรากจะมีความแตกต่างของทิศของกระแสไฟฟ้าในรากที่ยาวและรากที่สั้น โดยพบว่าในรากที่สั้นกระแสไฟฟ้าจะออกจากรากอย่างมีนัยสำคัญในทุกตำแหน่ง ส่วนในรากที่ยาวกระแสไฟฟ้าจะมีทิศออกอย่างมีนัยสำคัญในบริเวณเซลล์ยึดตัวและบริเวณโคนราก แต่ในบริเวณที่จะเป็นขนรากกระแสไฟฟ้าจะมีทิศไม่แน่นอน กล่าวคือรากที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากหรือออกจากรากในบริเวณนี้มีจำนวนใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตของรากโดยพิจารณาอัตรายึด พบว่ารากที่มีความยาวต่างกันมีอัตรายึดของรากแตกต่างกัน โดยรากที่ตัดหดรากซึ่งยาวกว่าจะมีอัตรายึดมากกว่ารากที่ไม่ตัดหดราก ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นผลมาจากรูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน (Iwabushi *et al.*, 1989) เนื่องจากในรากที่ตัดหดรากรูปแบบของกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นรูปแบบที่ 2 และ 3 (33 จาก 39 ราก) ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากสองช่วงคือที่ปลายรากในส่วนของเนื้อเยื่อเจริญ และในบริเวณเริ่มมีขนราก ส่วนรากที่ไม่ตัดหดรากส่วนใหญ่มีรูปแบบกระแสไฟฟ้าแบบที่ 1 (18 จาก 30 ราก) ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าสู่รากในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญเท่านั้น นั่นคือรากที่มีกระแสไฟฟ้าเข้า 2 บริเวณคือบริเวณเนื้อเยื่อเจริญและบริเวณขนรากจะมีอัตรายึดมากกว่ารากที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าเฉพาะที่บริเวณเนื้อเยื่อ

เมื่อพิจารณาผลของ pH (ปริมาณไฮโดรเจนไอออน) ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออน พบว่าที่ pH 6.00 และ 8.00 กระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางใกล้เคียงกันคือเข้าสู่ปลายรากและออกจากบริเวณเซลล์ยึดตัวและบริเวณที่เริ่มมีขนราก แต่ที่ pH 4.00 กระแสไฟฟ้าเกือบตลอดรากจะมีทิศเข้าสู่รากและมีขนาดมากกว่าที่ pH 6.00 และ 8.00 อย่างมีนัยสำคัญ และขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ pH 6.00 จะมีขนาดมากกว่าที่ pH 8.00 ด้วยเช่นกัน จึงสรุปได้ว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH น้อยลง (มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น) ซึ่งมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น แสดงว่าไฮโดรเจนไอออนน่าจะเป็นไอออนหลักของการเกิดกระแสไฟฟ้านี้ เนื่องจากเมื่อปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายเพิ่มมากขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตรายึดของรากที่ pH 4.00 จะมากที่สุด รองลงมาคือที่ pH 6.00 และที่ pH 8.00 อัตรายึดจะน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของกระแสไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่าอัตรายึดของรากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากไฮโดรเจนไอออน

สำหรับการศึกษาผลของไอออนต่างๆ ต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าไอออนนั้น พบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดในสภาวะไม่มีไอออนต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน โดยสภาวะที่ไม่มีแคลเซียมหรือไม่มีโพแทสเซียมไอออนกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สภาวะที่ไม่มีโซเดียมหรือไม่มีคลอไรด์ไอออนกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง แต่ทั้งนี้ผลดังกล่าวเป็นเพียง

แนวโน้มนั้นไม่สามารถบอกได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าไอออนใดบ้างที่น่าจะมี
ส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเห็นผลไม่ชัดเจนเหมือนไฮโดรเจนไอออน หากมี
การศึกษาต่อไปควรจะนำเทคนิคการใช้ไอออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรด (ion-selective electrode) ซึ่ง
สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของไอออนแต่ละชนิดได้ (Meyer and Weisenseel, 1997) มาใช้ เพื่อ
ให้ได้ผลการทดลองที่แน่นอนกว่าวิธีแทนที่ไอออนตามที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา สาลีดีด. 2541. *พฤกษศาสตร์ทั่วไป*, 236 หน้า. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์.
- กลุ่มพืชน้ำมัน กองส่งเสริมพืชไร่ฯ กรมส่งเสริมการเกษตร. 2542. อนาคตการส่งเสริมการปลูก
ทานตะวันในประเทศไทย ณ ห้องประชุมโรงแรมมารวยการ์เดนส์ กรุงเทพมหานคร
26 สิงหาคม 2542.
- เชาว์ ชิโนรักษ์และพรณี ชิโนรักษ์. 2539. *ชีววิทยา เล่ม 3*, 510 หน้า. กรุงเทพมหานคร : ศิลปา
บรรณาคาร.
- ปรีชา เลี้ยงพันธุ์สกุลและสุชาติ วรุดมางกูร. 2536. การปลูกทานตะวัน. *ข.เกษตรศาสตร์* 38 (4 (ส.
ค.-ก.ย.)) : 32-42.
- วัลลภ พรหมทอง. 2541. *ไม้ดอกยอดฮิต ตระกูลคอมโพสิเต้*, 115 หน้า. กรุงเทพมหานคร : สำนัก
พิมพ์มติชน.
- สุขสันต์ สุทธิผลไพบุลย์. 2534. ข้อคิดเสนอแนะการปลูกทานตะวัน. *ว.พัฒนาที่ดิน* 29 (317 (ต.
ค.)) : 35-40.
- อภิญา วรงค์ดาการ. 2531. *สถิติสำหรับชีววิทยา*, 356 หน้า. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คณะ
วิทยาศาสตร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์.
- อรสา แสงอุทัย. 2524. *พฤกษศาสตร์*, 322 หน้า. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- อำนวยการศิลป์ สุขศรี. 2533. ทานตะวันพืชเศรษฐกิจใหม่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *แก่นเกษตร*
18 (1 (ม.ค.-ก.พ.)) : 22-28.
- Beemter, G.T.S. and Baskin, T.I. 1998. Analysis of Cell Division and Elongation
Underlying the Developmental Acceleration of Root Growth in *Arabidopsis*
thaliana. *Plant Physiology* 116 : 1515-1526.
- Bogdanov, K. 2000. *BIOLOGY IN PHYSICS Is Life Matter?*, 237 pp. USA : Academic
Press.
- Cosgrove, D.J. 2000. New genes and new biological roles for expansins. *Current*
Opinion in Plant Biology 3 : 73-78.

- Diehl-Jones, W. and Huebner, E. 1989. Pattern and composition of ionic currents around ovarioles of the hemipteran *Rhodnius prolixus* (Stahl). *Biological Bulletin* 176 (s) : 86-90.
- Gow, N.A.R. 1989. Relationship Between Growth and the Electrical Current of Fungal Hyphae. *Biological Bulletin* 176(s) : 31-35.
- Hotary, K.B. and Robinson, K.R. 1990. Endogenous electrical currents and the resultant voltage gradient in the chick embryo. *Development Biology* 140(1):149-160.
- Hush, J.M. and Overall, R.L. 1989. Steady Ionic Currents Around Pea (*Pisum sativum* L.) Root Tips : the Effect of Tissue Wounding. *Biological Bulletin* 176(s) : 56-64.
- Iwabuchi, A., Yano, M. and Shimizu, H. 1989. Development of extracellular electric pattern around *Ledidium* roots : its possible role in root growth and gravitropism. *Protoplasma* 148 : 94-100.
- Jaffe, L.F. 1985. Extracellular current measurements with a vibrating probe. *Neurosciences* 8(12) : 517-521.
- Jaffe, L.F. and Nuccitelli, R. 1974. An ultrasensitive vibrating probe for measuring steady extracellular currents. *The Journal of Cell Biology* 63 : 614-628.
- Jaffe, L.F. and Nuccitelli, R. 1977. Electrical controls of Development. *Annual review of Biophysics and Bioengineering* 6 : 445-476.
- Juniper, B.E., Grove, S., Schachar, B.L. and Audus, L.J. 1996. Root Cap and the Preception of Gravity. *Nature* 209 : 93-94.
- Kucera, P. and Ribaupierre, Y. 1989. Extracellular Electrical Currents in the Chick Blastoderm. *Biological Bulletin* 176(s) : 118-122.
- Meyer, A.J. and Weisenseel, M.H. 1997. Wound-Induced Changes of Membrane Voltage, Endogenous Currents, and Ion-Fluxes in Primary Roots of Maize. *Plant Physiology* 114:989-998.
- Miller, A.L. 1989. Ion Currents and Growth Regulators in Plant Root Development. *Biological Bulletin* 176(s) : 65-70.

- Miller, A.L., Raven, J.A., Sprent, J.I. and Weisenseel, M.H. 1986. Endogenous ion currents traverse growing roots and root hairs of *Trifolium repens*. *Plant, Cell and Environment* 9 : 79-83.
- Moore, R., Clark, W.D. and Stem, K.R. 1995. *Botany*, 824 pp. 1a : Wm. C. Brown Communications, Inc.
- Nawata, T., Hishinuma, T. and Wada, S. 1989. Ionic Currents During Regeneration of Thallus and Rhizoid From Cell Segments Isolated From the Marine Alga *Bryopsis*. *Biological Bulletin* 176(s) : 41-45.
- Nuccitelli, R. 1983. Transcellular ion currents : signals and effectors of cell polarity. *Modern Cell Biology* 2 : 451-481.
- Rathore, K.S. and Robinson, K.R. 1989. Ionic Currents Around Developing Embryos of Higher Plants in Culture. *Biological Bulletin* 176(s) : 46-48.
- Rubinacci, A., Villa, L., Benelli, F.D., Borgo, E., Ferretti, M., Palumbo, C. and Marotti, G. 1998. Osteocyte-bone lining cell system at the origin of steady ionic current in damage amphibian bone. *Calcified Tissue International* 63(4) : 331-339.
- Scheffey, C. 1986. Electric fields and the vibrating probe, for the uninitiated. *Progress in Clinical Biological Research* 210 : 1-13.
- Scheffey, C. 1986. Pitfalls of the vibrating probe technique, and what to do about them. *Ionic Currents in Development*. Pages 3-12.
- Scheffey, C. 1988. Two approaches to construction of vibrating probes for electrical current measurement in solution. *Review Scientific Instruments* 59(5) : 787-792.
- Thavarungkul, P. 1997. Vibrating probe measurement of ionic currents around developing embryo of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Experimental Botany* 48(314) : 1647-1653.
- Troxell, C.L. 1989. Transcellular Ionic Currents During Primary Cell Wall Morphogenesis in *Micraterias* and *Closterium*. *Biological Bulletin* 176(s) : 65-70.
- Waisel, Y., Eshel, A. and Kafkafi, U. 1991. *Plant Roots : The Hidden Half*, 948 pp. USA : New York Marcel Dekker, Inc.

- Weisenseel, M.H., Dorn, A. and Jaffe, L.F. 1979. Natural H⁺ Currents Traverse Growing Roots and Root Hairs of Barley (*Hordeum vulgave* L.). *Plant Physiology* 64 : 512-518.
- Zivkovic, D. and Dohmen, M.R. 1989. Ionic Currents in *Lymnaea stagnalis* Eggs During Maturation Divisions and First Mitotic Cell Cycle. *Biological Bulletin* 176(s) : 103-109.
- Zivkovic, D. and Dohmen, R. 1991. Changes in transcellular ionic currents associated with cytokinesis and polar lobe fomation in embryos of *Bithynia tentaculate* (mollusca). *Development* 112(2) :451-459.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวจุฬารัตน์ ม่วงดิษฐ์

วัน เดือน ปีเกิด 14 ธันวาคม 2519

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)

มหาวิทยาลัยทักษิณ

2541

(วท.บ.)