สารบาญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบาญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 บทตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	10
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	11
1.5 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการ	11
2. วิธีการวิจัย	12
2.1 วัสดุและอุปกรณ์	12
2.1.1 ตัวอย่าง	12
2.1.2 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลาย APW (artificial pond water)	12
2.1.3 สารเคมีสำหรับชุบอิเล็กโทรด	12
2.1.4 สารเคมีอื่นๆ ที่จำเป็น	12
2.1.5 อุปกรณ์สำหรับเพาะเมล็ดทานตะวัน	13
2.1.6 อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	13
2.1.7 อุปกรณ์สำหรับเตรียมไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ	14
2.1.8 อุปกรณ์สำหรับเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง	14
2.1.9 วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็น	14

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 หลักการและทฤษฎี	14
2.2.1 หลักการทำงานของระบบไวเบรติงโพรบ	20
2.3 การเตรียมสารละลาย Artificial pond water (APW)	22
2.3.1 การเตรียมสารละลาย APW pH 6.00	22
2.3.2 การเตรียมสารละลาย APW pH 4.00 และ pH 8.00	23
2.3.3 การเตรียมสารละลายเพื่อศึกษาผลของไอออน	23
2.3.4 การเตรียมสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียม 0.1 มิลลิโมลาร์	24
2.4 การเพาะเมล็ดทานตะวัน	25
2.5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	26
2.6 การเตรียมโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า	27
2.7 การเตรียมไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ	28
2.7.1 การเตรียมลวดเงิน	28
2.7.2 การเตรียมอิเล็กโทรดปลายแหลม	30
2.8 การเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง	31
2.9 การปรับเทียบโพรบ	32
2.10 การวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	35
2.11 การคำนวณผล	39
2.12 การศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในขนรากและรอบโซนขนรากทานตะวันในสภาวะปกติ	43
2.13 การศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในขนรากและรอบโซนขนรากทานตะวันเมื่อเปลี่ยน pH	43
2.13.1 ศึกษากระแสไฟฟ้าในขนรากและรอบโซนขนรากที่มี APW pH 4.00 $\pm$ 0.05	44
2.13.1 ศึกษากระแสไฟฟ้าในขนรากและรอบโซนขนรากที่มี APW pH 8.00 $\pm$ 0.05	44

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 การศึกษาผลของไอออนต่อกระแสไฟฟ้าในขนรากและรอบโซนขนราก ทานตะวัน	44
2.14.1 ผลของแคลเซียมคลอไรด์	44
2.14.2 ผลของโพแทสเซียมคลอไรด์	44
2.14.3 ผลของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์	44
2.15 ผลของอลูมิเนียมต่อกระแสไฟฟ้าไอออน	45
2.16 การหาอัตรายืดของขนรากทานตะวัน	45
2.17 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	45
2.17.1 ทิศของกระแสไฟฟ้า	45
2.17.2 ผล pH ของสารละลายภายนอก	48
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	53
3.1 รูปแบบกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะตะวันในสภาวะ ปกติสาร (APW pH 6.00)	53
3.2 รูปแบบกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะตะวันเมื่อ pH ของสารละลาย APW เปลี่ยน	64
3.2.1 pH 4.00	64
3.2.2 pH 8.00	70
3.3 เปรียบเทียบรูปแบบกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW ที่มี pH ต่างกัน	76
3.3.1 กระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก	76
3.3.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก	82
3.3.3 อัตรายืดของขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างกัน	84
3.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนบางชนิดต่อกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะวัน	85
3.4.1 ผลของแคลเซียม	86
3.4.2 ผลของโพแทสเซียม	90
3.4.3 ผลของสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์	94

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่สภาวะต่างๆ	98
3.5.1 กระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก	98
3.5.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก	104
3.6 อัตรายืดของขนรากในสภาวะของสารละลายต่างๆ	107
3.7 ผลของอลูมิเนียม	108
3.8 เปรียบเทียบรูปแบบของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มีอลูมิเนียม	112
3.8.1 กระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก	112
3.8.2 กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก	112
3.9 อัตรายืดของขนรากในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM Al^{3+}	116
4. บทสรุป	118
บรรณานุกรม	121
ประวัติผู้เขียน	125

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1	ส่วนประกอบของสารเคมีในการเตรียมสารละลาย APW ที่มีสารพิษชนิดต่างๆ เพื่อศึกษากระแสไฟฟ้าไอออน	24
2	ค่าวิกฤตเมื่อกำหนดค่าระดับความมีนัยสำคัญ (α) ต่าง ๆ	48
3	ค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบที (t) เมื่อ df = n-1 และ α คือค่าระดับความเชื่อมั่น	52
4	ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนของรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตรในสารละลาย APW pH 6.00	62
5	ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนของรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตรในสารละลาย APW pH 4.00 $\pm$ 0.05	68
6	ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย APW pH 8.00 $\pm$ 0.05	74
7	ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรากเปรียบเทียบระหว่างรากในสารละลายสภาวะปกติ (APW pH 6.00) กับ APW pH 4.00 pH 4.00 กับ pH 8.00 และสภาวะปกติ กับ pH8.00	79
8	ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างๆ	83
9	ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่ pH ต่าง ๆ ของสารละลาย APW	84
10	อัตรายืดของขนรากในสารละลาย APW ที่ pH ต่างๆ กัน	85
11	ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนของรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย 0.65 mM $CaCl_2$ pH 6.00 $\pm$ 0.05	88

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
12 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนของรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลาย 0.65 mM KCl pH 6.00 $\pm$ 0.05	92
13 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนของขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนของรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ในสารละลายไม่มีคลอไรด์ ไอออน pH 6.00 $\pm$ 0.05	96
14 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรากเปรียบเทียบระหว่างรากในสารละลายสภาวะปกติ (APW pH 6.00) กับ 0.65 mM $CaCl_2$ 1.3 mM KCl และสารละลายที่ไม่มีคลอไรด์ตามลำดับ	101
15 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากในสภาวะต่างๆ	105
16 ผลการทดสอบสถิติของขนาดเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากที่ APW pH 6.00 กับสารละลายสภาวะต่าง ๆ	106
17 อัตรายืดของขนรากในสภาวะต่างๆ ของสารละลาย	107
18 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนรากที่ตำแหน่งต่างๆ จากโคนรากแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร ใน APW pH 4.00 $\pm$ 0.05 ที่เติม 0.10 mM $AlCl_3$	110
19 ผลการทดสอบสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรากเปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.00 กับ APW pH 4.00 ที่เติม 0.1 0mM $AlCl_3$	114
20 ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากใน APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM $AlCl_3$	116
21 อัตรายืดของขนรากในสารละลาย APW pH 4.00 ที่มีและไม่มี 0.10 mM $AlCl_3$	117

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในสารละลายภายนอกเซลล์	3
2	การใช้ไมโครอิเล็กโทรดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์	4
3	ทิศทางกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกเซลล์ในสาหร่ายสีน้ำตาล	6
4	ส่วนประกอบต่างๆ ของรากพืช	7
5	กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากกลุ่มของขนรากขณะที่กระแสไฟฟ้าเข้าที่บริเวณเซลล์ยืดตัวและปลายของขนราก	9
6	วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายที่สมมูลกับเมมเบรน	15
7	วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายที่สมมูลกับเมมเบรนของเซลล์ประสาท	16
8	วงจรไฟฟ้าที่สมมูลกับเซลล์เมมเบรนของพืชน้ำ *Egeria densa*	18
9	การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้าไหลผ่านในสารละลายภายนอก	19
10	ระบบไวเบรติงโพรบ	22
11	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	26
12	ต้นกล้าทานตะวันที่ถูกตรึงในภาชนะสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	27
13	ขั้นตอนการชุบโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	29
14	ไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ	30
15	การจัดอุปกรณ์สำหรับชุบไมโครอิเล็กโทรด	30
16	การเตรียมไมโครอิเล็กโทรดโดยต้มในสารละลาย โพแทสเซียมคลอไรด์	31
17	การเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง	32
18	การปรับเทียบโพรบในแนวแกน x โดยโพรบจะสั่นทั้งในแนวแกน x และ y	33
19	ลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการปรับเทียบในแนวแกน x	33
20	การปรับเทียบโพรบในแนวแกน y โดยโพรบจะสั่นทั้งในแนวแกน x และ y	34
21	ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน x	34
22	ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน y	35
23	แสดงอุปกรณ์ระบบไวเบรติงโพรบ	37

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
24	แสดงการวัดกระแสไฟฟ้าไอออน	38
25	ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าที่ปลายของขนราก	42
26	แสดงส่วนต่างๆ ของต้นกล้าทานตะวัน	53
27	ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก	54
28	ตัวอย่างรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ระยะห่างจากผิวของราก 150 ไมโครเมตร ในอาณาเขตเซลล์ที่เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนของขนราก	55
29	รูปแบบกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ	56
30	ตำแหน่งวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากและรอบโซนขนราก	57
31	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และรอบโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH 6.00 ± 0.05 ที่ตำแหน่งต่างๆ	63
32	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และโนขนราก รูปแบบที่ 1 ใน APW pH 4.00	66
33	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และโนขนราก รูปแบบที่ ใน APW pH 4.00	67
34	แสดงขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH 4.00 ± 0.05 ที่ตำแหน่งต่างๆ	69
35	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และโนขนราก รูปแบบที่ 1 ใน APW pH 8.00	72
36	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และโนขนราก รูปแบบที่ 1 ใน APW pH 8.00	73

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
37	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH 8.00 ±0.05 ที่ตำแหน่งต่างๆ	75
38	ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน (± SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนราก ใน APW ที่ pH ต่างๆ ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	78
39	กราฟเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.00 6.00 และ 8.00	83
40	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และโนขนราก ในสารละลาย 0.65 mM $CaCl_2$	87
41	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนของขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย 0.65 mM $CaCl_2$ pH 6.0 ที่ตำแหน่งต่างๆ	89
42	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และในขนราก ในสารละลาย 1.3 mM KCl	91
43	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และโซนขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย 1.3 mM KCl pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ	93
44	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และในขนรากในสารละลายที่ไม่มี Cl^-	95
45	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 – 12.50 มิลลิเมตร) และโซนของขนรากทานตะวันวัดในสารละลายที่ไม่มี Cl^- ที่ตำแหน่งต่างๆ	97

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
46	ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน (± SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนราก ในสภาวะ ของสารลาย ต่าง ๆ ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	100
47	กราฟเปรียบเทียบขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00 0.65 mM $CaCl_2$ 1.3 mM KCl และไม่มี Cl^-	106
48	ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารอบๆ บริเวณอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และในขนรากใน APW pH 4.00 ที่เติม 0.10 mM Al^{3+}	109
49	ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ (10.00 –12.50 มิลลิเมตร) และโซนของขนรากทานตะวันวัดในสารละลาย APW pH 4.00 ที่เติม 0.10 mM Al^{3+} ที่ตำแหน่งต่างๆ	111
50	ขนาดเฉลี่ยและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออน (± SD) ในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และรอบโซนขนราก ใน APW ส่วนที่แรเงาแสดงทิศที่เด่นกว่าของกระแสไฟฟ้าไอออนจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	113