# สารบาญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | (3) |
| Abstract | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ | (5) |
| สารบาญ | (6) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการภาพประกอบ | (14) |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| 1.2 การตรวจเอกสาร | 4 |
| 1.2.1 กระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์สัตว์ | 5 |
| 1.2.2 กระแสไฟฟ้าไอออนในเซลล์พืช | 7 |
| 1.2.3 ผลของสารพิษ | 11 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 15 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 15 |
| 1.5 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการ | 15 |
| 2. วิธีการวิจัย | 16 |
| 2.1 วัสดุและอุปกรณ์ | 16 |
| 2.1.1 ตัวอย่าง | 16 |
| 2.1.2 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลาย APW (artificial pond water) | 16 |
| 2.1.3 สารเคมีสำหรับซุบอิเล็กโทรด | 16 |
| 2.1.4 สารเคมีอื่นๆ ที่จำเป็น | 16 |
| 2.1.5 อุปกรณ์สำหรับเพาะเมล็ดทานตะวัน | 17 |
| 2.1.6 อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออนรอบๆ รากทานตะวัน | 17 |
| 2.1.7 อุปกรณ์สำหรับเตรียมไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ | 18 |
| 2.1.8 อุปกรณ์สำหรับเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง | 18 |

# สารบาญ(ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 2.1.9 วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็น | 18 |
| 2.2 หลักการและทฤษฎี | 19 |
| 2.3 หลักการทำงานของระบบไวเบรติงโพรบ | 24 |
| 2.4 การเตรียมสารละลาย APW (artificial pond water) | 25 |
| 2.4.1 การเตรียมสารละลาย APW pH 6.00 | 25 |
| 2.4.2 การเตรียมสารละลาย APW pH 4.50 | 26 |
| 2.4.3 การเตรียมสารละลาย APW เพื่อศึกษาผลของสารพิษ | 26 |
| 2.5 การเพาะเมล็ดทานตะวัน | 27 |
| 2.6 การเตรียมรากทานตะวันสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน | 27 |
| 2.7 การเตรียมโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า | 28 |
| 2.8 การเตรียมไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ | 30 |
| 2.9 การเตรียมอิเล็กโทรดอ้างอิง | 32 |
| 2.10 การปรับเทียบโพรบ | 32 |
| 2.11 การวัดกระแสไฟฟ้าไอออน | 35 |
| 2.12 การคำนวณผล | 38 |
| 2.13 การศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสภาวะปกติ (ในสารละลาย APW pH 6.00±0.05) | 43 |
| 2.14 ผลของเวลาต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน | 43 |
| 2.15 ศึกษาผลของสารพิษต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน | 43 |
| 2.15.1 ผลของอลูมิเนียม | 44 |
| 2.15.2 ผลของแคดเมียม | 44 |
| 2.15.3 ผลของอาร์ซินิก | 44 |
| 2.16 การหาอัตรายืดของรากทานตะวัน | 45 |
| 2.17 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ | 45 |
| 2.17.1 ทิศของกระแสไฟฟ้า | 45 |
| 2.17.2 ผลของสารพิษ | 48 |

# สารบาญ(ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 54 |
| 3.1 อาณาเขตของราก | 54 |
| 3.2 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW ที่สภาวะปกติ | 54 |
| 3.3 อัตรายืดของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 ที่สภาวะปกติ | 66 |
| 3.4 รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนรอบรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 และ pH 4.50 เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง | 70 |
| 3.5 ผลของสารพิษต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน | 81 |
| 3.5.1 ผลของอลูมิเนียม | 81 |
| 3.5.1.1 อลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ | 81 |
| 3.5.1.2 อลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ | 87 |
| 3.5.1.3 อลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ | 93 |
| 3.5.1.4 ผลของแคลเซียมต่อความเป็นพิษของอลูมิเนียม | 99 |
| 3.5.2 ผลของแคดเมียม | 106 |
| 3.5.3 ผลของอาร์ซินิก | 122 |
| 3.6 ผลของสารพิษที่มีต่ออัตรายืดของรากทานตะวัน | 127 |
| 4. บทสรุป | 135 |
| เอกสารอ้างอิง | 138 |
| ประวัติผู้เขียน | 143 |

# รายการตาราง


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 1 | ส่วนประกอบของสารเคมีในการเตรียมสารละลาย APW ที่มีสารพิษชนิดต่างๆ เพื่อศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในสภาวะปกติและผลของสารพิษที่มีต่อรูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออน | 26 |
| 2 | ตัวอย่างผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y ที่ได้จากการคำนวณบริเวณผิวราก ด้านไกลตัวผู้วัด | 42 |
| 3 | ตัวอย่างผลการทดลองแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y ที่ได้จากการคำนวณ บริเวณผิวราก ด้านใกล้ตัวผู้วัด | 42 |
| 4 | ค่าวิกฤตเมื่อกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha$) ต่างๆ กันของการทดสอบสัดส่วนของประชากรกลุ่มเดียวแบบทางเดียว | 48 |
| 5 | ตัวอย่างการคำนวณค่าทดสอบทางสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนในสารละลาย APW pH 4.50 และสภาวะที่มีอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง | 50 |
| 6 | ตัวอย่างการคำนวณค่าทดสอบทางสถิติของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนแต่ละตำแหน่งในสารละลาย APW pH 4.50 และสภาวะที่มีอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง | 52 |
| 7 | ค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบที (t) เมื่อ df = n - 1 และ $\alpha$ คือค่าระดับนัยสำคัญ | 53 |
| 8 | ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนราก ใน APW pH 6.00 | 60 |
| 9 | ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ตามความยาวของรากทานตะวันทั้งด้านไกลตัวและใกล้ตัวผู้วัด ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากจนถึงโคนราก ใน APW pH 6.00 | 63 |
| 10 | อัตรายืดของรากทานตะวันอายุ 42 ชั่วโมง ในสภาวะปกติ APW pH 6.00 | 67 |
| 11 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00 แต่ละราก | 72 |

## รายการตาราง(ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 12 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00 แต่ละตำแหน่ง | 73 |
| 13 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 6.00 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก | 74 |
| 14 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.50 แต่ละราก | 77 |
| 15 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 4.50 แต่ละตำแหน่ง | 78 |
| 16 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 โดยวัดเพียงด้านไกลตัวของรากเพียงด้านเดียวจากปลายถึงโคนราก | 79 |
| 17 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 82 |
| 18 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 84 |
| 19 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 85 |
| 20 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 89 |
| 21 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 90 |

## รายการตาราง(ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 22 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 91 |
| 23 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 95 |
| 24 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 96 |
| 25 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 97 |
| 26 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ ที่มีแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 102 |
| 27 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ ที่มีแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 103 |
| 28 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ และแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 104 |
| 29 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 108 |

## รายการตาราง(ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 30 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 109 |
| 31 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 6.00 และในสภาวะที่มีแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 110 |
| 32 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 114 |
| 33 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 115 |
| 34 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 116 |
| 35 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 4.50 กับได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 117 |
| 36 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 6.00 และในสภาวะที่มีแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 118 |
| 37 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 4.50 และในสภาวะที่มีแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 119 |

## รายการตาราง(ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 38 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละราก เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับอาร์ซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 123 |
| 39 | ผลการทดสอบทางสถิติของขนาดของกระแสไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง เปรียบเทียบระหว่างรากใน APW pH 6.00 กับได้รับอาร์ซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 124 |
| 40 | ค่าเฉลี่ยของขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน ใน APW pH 6.00 และในสภาวะที่มีอาร์ซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 125 |
| 41 | แสดงอัตรายืดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรากทานตะวันพันธุ์แปซิฟิก 33 ในสภาวะปกติและหลังจากได้รับสารพิษ | 127 |
| 42 | แสดงการลดลงของอัตรายืดของรากทานตะวันพันธุ์แปซิฟิก 33 เปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติและหลังจากได้รับสารพิษ | 131 |

# รายการภาพประกอบ


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1 | ความต่างศักย์ไฟฟ้า ($\Delta V$) ภายนอกเซลล์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านสารละลายภายนอกเซลล์ | 2 |
| 2 | รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนที่ไหลผ่านเซลล์ไข่ของกบ ที่ตำแหน่งต่างๆ ขณะเซลล์แบ่งตัวในระยะต่างๆ | 6 |
| 3 | รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนในระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอแครอท | 7 |
| 4 | รูปแบบกระแสไฟฟ้าไอออนของเอ็มบริโอแครอทต่างสายพันธุ์ | 8 |
| 5 | แสดงอาณาเขตต่างๆ ของปลายราก | 9 |
| 6 | ฟลูอิค โมเซอิค โมเดล (Fluid mosaic model) ของโครงสร้างของเซลล์เมมเบรน | 19 |
| 7 | วงจรไฟฟ้าที่สมมูลกับเมมเบรน | 20 |
| 8 | วงจรไฟฟ้าที่สมมูลกับเซลล์เมมเบรนของ *Egeria densa* | 21 |
| 9 | ระบบไวเบรติงโพรบ | 24 |
| 10 | (A) การวางเมล็ดเพื่อให้รากงอกในแนวดิ่ง<br>(B) ความยาวรากทานตะวันที่ต้องการ | 27 |
| 11 | รากทานตะวันที่ตรึงสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน | 28 |
| 12 | ขั้นตอนการชุบโพรบสำหรับวัดกระแสไฟฟ้าไอออน | 29 |
| 13 | ไมโครอิเล็กโทรดปรับเทียบ | 30 |
| 14 | การต้มไมโครปิเปตแก้วในสารละลาย 3.0 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ | 31 |
| 15 | การจัดอุปกรณ์สำหรับชุบไมโครอิเล็กโทรด | 31 |
| 16 | การจัดอุปกรณ์เพื่อชุบอิเล็กโทรดอ้างอิง | 32 |
| 17 | การปรับเทียบโพรบในแนวแกน y | 33 |
| 18 | การปรับเทียบโพรบในแนวแกน x | 33 |
| 19 | ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไฟฟ้า +30 นาโนแอมแปร์และ –30 นาโนแอมแปร์ | 34 |
| 20 | ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน y | 34 |
| 21 | ทิศของกระแสไฟฟ้าเมื่อปรับเทียบในแกน x | 35 |
| 22 | ภาพรวมของชุดอุปกรณ์ระบบไวเบรติงโพรบ | 36 |

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 23 | โพรบที่สั่นทั้งแกน x และแกน y อิเล็กโทรดอ้างอิงและรากทานตะวันในสารละลายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา | 36 |
| 24 | วิธีการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยระบบไวเบรติงโพรบ | 37 |
| 25 | การรวมกันแบบเวคเตอร์ของกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x และแนวแกน y ได้เป็นกระแสไฟฟ้ารวม | 40 |
| 26 | ภาพกล้าทานตะวันแสดงตำแหน่งด้านไกลตัวและด้านใกล้ตัว | 41 |
| 27 | ตัวอย่างการเขียนทิศทางและขนาดของกระแสไฟฟ้าไอออน | 41 |
| 28 | ตัวอย่างรูปแบบที่ 1 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน | 57 |
| 29 | ตัวอย่างรูปแบบที่ 2 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน | 58 |
| 30 | ตัวอย่างรูปแบบที่ 3 ของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวัน | 59 |
| 31 | ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 61 |
| 32 | ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 62 |
| 33 | ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 64 |
| 34 | ขนาดและทิศของกระแสไฟฟ้าไอออนรูปแบบที่ 3 ภายนอกรากทานตะวันด้านใกล้ตัวผู้วัดในสารละลาย APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 65 |
| 35 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายืดของรากทานตะวันและขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุด | 68 |
| 36 | ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากและอัตรายืดของรากทานตะวัน | 68 |
| 37 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายืดของรากทานตะวันและขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดของรูปแบบที่ 3 | 69 |
| 38 | ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากและอัตรายืดของรากทานตะวันของรูปแบบที่ 3 | 69 |
| 39 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง | 70 |

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 40 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 75 |
| 41 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง | 76 |
| 42 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 80 |
| 43 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 82 |
| 44 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดใน APW pH 4.50 และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 86 |
| 45 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 87 |
| 46 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 92 |
| 47 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 93 |
| 48 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 98 |
| 49 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดกับระยะเวลาที่รากทานตะวันได้รับสารพิษที่อลูมิเนียมความเข้มข้นต่างกัน | 99 |

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 50 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอลูมิเนียมความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ที่มีแคลเซียมความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 100 |
| 51 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และเมื่อรากได้รับอลูมิเนียม 10 ไมโครโมลาร์ และแคลเซียม 0.2 มิลลิโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 105 |
| 52 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 106 |
| 53 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 6.00 และเมื่อรากได้รับแคดเมียม 1 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 111 |
| 54 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 112 |
| 55 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 4.50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 112 |
| 56 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 6.00 และเมื่อรากได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 120 |
| 57 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 4.50 และเมื่อรากได้รับแคดเมียม 100 ไมโครโมลาร์ pH 4.50 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก | 121 |

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 58 | ตัวอย่างรูปแบบของกระแสไฟฟ้าไอออนตามความยาวของรากทานตะวันในสารละลาย APW pH 6.00 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและในสารละลาย APW ที่มีอาร์ซินิกความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง | 122 |
| 59 | ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าไอออนเฉลี่ย (±SD) ภายนอกรากทานตะวันด้านไกลตัวผู้วัดในสภาวะปกติ APW pH 6.00 และเมื่อรากได้รับอาร์ซินิก 10 ไมโครโมลาร์ pH 6.00 ที่ตำแหน่งต่างๆ จากปลายรากถึงโคนราก เปรียบเทียบอัตรายืดเฉลี่ยของรากทานตะวันระหว่างสภาวะปกติในสารละลาย APW และหลังจากได้รับสารพิษสภาวะต่างๆ | 126 |
| 60 | เปรียบเทียบอัตรายืดเฉลี่ยของรากทานตะวันระหว่างสภาวะปกติในสารละลาย APW และจากหลังได้รับสารพิษสภาวะต่างๆ | 128 |
| 61 | แสดงเปอร์เซ็นต์ของอัตรายืดเฉลี่ยของรากทานตะวันระหว่างสภาวะปกติในสารละลาย APW และหลังจากได้รับสารพิษสภาวะต่างๆ | 130 |
| 62 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองกับขนาดกระแสไฟฟ้าไอออนสูงสุดและความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองกับอัตรายืด | 134 |