

การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับ  
เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMEDICATION OF ARSENIC CONTAMINATED TAILINGS FROM GOLD MINE WITH MOTT  
DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum*) COUPLED WITH ELECTROKINETIC  
TECHNIQUE.



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science  
Inter-Department of Environmental Science  
GRADUATE SCHOOL  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า
โดย	นายกฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)	
.....	กรรมการ
(ดร.ศิลาวุธ ดำรงศิริ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)	

กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย : การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองทองคำด้วย  
 หญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับเทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้า. ( REMEDIATION OF ARSENIC  
 CONTAMINATED TAILINGS FROM GOLD MINE WITH MOTT DWARF NAPIER GRASS  
 (*Pennisetum purpureum*) COUPLED WITH ELECTROKINETIC TECHNIQUE.) อ.ที่ปรึกษาหลัก  
 : รศ. ดร. พันธวิศ สัมพันธ์พานิช

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษา 1) ผลของปัจจัยทางจลนศาสตร์ไฟฟ้า (ปริมาณสนามไฟฟ้าที่  
 ป้อนและชนิดขั้วอิเล็กโทรด) และลักษณะภาชนะที่ทดลองต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในดิน และกากโลหกรรม และ 2)  
 ความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรม และ  
 สะสมไว้ในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) การศึกษาการเคลื่อนที่ของสารหนูใน  
 ตัวกลางดินที่มีการเติมสารหนูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร  
 ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงต่อเนื่อง พบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีแนวโน้มค่าของการเคลื่อนที่ของสารหนูที่คล้ายกัน คือ ใน  
 บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแคโทด มีการสะสมสารหนูในปริมาณที่ต่ำ สำหรับบริเวณ  
 ที่ 5 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแอโนด มีการสะสมสารหนูในปริมาณสูงสุด ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่  
 ของสารหนูในตัวกลางดิน พบว่า รูปแบบภาชนะทรงกลมและขั้วกรงไฟที่ป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้  
 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของสารหนูได้ดีที่สุด การเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรมที่มีความเข้มข้นของ  
 สารหนู 60.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ถูกบำบัดด้วยการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 3, 5  
 และ 7 วันต่อเนื่อง พบว่า ระยะเวลาที่ 5 วัน การป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู  
 ดีที่สุด โดยเคลื่อนที่มาบริเวณระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $63.07 \pm 1.60$  มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วน  
 การบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ปริมาณสนามไฟฟ้า  
 แตกต่างกัน (0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร) ที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน พบว่า พืช  
 สามารถดูดซับและสะสมสารหนูได้สูงที่สุดในส่วนรากของชุดการทดลองที่บำบัดด้วยสนามไฟฟ้า 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็น  
 เวลา 90 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ  $7.69 \pm 0.16$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาปริมาณสาร  
 หนูที่สะสมต่อมวลชีวภาพของพืช พบว่า ชุดการทดลองที่บำบัดด้วยสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่  
 ระยะเวลา 120 วันนั้น แสดงค่าดังกล่าวสูงสุด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6087102420 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: ARSENIC, ELECTROKINETIC, MINE TAILINGS, MOTT DWARF NAPIER GRASS,  
PHYTOREMEDIATION

Kitsadee Wanitsawatwichai : REMEDIATION OF ARSENIC CONTAMINATED TAILINGS FROM GOLD  
MINE WITH MOTT DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum*) COUPLED WITH  
ELECTROKINETIC TECHNIQUE.. Advisor: Assoc. Prof. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D.

The purpose of this study were to i) investigate the effects of electrokinetics (power input of electric field and electrode type) and shape of container on the mobility of arsenic in agar and mine tailings and ii) determine the ability of Mott dwarf napier grass coupled with the electrokinetic technique on the arsenic remediation from mine tailings and arsenic accumulation in the aboveground (stems and leaves) and underground (root) parts of plants. The results of arsenic mobility in agar containing 50 mg L<sup>-1</sup> of total arsenic and continuously treated with 1 and 2 V cm<sup>-1</sup> of power input for 72 hours showed similar patterns of arsenic movement in agar. Low arsenic accumulations were normally found at the sampling point no. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 and 9. These points were the positions where cathode electrodes were placed. The highest arsenic accumulation were found at the sampling site no. 5 where an anode electrode was put in place. The study on the effects of electrode type and shape of container on the mobility of arsenic in agar found the highest arsenic mobility in the electrokinetics treatment applied to the 2 V cm<sup>-1</sup> graphite electrode in the circular-shaped container. The mobility of arsenic in mine tailings contaminated with 60.02 mg kg<sup>-1</sup> of arsenic which were continuously treated for 3, 5 or 7 days with either 1 or 2 V cm<sup>-1</sup> of power input showed highest mobility in the electrokinetic treatment with 2 V cm<sup>-1</sup> for 5 days. The average arsenic concentration found between the anode and cathode electrodes was 63.07±1.60 mg kg<sup>-1</sup>. The ability of Mott dwarf napier grass coupled with the electrokinetic technique on the arsenic remediation from mine tailings was determined under different electrokinetic conditions (0, 1, 2 and 4 V cm<sup>-1</sup>) and different treatment times (15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 and 120 days). The highest average arsenic accumulation in plant root (7.69±0.16 mg kg<sup>-1</sup>) was found in the plant coupled with 1 V cm<sup>-1</sup> of power input and treated for 90 days. Considering the ratio of arsenic accumulation in plant to plant biomass, it was found that the highest ratio was obtained in the coupled treatment with either 1 or 2 V cm<sup>-1</sup> of power input treated for 120 days.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ และช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลาย ๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่เมตตากรุณาสั่งสอน มอบความรู้ ร่วมการชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาระหว่างการศึกษาระดับมหาบัณฑิต และให้ความอนุเคราะห์ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายังเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ และ ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายังเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้การแนะนำ และข้อเสนอแนะให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยด้านการจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ขอขอบคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยด้านการจัดการเมืองสีเขียว ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง ขอกราบขอบพระคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ถาวร สุวรรณกิจ คณะวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ชี้แนะความรู้ต่าง ๆ และรวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ สมาชิก RU ได้แก่ นายอุดมศักดิ์ บุญมีรติ นายเอกชา ตนานนท์ชัย นางสาวมนทิรา สุขเจริญ นางสาวอโณทัย โกวิทวิวัฒน์ และนายกรวิชัย กมลรัตน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา ตลอดจนบุคคลอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อวินิต และคุณแม่รุ่งทิพา วานิชสวัสดิ์วิชัย และบุคคลในครอบครัวที่เปรียบเสมือนสิ่งที่ยึดเหนี่ยวจิตใจที่สำคัญที่สุดให้มุ่งมั่นในการผ่านอุปสรรคต่าง ๆ

กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฎ	ฎ
บทที่ 1..... 1	1
บทนำ..... 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2	2
1.3 สมมติฐานและกรอบแนวคิดของการวิจัย ..... 2	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4	4
บทที่ 2..... 6	6
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6	6
2.1 สารหนู (Asenic; As)..... 6	6
2.1.1 คุณสมบัติและรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู ..... 6	6
2.1.2 การปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อม ..... 11	11
2.1.3 การสะสมและความเป็นพิษของสารหนูที่มีต่อพืช ..... 12	12
2.1.4 ความเป็นพิษต่อมนุษย์..... 12	12
2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)..... 13	13

2.2.1 ความหมาย.....	13
2.2.2 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช .....	16
2.3 กระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic treatment) .....	20
2.3.1 หลักการของกระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	20
2.3.2 กลไกของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในดิน (Electrokinetic in soils) .....	21
2.3.3 ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด .....	24
2.4 หญ้าสกุลเนเปียร์ (Napier grass).....	25
2.5 แสงซินโครตรอน (Synchrotron) .....	26
2.5.1 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun).....	27
2.5.2 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator) .....	27
2.5.3 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron) .....	27
2.5.4 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring).....	29
2.5.5 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines: BL).....	29
2.5.6 แสงซินโครตรอน (Synchrotron light) .....	29
2.5.7 อุปกรณ์แทรก (Insertion devices).....	30
2.5.8 สถานีทดลอง (Experimental Station) .....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	33
2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของสารหนูในพืช และดิน.....	33
2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของสารหนูในพืช และดิน.....	34
2.6.3 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการใช้พืชในการบำบัดสารโลหะหนัก.....	35
2.6.4 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารโลหะหนัก.....	35
2.6.5 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารโลหะหนัก .....	36
2.6.6 งานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อมวลชีวภาพ และการเจริญเติบโตของพืช.....	38
2.6.7 งานวิจัยที่ประยุกต์ตำแหน่ง และรูปแบบการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ.....	39



บทที่ 3 .....	40
วิธีดำเนินการศึกษา.....	40
3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	40
3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	40
3.2.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในตัวกลางวุ้น และกากโลหกรรม .....	40
3.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง.....	41
3.2.3 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างวุ้น กากโลหกรรม และพืชทดลอง.....	41
3.2.4 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ.....	41
3.2.5 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	42
3.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	42
3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	43
3.3.1 การศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในวุ้น และ	
กากโลหกรรม รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ.....	43
3.3.2 การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการ	
บำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู .....	46
บทที่ 4 .....	50
ผลการศึกษา.....	50
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นและกากโลหกรรมด้วย	
จลนศาสตร์ไฟฟ้า .....	50
4.1.1 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น .....	51
4.1.2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น .....	59
4.1.3 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการเคลื่อนที่ของสาร	
หนูในตัวกลางกากโลหกรรม .....	64
4.2 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการดูดซับและสะสมสารหนูในพืชทดลอง.....	71
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากโลหกรรม .....	72

4.2.2 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และมวลชีวภาพของพืช.....	81
4.2.3 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วย หญ้าเนเปียร์แคระ.....	88
4.3 ผลของการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ .....	93
บทที่ 5 .....	99
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	99
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.1.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ ไฟฟ้า .....	99
5.1.2 การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการ บำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	100
ภาคผนวก .....	101
ภาคผนวก ก.....	102
สถานที่ดำเนินการทดลอง.....	102
ภาคผนวก ข.....	112
วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	112
บรรณานุกรม .....	144
ประวัติผู้เขียน .....	157

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	รายละเอียดของชุดการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า..	51
ตารางที่ 4.2	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูบริเวณวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน).....	60
ตารางที่ 4.3	สมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้นของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง .....	65
ตารางที่ 4.4	รายละเอียดของชุดการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	65
ตารางที่ 4.5	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร .....	67
ตารางที่ 4.6	ค่าความชื้นของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร .....	68
ตารางที่ 4.7	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร .....	70
ตารางที่ 4.8	สมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้นของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง .....	74
ตารางที่ 4.9	ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode).....	75
ตารางที่ 4.10	ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode).....	75
ตารางที่ 4.11	ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode).....	77
ตารางที่ 4.12	ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode).....	78
ตารางที่ 4.13	ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode).....	80
ตารางที่ 4.14	ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode)...	80
ตารางที่ 4.15	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชทดลอง.....	84
ตารางที่ 4.16	เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชทดลอง (ทั้งต้น) .....	86
ตารางที่ 4.17	ปริมาณสารหนูในส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ .....	91

ตารางที่ 4.18 ปริมาณสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะ....92

ตารางที่ 4.19 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในชุดการทดลองให้กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ....92



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา .....	5
รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความต่างศักย์ ออกซิเดชัน รีดอกซ์.....	8
รูปที่ 2.2	กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	14
รูปที่ 2.3	ประเภทของการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	15
รูปที่ 2.4	กระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction).....	17
รูปที่ 2.5	การบำบัดดินปนเปื้อนด้วยกระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า .....	21
รูปที่ 2.6	แผนภาพแสดงลักษณะของอิล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer).....	22
รูปที่ 2.7	ลักษณะหญ้าเนเปียร์ในวงศ์ Pennisetum 1) ราก 2) ดอก.....	26
รูปที่ 2.8	ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun).....	28
รูปที่ 2.9	เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator).....	28
รูปที่ 2.10	เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron) .....	28
รูปที่ 2.11	วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring).....	29
รูปที่ 2.12	ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL).....	30
รูปที่ 2.13	ช่วงของแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light).....	30
รูปที่ 2.14	ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL).....	32
รูปที่ 4.1	การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 1 (1 V cm <sup>-1</sup> ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงกลม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp กลม) และ ข) ชุด การทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl กลม).....	52
รูปที่ 4.2	การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 1 (1 V cm <sup>-1</sup> ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงเหลี่ยม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp เหลี่ยม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl เหลี่ยม) .....	54

รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงกลม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$ กลม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$ กลม) .....	56
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงเหลี่ยม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$ เหลี่ยม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$ เหลี่ยม) .....	58
รูปที่ 4.5 การเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง.....	60
รูปที่ 4.6 ระดับความเข้มข้นของสารหนูบริเวณส่วนที่ 5 ที่ระดับความลึก 11-20 เซนติเมตร (บน) ของภาชนะทดลอง .....	61
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในกากโลหะกรรมที่ระยะเวลา แตกต่างกัน.....	82
รูปที่ 4.8 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR) ของพืชทดลอง.....	84
รูปที่ 4.9 น้ำหนักแห้งของพืชทดลอง ก) ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้น และใบ) และ ข) ส่วนใต้ กากโลหะกรรม (ราก) ที่ระยะเวลาการทดลองที่ต่างกัน.....	87
รูปที่ 4.10 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่สะสมในหญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลาการทดลอง แตกต่างกัน.....	91
รูปที่ 4.11 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลองให้กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ.....	93
รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนรากของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn).....	95
รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนลำต้นของพืชทดลอง ก) รากพืช ทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn).....	96

รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนใบของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง  
ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S)  
และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn).....97



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปนเปื้อนโลหะหนักในปัจจุบันจัดได้ว่าเป็นปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่หลายประเทศทั่วโลกต่างให้ความสนใจ ซึ่งสาเหตุของปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในการพัฒนาระบบเศรษฐกิจภายในประเทศ โดยเฉพาะการทำเหมืองแร่ ที่มีการนำสินแร่ในพื้นที่ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งหากมีการจัดการที่ไม่ถูกต้องและเหมาะสม ก็อาจทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งในดิน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ตะกอนท้องน้ำ และกากโลหะหนักที่ถูกกักเก็บไว้ในบ่อกักเก็บกากแร่ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยการปนเปื้อนโลหะหนักเกิดขึ้นในหลายพื้นที่หลายแห่ง เช่น การปนเปื้อนสารหนูบริเวณตำบลร้อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การปนเปื้อนสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี การปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และการปนเปื้อนตะกั่วทองแดง และสังกะสีที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

จากสถานการณ์การปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทยดังกล่าวมักส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยเฉพาะการปนเปื้อนของสารหนูจากการประกอบกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งกระบวนการทำเหมืองแร่ทองคำมักมีของเสียเกิดขึ้นทั้งในรูปของกากแร่หรือหางแร่ น้ำเสียจากกระบวนการผลิต รวมทั้งยังมีโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นสินแร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อมีการขุดสินแร่ออกมาจึงเป็นสาเหตุหนึ่งในการกระตุ้นให้สารโลหะหนักดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อม ประกอบกับเมื่อเกิดการชะล้างจากน้ำฝนหรือการรั่วซึมจากบ่อกักเก็บกากแร่แล้ว จึงมักส่งผลกระทบและทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักบริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำมากยิ่งขึ้น ซึ่งโลหะหนักที่ปนเปื้อนมีหลายชนิด อาทิ สารหนู แมงกานีส ตะกั่ว และแคดเมียม (สุรภักดิ์, 2553) สารโลหะหนักดังกล่าวมักก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมนุษย์สามารถรับสารโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางหายใจ การรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนัง (กรมควบคุมมลพิษ, 2554; กรมอนามัย, 2557) โดยสารหนูหากได้รับการสัมผัสติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง โรคมะเร็งปอด และมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์และมีฤทธิ์ต่อการกลายพันธุ์ (สัตยพงศ์, 2555; เอกบุระวัฒน์, 2555) ปัจจุบันเทคโนโลยีในการบำบัดและฟื้นฟูโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินนั้นมีวิธีการบำบัดอยู่หลากหลายวิธี โดยแนวคิดของการใช้พืชที่มีชีวิต (Green plants) มาบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหะหนักของการทำเหมืองแร่ทองคำที่ปนเปื้อนสารหนูนั้น คาดว่าจะสามารถช่วยลดการกระจายตัวของสารหนูที่อาจปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ช่วย



ลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายต่ำ และเป็นวิธีการที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติของพืชในการดูดดึงธาตุอาหารต่าง ๆ รวมถึงสารโลหะหนัก และสารมลพิษที่อยู่ในดินได้ อย่างไรก็ตามพืชในแต่ละชนิดจะมีกลไกในการกำจัดสารพิษที่แตกต่างกัน และยังจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดด้วย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อาทิ ศักยภาพของการดูดดึง และความทนทานต่อสารโลหะหนักของพืชแต่ละชนิด (Brown et al., 1995) เป็นต้น

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้นำเทคโนโลยีการใช้พืช (Phytoremediation) และการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic) มาใช้เพื่อบำบัดสารหนูที่สะสมและปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยใช้หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) เป็นตัวกลางในการดูดดึงสารหนูในกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อน สำหรับการเลือกหญ้าเนเปียร์แคระมาทำการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากเป็นพืชชีวมวล (Biomass) ที่ได้รับความสนใจในการผลิตพลังงานทดแทน (Renewable energy) มีต้นทุนในการปลูกต่ำ เจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง และดูแลรักษาง่าย ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการนำไฟฟ้ามาใช้ในการบำบัดสารหนูร่วมกับการปลูกพืชศึกษา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในรุ่น และกากโลหะกรรม รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ป้อน ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด และลักษณะภาชนะที่ทดลอง

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระในการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรม และสะสมไว้ในส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก)

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงปริมาณสนามไฟฟ้าที่ป้อนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และระยะเวลาของการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

## 1.3 สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของการวิจัย

1.3.1 การใช้พลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขั้วอิเล็กโทรดแบบสแตนเลส และรูปแบบภาชนะทรงกลม สามารถทำให้สารหนูเคลื่อนที่และกระจายตัวได้ดีขึ้น

1.3.2 หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรม และสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชในปริมาณที่ต่างกัน

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยนำไปสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชทดลอง สามารถสรุปขอบเขตการศึกษาในครั้งนี้ได้ในรูปที่ 1.1 โดยมีรายละเอียดของขอบเขตการศึกษา ดังต่อไปนี้

1.4.1 พืชที่ใช้ในการทดลอง คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) โดยนำมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

1.4.2 กากโลหะกรรมที่นำมาทำการทดลองได้มาจากบ่อกักเก็บกากแร่ของการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น

1.4.3 ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในรุ่น และกากโลหะกรรมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ได้แก่ ปริมาณสนามไฟฟ้า ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด และลักษณะภาชนะที่ทดลอง สำหรับการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ รุ่น และกากโลหะกรรม โดยได้ทำการเปรียบเทียบปัจจัยที่ต่างกัน ได้แก่ ชนิดขั้วอิเล็กโทรดกราไฟท์ (Graphite) ในภาชนะทรงกลมและทรงเหลี่ยม 4 ชุดการทดลอง โดยป้อนสนามไฟฟ้าแต่ละชุดที่ 0, 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร เช่นเดียวกับการทดลองส่วนที่ใช้ชนิดขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส เกรด 316L (Stainless steel 316L) ในภาชนะทรงกลมและทรงเหลี่ยม 4 ชุดการทดลอง โดยป้อนสนามไฟฟ้าแต่ละชุดที่ 0, 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตรเช่นกัน โดยมีระยะเวลาของการป้อนสนามไฟฟ้าเป็นเวลา 72 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำตัวอย่างรุ่นและกากโลหะกรรม ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด

1.4.4 ทำการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระจำนวน 1 ต้น ต่อหนึ่งกระถาง ในกระถางที่มีกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนอยู่ 11 กิโลกรัม จากนั้นติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า (ชุดควบคุม) 2) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร 3) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ 4) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

1.4.5 ทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้พลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน และเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหะกรรมที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน

1.4.6 ตัวอย่างกากโลหะกรรมและพืชทดลองนำมาทำการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดโดยสกัดกากโลหะกรรมและพืชตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ย่อยด้วยกรดในระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดด้วย ICP-OES

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน และกากโลหะกรรมด้วยพลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.5.2 ทราบสถานะที่เหมาะสมที่ใช้หญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับพลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่มีการปนเปื้อนสารหนู

1.5.3 นำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการบำบัดและฟื้นฟูสารหนูที่ปนเปื้อนในบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำในพื้นที่จริงได้





รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารหนู (Arsenic; As)

สารหนู จัดเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloids) มีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะ (Bowell et al., 2014) สามารถพบมากเป็นลำดับที่ 20 ของโลก ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างมาก ได้แก่ ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ ยารักษาเนื้อไม้ ยาฆ่าแมลง ใช้เป็นเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) และใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรค เป็นต้น แม้ว่าสารหนูจะมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน แต่ก็ยังมีผลเสียและมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ เช่น ส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารและเกิดอาการท้องร่วงอุจจาระเป็นเลือด เป็นต้น

##### 2.1.1 คุณสมบัติและรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู

สารหนูเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33 เป็นธาตุหมู่ที่ 5A โดยทั่วไปสารหนูจะมีสีเทา ลักษณะผิวคล้ายแก้ว มีความเปราะแตกหักง่าย มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 814 องศาเซลเซียส ระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยการระเหยจะเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สามารถระเหิดได้ที่อุณหภูมิ 614 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันหลายค่า คือ -3, 0, +3 และ +5 โดยปกติมักพบเลขออกซิเดชันอยู่ที่ +3 และ +5 ทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์ และอินทรีย์ สารหนูมักถูกพบอยู่ร่วมกับแร่หลายชนิด เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) ทอง (Au) ดีบุก (Sn) นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) (Abad-Valle et al., 2018) ส่วนใหญ่มักพบอยู่ในรูปของอาร์เซเนต (Arsenate) มากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ (Mandal and Suzuki, 2002) ซึ่งแร่แต่ละชนิดจะมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมากน้อยแตกต่างกัน แต่จะพบมากในกลุ่มของแร่ซัลไฟด์และแร่ออกไซด์ เช่น แร่ไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) และแร่สฟาเลอไรต์ ( $\text{ZnS}$ ) มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 100-77,000 และ 5-17,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยที่สารหนูจะไปแทนที่ซัลเฟอร์ในโครงสร้างผลึกของแร่ (Smedley and Kinniburgh, 2002) สำหรับในธรรมชาติมักพบสารประกอบสารหนูซัลไฟด์ในรูปของไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) และอาร์เซโนไพไรต์ ( $\text{FeAsS}$ ) ซึ่งไม่มีความเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจน เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปลดปล่อยซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) รวมทั้งสารหนูออกมา (Bowell et al., 2014) โดยสารหนูที่ถูกปล่อยออกมาจะเกิดการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และถูกดูดซับ (Adsorption) ด้วยอินทรีย์วัตถุ แร่ดินเหนียว และแร่ออกไซด์ โดยเฉพาะเฟอร์รัสออกไซด์ ( $\text{FeO}$ ) และเฟอร์รัสออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{FeOOH}$ ) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงและพบได้ทั่วไปบริเวณเปลือกโลกชั้นนอก อีกทั้งยังสามารถตกตะกอนร่วมกับสารหนูได้ทั้งใน

รูปของอาร์เซเนต (Arsenate) และอาร์เซไนต์ (Arsenite) นอกจากนี้ยังมีความจำเพาะกับอาร์เซเนต (Arsenate) ทำให้เฟอร์รัสออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูสูง ทั้งนี้มีรายงานว่า เฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe(III)OOH}$ ) มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมากกว่า 7,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่เฟอร์รัสออกไซด์มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแร่ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมากกว่า 160 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Smedley and Kinniburgh, 2002)

จากที่กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นได้ว่า สารหนูที่พบในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ สารหนูอนินทรีย์ (Khalid et al., 2016) ซึ่งสารประกอบอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปของ +3 จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) สูงกว่าสารประกอบอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปของ +5 (S. Wang and Mulligan, 2006) โดยสามารถแบ่งได้ตามสถานะออกซิเดชันได้ 3 ประเภท ดังนี้

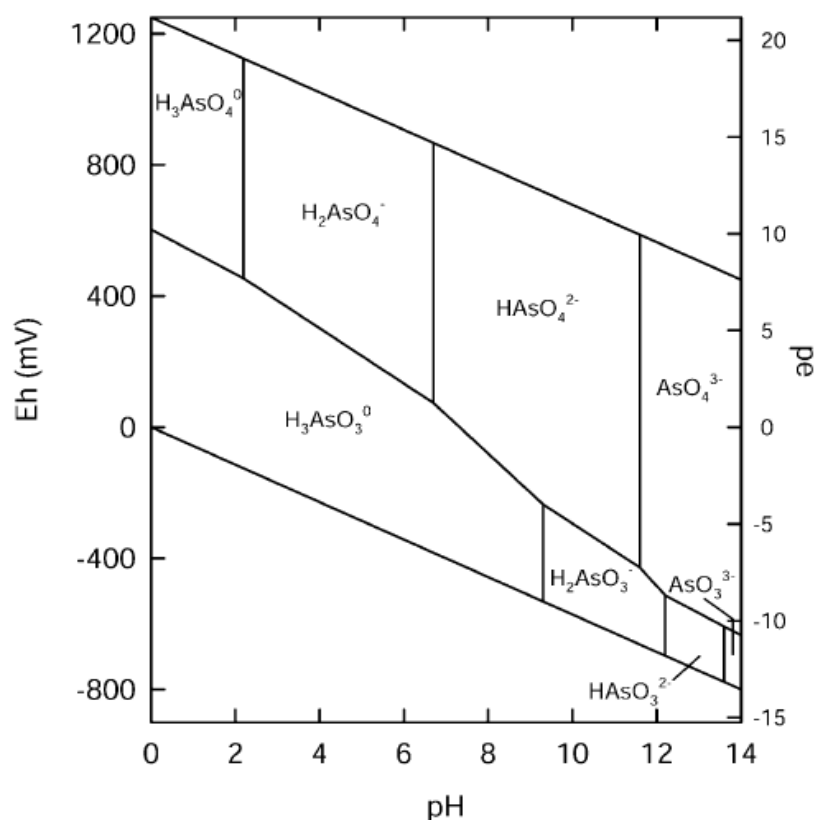
1) สารหนูวาเลนซ์ +3 (Arsenite) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ  $\text{AsO}_3^{3-}$  เป็นสารอนุพันธ์ของกรดอาร์เซนิค (Arsenous acid;  $\text{As}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อน และอยู่ร่วมกับธาตุอื่น เช่น  $\text{Cu}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)(\text{AsO}_3)$  เป็นส่วนประกอบในการผลิตสี เป็นต้น โดยปกติมักพบกลุ่มอาร์เซไนต์ (Arsenite) ได้ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน (Khalid et al., 2016; Mandal and Suzuki, 2002)

2) สารหนูวาเลนซ์ +5 (Arsenate) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ  $\text{AsO}_4^{3-}$  เป็นสารอนุพันธ์ของกรดออร์โทอาร์เซนิก (Orthoarsenic acid;  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) และมักจะอยู่ร่วมกับธาตุอื่น เช่น  $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$  และ  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$  เป็นส่วนประกอบหนึ่งในยาฆ่าแมลง โดยปกติมักพบกลุ่มอาร์เซเนต (Arsenate) ได้ในสถานะที่มีออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ (Wang and Mulligan, 2006; Smedley and Kinniburgh, 2002)

3) ก๊าซอาร์ซีน (Arsine;  $\text{AsH}_3$ ) เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุน ระเหยง่าย มีความเป็นพิษสูงสุด ถ้าสูดดมหรือหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโลหิต ทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง เนื่องจากก๊าซอาร์ซีน (Arsine;  $\text{AsH}_3$ ) จะจับตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และทำลายเม็ดเลือดแดงในเวลาต่อมา ก๊าซนี้ไม่เสถียร มีความสามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่าย โดยทั่วไปมักจะเกิดได้ในน้ำตามธรรมชาติที่มีตัวลดออกซิเจน แล้วจะทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ กลายเป็นแร่จำพวกซิลไฟด์ และอาร์เซไนต์ได้

นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความต่างศักย์ ออกซิเดชัน รีดักชัน (Oxidation reduction potential; Eh) ที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้รูปฟอร์มทางเคมีของอาร์เซเนต (Arsenate) และอาร์เซไนต์ (Arsenite) เปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น บริเวณสถานะที่มีออกซิเจน และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 0-2 มีโอกาสพบสารหนูส่วนใหญ่ในรูปของกรดอาร์เซนิก ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เพิ่มขึ้น สารหนูจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไดไฮโดรเจนอาร์เซเนต ไอออน ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) ไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออน ( $\text{HAsO}_4^{2-}$ ) และอาร์เซเนตไอออน ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) ส่วนบริเวณ

ที่ไม่มีออกซิเจนจะมีโอกาสพบสารหนูในรูปของกรดอาร์เซนัส ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) มากกว่าปกติ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 0-9 เมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เพิ่มขึ้น สารหนูจะอยู่ในรูปของไดไฮโดรเจนอาร์เซนิต์ไอออน ( $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ) ไฮโดรเจนอาร์เซนิต์ไอออน ( $\text{HAsO}_3^{2-}$ ) และอาร์เซนิต์ไอออน ( $\text{AsO}_3^{3-}$ ) ตามลำดับ (Wang and Mulligan, 2006; Smedley and Kinniburgh, 2002) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความต่างศักย์ ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; Eh) ต่อรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู  
ที่มา: Smedley and Kinniburgh (2002)

### สำหรับคุณสมบัติของสารหนูแต่ละประเภทสามารถจำแนกได้ดังนี้

#### 1) โลหะ มีลักษณะเป็นของแข็งหรือผง ไม่ละลายน้ำ มี 3 ประเภท ได้แก่

1.1) สารหนูในรูปของแร่โลหะ (Metallic arsenic) มีลักษณะสีเทา จุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียส (ภายใต้ความดันบรรยากาศ 36 ในภาวะขณะปิด) ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เย็น แต่ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) หรือกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ที่ร้อน และเปลี่ยนไปเป็นกรดอาร์เซนัส (Arsenous) ได้

1.2) สารหนูสีเหลือง (Yellow arsenic) ลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีความถ่วงจำเพาะ 1.97 และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารหนูในรูปของแร่โลหะ (Metallic arsenic) ได้ง่ายเมื่อถูกความร้อนหรือแสง

1.3) สารหนูในรูปของอสัณฐาน (Amorphous arsenic forms) เป็นสารหนูที่มีลักษณะสีดำ รูปร่างไม่แน่นอน ความถ่วงจำเพาะ 3.7 สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นสารหนูในรูปของแร่โลหะ (Metallic arsenic) ได้ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

2) สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู (Inorganic arsenic compounds) ประกอบด้วย

2.1) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide;  $As_2O_3$ ) เป็นสารเคมีที่เกิดจากการถลุงโลหะหรือแร่จำพวกกำมะถันที่มีสารหนูประกอบอยู่ด้วย เมื่อโลหะหรือแร่ดังกล่าวถูกเผา ไอรระเหยที่เกิดจากการเผาจะจับตัวกันตามผนังของปล่องไฟ ลักษณะเป็นผงสีขาว เรียกว่า สารหนูสีขาว (White arsenic) หรืออาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide) โดยมีน้ำหนักโมเลกุล 197.82 มีองค์ประกอบดังนี้ สารหนู 75.74% ออกซิเจน 24.26% ความถ่วงจำเพาะ 3.74–4.15 จุดเดือดอยู่ที่ 465 องศาเซลเซียส สำหรับคุณสมบัติของการละลายนั้น Arsenic trioxide มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมากอยู่ที่ 2% ที่ 25 องศาเซลเซียส และ 8.2% ที่ 98 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสถานะของสารละลายที่เป็นต่าง ซึ่งสารหนูจะอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (Arsenite)

2.2) อาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (Arsenic pentoxide;  $As_2O_5$ ) เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide;  $As_2O_3$ ) กับกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 229.82 มีองค์ประกอบดังนี้ สารหนู 65.20% ออกซิเจน 34.81% ความถ่วงจำเพาะ 4.086 และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 315 องศาเซลเซียส

2.3) กรดออร์โธอาร์เซนิก (Orthoarsenic acid;  $H_3AsO_4$ ) สังเคราะห์ได้จากการนำอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide;  $As_2O_3$ ) ละลายในกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) หลังจากนั้นนำสารละลายนี้ไประเหยจะได้ผลึกสีขาว โดยที่มีน้ำหนักโมเลกุล 141.93 มีองค์ประกอบดังนี้ สารหนู 52.78% ไฮโดรเจน 2.13% และออกซิเจน 45.09% ละลายได้ดีในน้ำ และแอลกอฮอล์

2.4) กรดอาร์เซนัส (Arsenous acid;  $H_3AsO_3$ ) เกิดจากการละลายของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide;  $As_2O_3$ )

2.5) อาร์เซไนต์ (Arsenite) มีสูตรโมเลกุล คือ  $MH_2AsO_3$ ,  $M_2HAsO_3$  และ  $M_3AsO_3$  โดยที่ M เป็นโลหะวาเลนซ์ 1 หรือกลุ่มของอิกอนที่มีวาเลนซ์ 1 คุณสมบัติการละลายน้ำของพวกเกลืออาร์เซไนต์นั้นมีความสามารถละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังมีกลุ่มจำพวกโลหะหนักและเกลืออาร์เซไนต์ที่สำคัญ ได้แก่



2.5.1) ทองแดง (Cupric arsenite;  $\text{CuHAsO}_3$ ) มีองค์ประกอบที่เป็นสารหนูอยู่ถึง 40% มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเหลือง น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 187.5 สามารถละลายได้ในกรดเจือจาง และแอมโมเนีย

2.5.2) ตะกั่ว (Lead arsenite;  $\text{Pb}(\text{AsO}_2)_2$ ) มีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณ 35% ตะกั่ว 49% มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 421.03 ความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 5.85 ไม่ละลายน้ำ และสามารถละลายได้ในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ที่เจือจางเท่านั้น

2.5.3) โซเดียม (Sodium arsenite;  $\text{NaAs}_2\text{O}_2$ ) มีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณ 57.6% มีลักษณะเป็นผงสีเทา น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 129.9 สามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำร้อนหรือน้ำเย็น ส่วนในแอลกอฮอล์นั้นสามารถละลายได้เล็กน้อย

2.6) อาร์เซเนต (Arsenate) เป็นกลุ่มโลหะหนักและเกลือในส่วนของการดอาร์เซนิค ได้แก่

2.6.1) แคลเซียม (Calcium arsenate;  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ ) มีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณ 38% มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 396.06 สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย

2.6.2) ตะกั่ว (Lead arsenate;  $\text{PbHAsO}_4$ ) มีสารหนูเป็นองค์ประกอบประมาณ 21.6% ตะกั่ว 60% มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 347.14 ความถ่วงจำเพาะ 5.79 ไม่ละลายน้ำ สามารถละลายได้ในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ที่เจือจาง รวมทั้งในต่างด้วย

2.7) สารหนูในรูปสารประกอบเฮไลด์ (Halides of arsenic) โดยทั่วไปแล้วมักไม่ค่อยพบ แต่สามารถพบได้ในการวิเคราะห์ทางเคมี สารประกอบที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่

2.7.1) อาร์เซนิคไตรคลอไรด์ (Arsenic trichloride;  $\text{AsCl}_3$ ) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 181.28 ประกอบด้วยสารหนูประมาณ 41.32% คลอรีน 58.68% มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายน้ำมันสีค่อนข้างเหลือง

2.7.2) อาร์เซนิคไตรโบรไมด์ (Arsenic tribromide;  $\text{AsBr}_3$ ) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 314.66 ประกอบด้วยสารหนูประมาณ 23.81% โบรมีน 76.19%

2.7.3) อาร์เซนิคไตรฟลูออไรด์ (Arsenic trifluoride;  $\text{AsF}_3$ ) สถานะเป็นของเหลว น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 131.91 ประกอบด้วยสารหนูประมาณ 56.79% ฟลูออไรด์ 43.21%

2.8) อาร์เซนิคซัลไฟด์ (Arsenic sulfides;  $\text{As}_2\text{S}_3$ ) เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำต่ำเมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน และตัวกลางที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide;  $\text{H}_2\text{S}$ ) สารประกอบนี้จะสะสมและเกิดการตกตะกอนลงมาได้

3) สารประกอบอินทรีย์ของสารหนู (Organic arsenic compounds) เป็นประเภทสารประกอบอินทรีย์ของสารหนูที่มีความสำคัญ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสารที่เติม

ในอาหารสัตว์ และยารักษาโรคสัตว์ที่สำคัญ ได้แก่ Arsenic acid 3-nitro-4-hydroxyphenylarsonic acid และ 3-nitro-4-ureidophenylarsonic acid

4) ก๊าซ สารหนูที่อยู่ในรูปของก๊าซ คือ อาร์ซีน (Arsine หรือ Arsenic hydride;  $AsH_3$ ) เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ทำปฏิกิริยากับ Nascent hydrogen หรือเกิดขึ้นเมื่อ Metallic arsenide ทำปฏิกิริยากับน้ำ และให้ก๊าซอาร์ซีนออกมา ซึ่งก๊าซนี้มีความเป็นพิษสูง แม้ว่าจะไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง และมีความสามารถในการละลายน้ำได้

### 2.1.2 การปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อม

สารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Mandal and Suzuki, 2002) ซึ่งในอดีตจนถึงปัจจุบันมีสารหนูที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ 1) การทำเหมืองแร่ 2) การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล 3) น้ำยารักษาเนื้อไม้ 4) สารเคมีทางการเกษตร เช่น สารกำจัดวัชพืช และสารกำจัดแมลง และ 5) อาหารและยาที่ใช้ในปศุสัตว์ (Khalid et al., 2016; Bowell et al., 2014; Mandal and Suzuki, 2002) สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนสารหนูในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่มาจากการทำเหมืองแร่เป็นหลัก ซึ่งการทำเหมืองแร่มักส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีเคมี โดยเฉพาะในพื้นที่ ๆ ประกอบด้วยแร่ซัลไฟด์จะเกิดการปลดปล่อยสารหนูจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ รวมทั้งก่อให้เกิดผลกระทบอย่างต่อเนื่องเป็นบริเวณกว้างจากการรั่วไหลของน้ำเหมืองที่มีความเป็นกรด (Acid mine drainage, AMD) ออกสู่สิ่งแวดล้อม (Changul et al., 2009; Paktunc, 2013; Yang et al., 2009) นอกจากนี้ที่กล่าวมานั้น การทำเหมืองแร่ยังส่งผลให้เกิดของเสียในรูปของกากโลหะกรรม (Mine tailing) ที่ปนเปื้อนโลหะหนักและสะสมอยู่ในปริมาณมากบริเวณพื้นที่บ่อกักเก็บกากแร่ Tailing storage facility (TSF) โดยถ้ามีการจัดการที่ไม่เหมาะสมจะทำให้สารพิษมีโอกาสถูกชะล้างเกิดเป็นน้ำเหมืองที่มีสถานะเป็นกรดและรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม และอาจก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่โดยรอบเหมืองแร่ตามมาภายหลังได้ (Changul et al., 2009; Paktunc, 2013; Yang et al., 2009) ทั้งนี้มีรายงานเกี่ยวกับพื้นที่ประกอบการเหมืองแร่เงิน (Ag) ทองคำ (Au) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) มีความเกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่นาข้าวที่อยู่บริเวณโดยรอบพื้นที่เหมืองแร่ (Kumarathilaka et al., 2018) สำหรับประเทศไทยนั้นมีตัวอย่างผลกระทบที่เกิดจากการรั่วไหลของกากโลหะกรรมจากเหมืองแร่ตึบก่าในพื้นที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 9,780-14,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากโลหะกรรม ซึ่งการรั่วไหลที่เกิดขึ้นนั้นทำให้มีการปนเปื้อนสารหนูในรูปของอาร์เซนไฟไรต์ในดินบริเวณโดยรอบและมีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 21-3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน นอกจากนี้ยังมีรายงานเกี่ยวกับการทำเหมืองแร่ทองคำที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยก่อให้เกิดกากโลหะกรรม 750,000 ตันต่อปี หมายความว่า ตลอด

อายุสัมปทานจะก่อให้เกิดกาโหลทกรรมกว่า 19 ล้านตัน (Changul et al., 2009) ซึ่งกาโหลทกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำในพื้นที่ดังกล่าว ได้แก่ จังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sampanpanish and Suwattiga, 2017)

### 2.1.3 การสะสมและความเป็นพิษของสารหนูที่มีต่อพืช

สารหนุนั้นไม่จัดเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไปแล้วเมื่อสารหนูเข้าไปสะสมไว้ในพืชเพียงความเข้มข้นประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสามารถส่งผลกระทบต่อพืชในด้านความเป็นพิษได้ (Sharma and Sohn, 2009) ในสภาวะปกติพืชสามารถดึงดูดสารหนูที่อยู่ในดินที่ปนเปื้อนเข้าสู่ต้นพืช และลำเลียงเคลื่อนย้ายไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ ซึ่งพืชส่วนใหญ่จะไม่มีกลไกการย่อยสลายสารพิษที่ดูดเข้าไปได้ (Sakakibara et al., 2010) นอกจากนี้สารหนูที่สะสมอยู่ในพืชสามารถเข้าไปขัดขวางหรือก่อให้เกิดความผิดปกติในกระบวนการเมตาบอลิซึม ส่งผลให้มวลชีวภาพลดลง เช่น ราก ความยาวลำต้น และมีมวลลดลง รวมทั้งการเจริญเติบโตในส่วนของอัตราการงอก และผลผลิตลดลงด้วย (Ahmed et al., 2006) จากผลเสียที่กล่าวมานั้นยังมีผลด้านอื่น ๆ ที่เกิดกับพืชอีก เช่น เซลล์ และเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ของพืชถูกทำลาย ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชผิดปกติไปจากเดิม

### 2.1.4 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ความเป็นพิษของสารหนูที่มีผลต่อมนุษย์นั้นสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) อาการพิษแบบเรื้อรัง หากได้รับสารหนูติดต่อกันเป็นระยะเวลาานาน จะส่งผลให้เกิดรอยดำดำที่ผิวหนัง อาจมีเส้นสีขาวบนเล็บ และผิวหนังหนาขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการชาตามปลายมือปลายเท้า บางกรณีที่เป็นมากอาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงร่วมด้วย ยิ่งไปกว่านั้นสารหนูยังจัดได้ว่าเป็นสารก่อมะเร็งผิวหนัง มะเร็งปอด รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์ (เกศ สัตยพงศ์, 2555)

2) อาการพิษแบบเฉียบพลัน มักส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสกับสารหนู และอาจก่อให้เกิดการปวดศีรษะ แสบร้อน คลื่นไส้ หายใจติดขัด และเจ็บหน้าอก เป็นต้น นอกจากนี้การสัมผัสในรูปที่เป็นของแข็งจะทำให้เกิดโรคไอโลหะ (Metal fume fever) จะทำให้มีอาการไอสูง หอบเหนื่อยง่าย และแน่นหน้าอก

อย่างไรก็ตามจากที่กล่าวมานั้นสารจำแนกอาการที่แสดงออกทางระบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.1) บริเวณผิวหนัง (Skin) ผิวหนังส่วนที่สัมผัสกับสารหนูจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็นโรคผิวหนัง โดยเฉพาะผิวหนังที่อยู่ตามมุมอับต่าง ๆ เช่น หู หนึ่งตา และมุมปาก เป็นต้น บางครั้งอาจเกิดบริเวณผิวหนังที่แข็งด้าน โดยเฉพาะที่ฝ่าเท้า ฝ่ามือ ผิวหนังอาจจะหลุดลอกออกมาได้ หรือบริเวณที่สัมผัสจะเป็นจุดสีคล้ายกับหูด ซึ่งเป็นสัญญาณของโรคมะเร็งผิวหนัง

2.2) บริเวณเยื่อเมือก (Mucous membrane) เมื่อสัมผัสกับฝุ่นผงหรือก๊าซจะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนนั้น และฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปปอด มีอาการคล้ายการเป็นหวัด

2.3) บริเวณตา (Eyes) ตาอาจเกิดการแดง และเกิดการอักเสบ (Conjunctivitis)

2.4) ระบบการหายใจ สารหนูจะไปสะสมที่ปอด ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบ อาจจะมีผลทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด

2.5) ระบบประสาท สารหนูเมื่อเข้าไปสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตจะไปมีผลต่อน้ำย่อย (Cellular enzyme) ที่ช่วยในการเมตาบอลิซึม ทำให้หน้าที่ในการทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ แขนขาชา และอาจเป็นอัมพาตได้

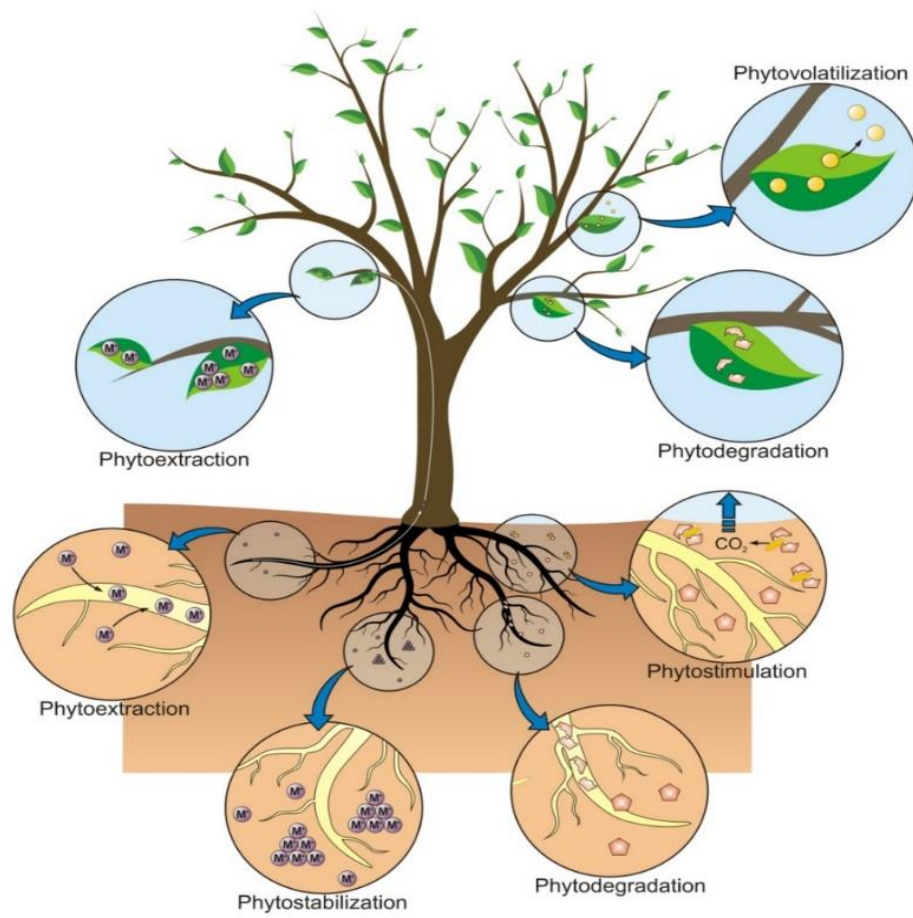
2.6) สารหนูสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง เกิดการกระสับกระส่าย และความจำเสื่อม

2.7) อื่น ๆ เช่น เกิดโรคโลหิตจาง อาการทางตับ และไต เป็นต้น

## 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

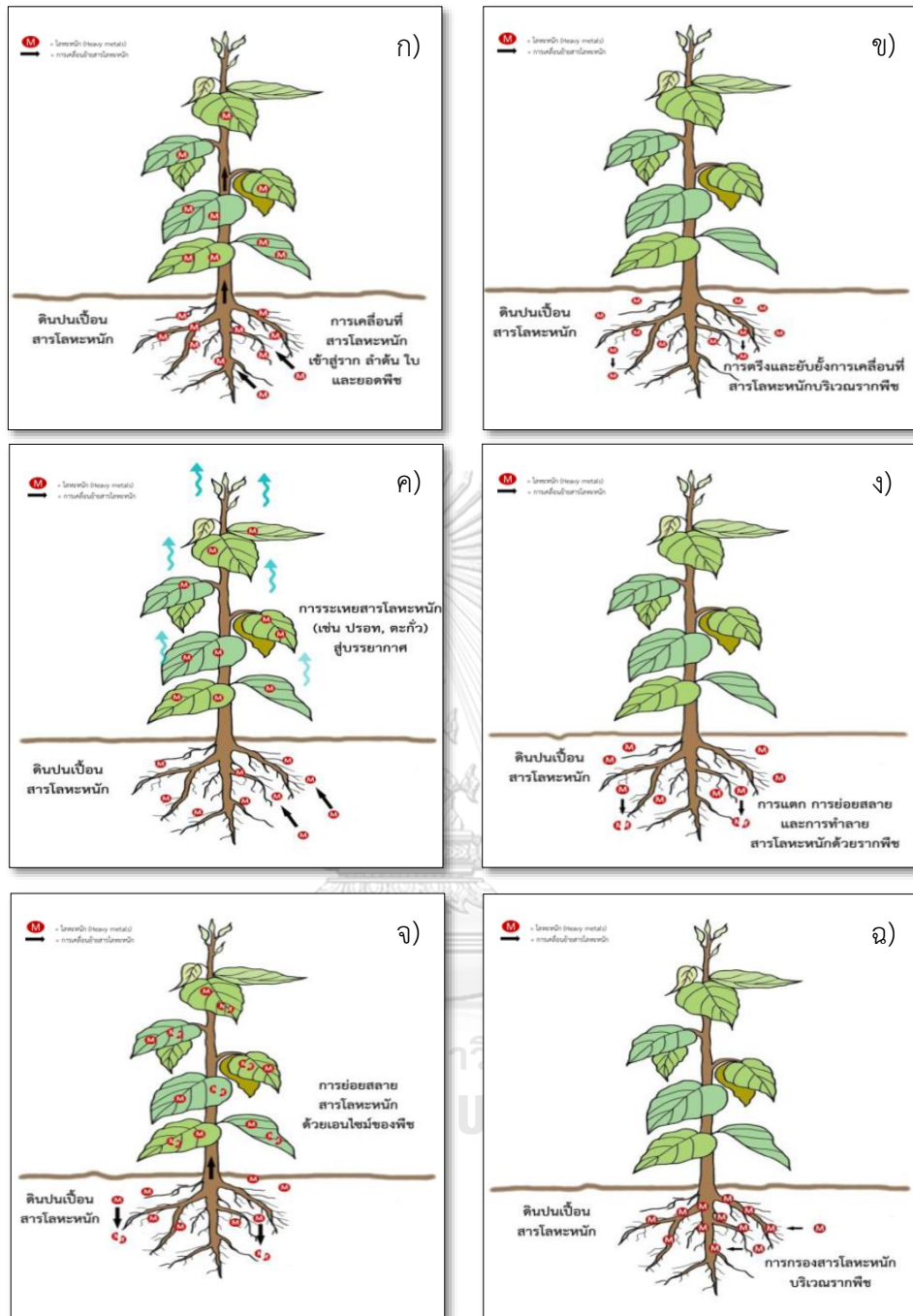
### 2.2.1 ความหมาย

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้พืชที่มีชีวิต (Green plant) ในการบำบัด และฟื้นฟูพื้นที่ ๆ มีการปนเปื้อนสารมลพิษต่าง ๆ โดยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดอันตรายหรือความเป็นพิษของสารมลพิษที่สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถใช้ในการบำบัด รวมทั้งสามารถกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในดิน น้ำ และอากาศได้ เช่น เบนซีน (Benzene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) ไชลีน (Xylene) โทลูอีน (Toluene) นิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclides) และโลหะหนัก (Heavy metals) ดังรูปที่ 2.2 สิ่งสำคัญของการบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช คือ การเลือกใช้ชนิดของพืชสำหรับการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ยิ่งไปกว่านั้นยังต้องมีความเข้าใจในด้านพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัด และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม เพื่อช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ดังนั้นเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชจึงเป็นแนวทางเลือกอีกหนึ่งวิธี สำหรับใช้ในการบำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นยังเป็นวิธีการในการบำบัดสารมลพิษที่ใช้ต้นทุนต่ำ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการที่มีต้นทุนสูงและเป็นสาเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้สารเคมี วิธีชะล้างดิน (Soil washing) และการตัดหรือขุดลอกหน้าดินไปกำจัดนอกพื้นที่ปนเปื้อน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

ที่มา: Joao et al. (2014)



รูปที่ 2.3 ประเภทของการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

- ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ข) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization)
- ค) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation) จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation)
- และ ฉ) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration)

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

## 2.2.2 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชมีหลายประเภท (ดังรูปที่ 2.3) ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ดังนี้

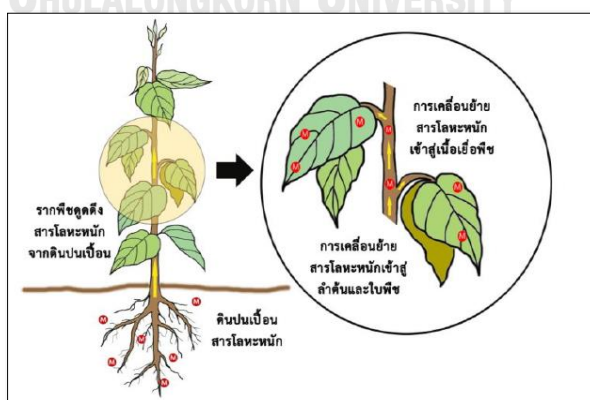
1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) หรือเรียกอีกอย่างว่า การสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation) การสกัดสารมลพิษด้วยพืชเป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดินหรือตะกอนดิน โดยการปลูกพืชเพื่อให้เกิดการดูดซับสารมลพิษโดยผ่านรากของพืช แล้วเคลื่อนย้ายสารมลพิษไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลำต้น และใบ (ดังรูปที่ 2.3 ก) จากที่กล่าวมา ยังมีปัจจัยสำคัญหลายประการที่จำกัดการบำบัดสารโลหะหนัก (Metal phytoextraction) เช่น อัตราการดูดซับสารโลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (Metal bioavailability) ปริมาณของสารโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยพืช ความสามารถของเซลล์พืชในการทนทานต่อสารโลหะหนักที่เป็นพิษ ดังนั้นชนิดของพืชที่ใช้ในการบำบัด จึงควรมีความสามารถในการสะสมสารโลหะหนักผ่านทางรากพืชได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสารโลหะหนักไปสู่ส่วนเหนือลำต้นของพืชได้ดี นอกจากนี้สิ่งทีกล่าวนั้น พืชควรที่จะมีกลไกในการลดความเป็นพิษของสารโลหะหนัก (Detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสารโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งประเภทของสารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ได้แก่ แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง พรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น อีกทั้งยังมีประเภทของสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ได้แก่ สตรอนเชียม-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) ซีเซียม-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) พลูโทเนียม-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) ยูเรเนียม-238 ( $^{238}\text{U}$ ) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) สามารถแบ่งกระบวนการบำบัดนี้ได้ 2 ชนิด คือ การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ และทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยพอประมาณ (Natural phytoextraction) และการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดิน (Induced phytoextraction) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1.1) การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ และทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยพอประมาณ (Natural phytoextraction) เพราะพืชบางชนิดสามารถเจริญเติบโตโดยที่ไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่สามารถอาศัยน้ำจากฝนตามธรรมชาติ ส่วนบริเวณใบ และลำต้นของพืชที่มีการสะสมสารมลพิษ จะถูกเก็บเกี่ยว และทำการบำบัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป ชนิดพืชที่เลือกใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติของพื้นที่ดั้งเดิมหรือถิ่นอาศัยแรกเริ่ม และมีความสามารถในการทนทานต่อความเข้มข้นของสารโลหะหนักหรือสารมลพิษอื่น ๆ โดยปกติประเภทของพืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตช้าเล็กน้อย และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่มาก



1.2) การบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดิน (Induced phytoextraction) หรือการเติมสารชักนำ (Inducing agent) เช่น สารคีเลต (Chelate) เพื่อทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากกว่าปกติ อีกทั้งยังส่งผลให้มีการเพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดของสารมลพิษด้วย

การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ที่กล่าวมานั้น สามารถพบในพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) คือ กลุ่มพืชที่สามารถดึงดูดสารโลหะหนักขึ้นไปสะสมในปริมาณที่มากกว่าปกติไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ (ดังรูปที่ 2.4) สำหรับในปัจจุบันพืชกลุ่มนี้มีมากกว่า 400 ชนิด ซึ่งได้มีการนำพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์มาใช้ในการทดลองบำบัด และฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น ดิน และน้ำ เป็นต้น โดยเฉพาะที่พบมากในปัจจุบัน คือ การบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินด้วยพืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีการดูดดึงสารอาหาร แร่ธาตุ หรือโลหะหนักในอัตราส่วน และปริมาณที่แตกต่างกัน ชนิดของพืชที่มีความเหมาะสมสำหรับบำบัด และฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนควรเป็นพืชที่มีลักษณะดังนี้ 1) มีความสามารถในการดูดดึง และสะสมโลหะหนักจากดินได้ในระดับปริมาณความเข้มข้นที่สูง 2) สามารถเจริญเติบโตได้ดี และมีความทนทานต่อปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ได้ดี 3) ไม่แสดงอาการความเป็นพิษ 4) ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา 5) มีวงจรชีวิตสั้น ขยายพันธุ์ได้ดี และมีปริมาณมวลชีวภาพมาก และ 6) เป็นพืชที่ทั้งคนและสัตว์กินไม่ได้ โดยปกติแล้วพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์จะมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากแม้ว่าในดินจะมีปริมาณโลหะหนักในปริมาณที่ต่ำ สิ่งสำคัญที่สุด คือ พืชจะต้องมีการสะสมโลหะหนักในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) มากกว่าในส่วนใต้ดิน (รากและส่วนอื่น ๆ) หลายเท่าตัว



รูปที่ 2.4 กระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction)

ที่มา: พันธวิศ สัมพันธ์พานิช (2558)



2) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) (ดังรูปที่ 2.3 ข) เป็นการปลูกพืชเพื่อยับยั้งหรือลดการเคลื่อนที่ของสารมลพิษต่าง ๆ ในดินหรือตะกอนดิน โดยมีหลักการ คือ อาศัยความสามารถของรากพืชเพื่อที่จะจำกัดการเคลื่อนที่ และการดูดจับของสารมลพิษในดินหรือตะกอนดิน ชนิดของพืชที่ใช้ควรมีความสามารถในการลดปริมาณการซึมผ่านของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างระหว่างเม็ดดิน เพื่อเป็นการลดปริมาณสารมลพิษที่ปนเปื้อนไม่ให้แพร่กระจายไปสู่ชั้นใต้ดิน วิธีการนี้ยังเป็นการป้องกันการสึกกร่อนของหน้าดิน และลดการกระจายของสารมลพิษไปยังบริเวณอื่น ๆ การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีนี้ ยังสามารถเกิดขึ้นได้โดยผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorptions) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) และการรีดิวซ์เวเลนซีโลหะ (Metal valence reduction) สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม โครเมียม ทองแดง และสารหนู เป็นต้น

3) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) (ดังรูปที่ 2.3 ค) เป็นการปลูกพืชเพื่อไปดูดจับสารมลพิษด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเอง ซึ่งพืชกลุ่มนี้จะมีการเปลี่ยนแปลง (Transformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่สามารถระเหยได้ และมีความเป็นพิษน้อยกว่าเดิม กระบวนการต่อมาสารมลพิษที่อยู่ในรูปที่สามารถระเหยได้จะสามารถถูกกำจัดออกทางใบพืช ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจ และศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อการปรับปรุงพันธุ์พืชที่สามารถทำหน้าที่นี้ได้เป็นอย่างดี โดยสารโลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ปรอท

4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation) (ดังรูปที่ 2.3 ง) เป็นการย่อยสลายสารมลพิษบริเวณรอบ ๆ รากพืช โดยกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ถูกกระตุ้นจากรากพืช ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) การที่รากพืชช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของดิน เช่น การขอนไช และการหยั่งลึกของรากพืชเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แก่ดิน ส่งผลให้สารอาหาร และน้ำแพร่ลงไปสู่ดินชั้นล่างได้ดีขึ้น ถือเป็น การปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารพิษได้ (Lee et al., 2008; Merkl et al., 2005; S. Y. Xu et al., 2006) และ (2) สารที่หลั่งออกมาจากรากพืชยังสามารถช่วยกระตุ้นการย่อยสลายสารมลพิษได้ โดยที่สารที่หลั่งจากบริเวณรากพืชนั้นเป็นได้ทั้งสารลดแรงตึงผิว เอนไซม์ รวมทั้งสารอาหาร เพื่อกระตุ้นให้จุลินทรีย์ใช้สารอาหารในการย่อยสลายสารพิษได้ด้วย (Cheema et al., 2010) สารเคมีที่หลั่งจากรากพืชที่สามารถพบโดยทั่วไป ได้แก่ กรดอะมิโน (Amino acid) น้ำตาล (Sugar) และฟีนอล (Phenol) เป็นต้น ในปัจจุบันนั้นสามารถใช้ปริมาณฟีนอล (Phenol) ที่พืชหลั่งออกมาเป็นตัวคัดเลือกพืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัด และฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนได้ เนื่องจากฟีนอล (Phenol) เป็นสารที่มีโครงสร้างคล้ายกับสารตัวกลางในการย่อยสลายพีเอเอช (PAHs) ดังนั้นพืชที่หลั่งฟีนอล (Phenol) สามารถกระตุ้นให้แบคทีเรียที่อาศัยอยู่รอบรากพืชสามารถผลิตเอนไซม์ที่ไม่มีความจำเพาะเจาะจงกับฟีนอล (Phenol) เพียงอย่างเดียวมาย่อยสลายสารกลุ่มพีเอเอช (PAHs) ที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกันได้ (Cheema et al.,

2010; Lee et al., 2008) ซึ่งบริเวณรอบรากพืชเป็นบริเวณที่มีการย่อยสลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงมาก (Newman, 2004) เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอบรากพืชดังกล่าวจะมีปริมาณจุลินทรีย์มากกว่าในดินที่ไม่มีการปลูกพืชประมาณ 10-100 เท่า (Gerhardt et al., 2009) นอกจากนี้แล้ว การศึกษาของ Sheng-Yu et al., (2005) พบว่า การปลูกพืช *Trifolium repens* ซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วร่วมกับการทำงานของจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืชจะสามารถช่วยกำจัดไพรีน (Pyrene) ที่ปนเปื้อนในดินได้ถึง 77% การลดลงของไพรีน (Pyrene) ที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช การทำงานร่วมกันระหว่างพืช และจุลินทรีย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไพรีน (Pyrene) สูงกว่าดินที่ไม่เติมจุลินทรีย์ และดินที่เติมเฉพาะจุลินทรีย์แต่ไม่ปลูกพืชถึง 57% และ 31% ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Batty and Anslow (2008) พบว่า เมื่อปลูกผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ซึ่งเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมสังกะสีได้ดีกับหญ้าทอลเฟสคิว (*Festuca arundinacea*) ซึ่งเป็นพืชที่ไม่สะสมสังกะสี แต่มีความสามารถในการทนทานต่อสังกะสี และสารประกอบกลุ่มโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) โดยปลูกลงในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 8,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมร่วมกับไพรีน (Pyrene) 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า การปนเปื้อนทั้งไพรีน (Pyrene) และสังกะสีส่งผลให้ชีวมวลของพืชลดลง แต่ทำให้เกิดการสะสมสังกะสีในเนื้อเยื่อของพืชมากขึ้น ส่วนผลต่อการย่อยสลายไพรีน (Pyrene) นั้นไม่มีการศึกษา

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation) (ดังรูปที่ 2.3 จ) เป็นกระบวนการผลิตเอนไซม์ของพืชที่ใช้สำหรับการย่อยสลาย โดยที่มีทั้งที่เป็นเอนไซม์ที่สร้างภายในเซลล์ และเอนไซม์ที่หลั่งออกมานอกเซลล์ หากการย่อยสลายเกิดภายในเซลล์พืชต้องขนส่งสารเข้าสู่เซลล์พืชก่อนจึงจะถูกย่อยสลายได้ สารที่ขนส่งเข้าสู่เซลล์พืชได้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในระหว่างชั้นออกทานอล (n-octanol) และชั้นน้ำ (Water partition coefficient, Log Pow) อยู่ระหว่าง 1 และ 3.5 (Morikawa and Erkin, 2003) เอนไซม์ที่มีบทบาทในกระบวนการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืชมีหลายชนิด ได้แก่ ดีฮาโลจีเนส (Dehalogenase) ช่วยย่อยสลายสารที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทฟีนอล (Phenol) ไนโตรรีดักเตส (Nitroreductase) และช่วยเปลี่ยนแปลงสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ไนไตรเลส (Nitrilase) ช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทไซยาเนตที่มีโครงสร้างแบบวงอะโรมาติก และฟอสฟาเตส (Phosphatase) รวมทั้งช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทออร์กาโนฟอสเฟต เป็นต้น (Susarla et al., 2002) โดยทั่วไป เอนไซม์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายสารมลพิษที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) และดีฮาโลจีเนส (Dehalogenase) (Sheng-wang et al., 2008) โดยเฉพาะเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารกลุ่มอะโรมาติก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมักเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเดียวกับเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายสารประเภทฟีนอล (Phenol)

การย่อยสลายสารโดยเอนไซม์จากพืชมีบทบาทในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมน้อยมาก เนื่องจากการย่อยสลายสารมลพิษโดยเอนไซม์จากพืชเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์เหมือนกับการย่อยสลายสารที่เกิดจากจุลินทรีย์ ดังนั้นการย่อยสลายสารมลพิษจากพืชจึงมักส่งผลให้เกิดสารตัวกลางที่เป็นพิษมากกว่าเดิม และอาจสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืช และสามารถถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารได้ (Perelo, 2010)

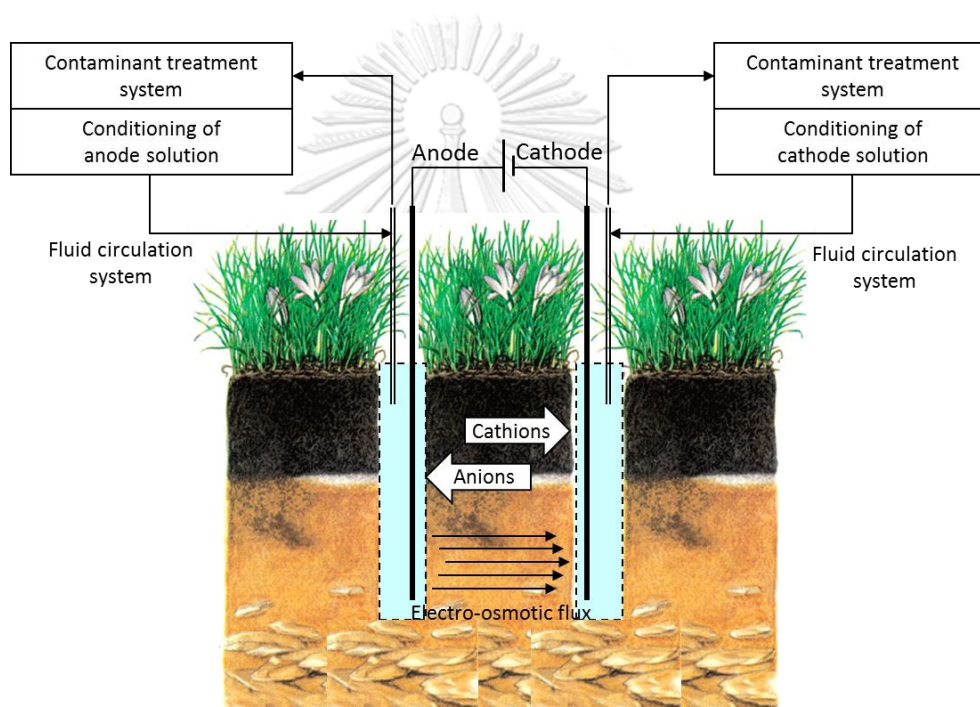
6) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration) (ดังรูปที่ 2.3 ฉ) เป็นการปลูกพืชเพื่อใช้บำบัดสารมลพิษ โดยการใช้รากพืชในการดักกรองสารมลพิษ หรือดูดซึมสารมลพิษในน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยในการลดปริมาณสารมลพิษได้ ทั้งนี้เฉพาะส่วนของรากพืชที่สะสมสารมลพิษเท่านั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดในขั้นตอนต่อไป ส่วนของใบ และลำต้นที่ไม่ปนเปื้อน ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวสามารถนำไปทิ้งหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ซึ่งขึ้นกับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงามจึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลาระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย ทั้งนี้สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม เป็นต้น สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น  $^{137}\text{Cs}$  และ  $^{238}\text{U}$  เป็นต้น

## 2.3 กระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic treatment)

### 2.3.1 หลักการของกระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปเป็นสิ่งที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ทั้ง คน สัตว์ และพืช หากมีระดับความเข้มข้นที่สูงพอ ซึ่งมีสาเหตุจากกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งจากธรรมชาติ และมนุษย์ ทำให้โลหะหนักมีการสะสมอยู่ในระดับความเข้มข้นที่สูงในบางพื้นที่ กลุ่มโลหะหนักเหล่านี้เมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น น้ำ อากาศ และดินก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป มีการเคลื่อนตัว และถูกส่งต่อผ่านห่วงโซ่อาหารไปยังพืช สัตว์ และมนุษย์ สำหรับในหลาย ๆ กรณี อาจพบสารเหล่านี้ในดินปริมาณที่สูงจนส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดและฟื้นฟูด้วยวิธีการที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการที่นิยม ได้แก่ วิธีการทำให้เสถียรซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพหรือเคมี โดยที่จะทำให้สารพิษไม่แพร่กระจายออกไป และอีกวิธีการหนึ่ง คือ การขุดออกไปดำเนินการฝังกลบนอกพื้นที่ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่ได้เป็นการนำสารพิษกลุ่มโลหะหนักออกจากดิน ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาเดิมขึ้นมาได้อีกในอนาคต เนื่องจากสารพิษที่ถูกทำให้เสถียรแล้วอาจเกิดการกร่อนลง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารพิษ และปัจจัยจากภายนอกด้วย ดังนั้นการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electroreclamation หรือ Electrokinetic soil processing หรือ Electrokinetic remediation หรือ Electrochemical decontaminant) จึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการบำบัด และฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักจากดิน

และน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดสารปนเปื้อนในตะกอน และกากตะกอนได้เช่นกัน (Reddy et al., 2009) อย่างไรก็ตามการใช้กระแสไฟฟ้าจะทำให้น้ำ ไอออน และอนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำระหว่างอนุภาคของดินเกิดการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า หรือสามารถอธิบายได้อีกนัยหนึ่ง คือ การประยุกต์ศักย์ไฟฟ้าผ่านอนุกรมอิเล็กโทรดที่มีขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) โดยที่สนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปจะมีค่าความต่างศักย์ในช่วงต่าง ๆ ซึ่งจะไปชักนำให้เกิดปฏิกิริยาภายในดิน และสารปนเปื้อนเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วแอโนด (Anode) จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากพื้นที่ปนเปื้อนในภายหลัง ดังรูปที่ 2.5



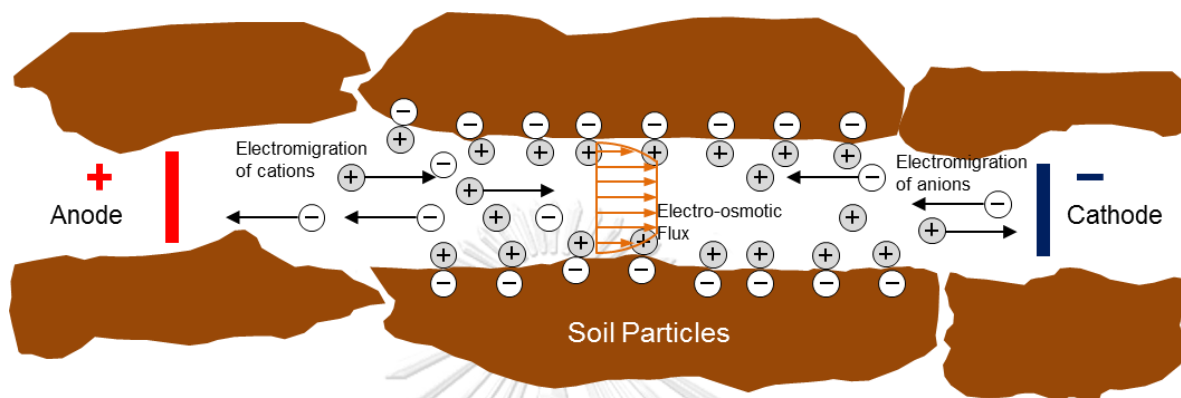
รูปที่ 2.5 การบำบัดดินปนเปื้อนด้วยกระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ที่มา: Claudio Cameselle et al. (2013)

### 2.3.2 กลไกของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในดิน (Electrokinetic in soils)

จลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารพิษผ่านเนื้อดินได้ โดยใช้วิธีการวางขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ลงในดิน และใส่พลังงานไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำ และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอนุภาคดินระหว่างขั้วไฟฟ้านั้น และทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของสารพิษต่าง ๆ ไปยังขั้วไฟฟ้า เพื่อที่จะกำจัดสารพิษในบริเวณพื้นที่ ๆ ปนเปื้อนให้มีขอบเขตการปนเปื้อนลดลง ดังนั้นการบำบัด และฟื้นฟูด้วยวิธีนี้จึงสามารถทำได้โดยไม่ต้องขุดดิน (In-situ) หรือขุดดินขึ้นมา

เพื่อบำบัด (Ex-situ) และเพื่อให้ดำเนินการบำบัดได้ดีขึ้นกว่าเดิม การบำบัดดินโดยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารมลพิษที่สามารถแบ่งได้ 2 กลไกหลักที่สำคัญ ได้แก่ 1) อิเล็กโตรออสโมซิส (Electro-osmosis) และ 2) อิเล็กโตรไมเกรชัน (Electromigration) และกลไกอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะของอิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer)

ที่มา: Claudio Cameselle et al. (2013)

1) อิเล็กโตรออสโมซิส (Electro-osmosis) คือ การเคลื่อนตัวของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินผ่านไปตามช่องว่างขนาดเล็กในดินโดยแรงกระทำที่เกิดจากสนามไฟฟ้า กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำในช่องว่างขนาดเล็กระหว่างเม็ดดินซึ่งมีพื้นผิวที่มีประจุ ซึ่งเมื่อพื้นผิวที่มีประจุสัมผัสกับน้ำ จะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออน เรียกว่า อิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer) ซึ่งจะทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดสมดุลง่าย เช่น ถ้าพื้นผิวเม็ดดินมีประจุลบ ไอออนบวกที่อยู่ในชั้นน้ำจะถูกดึงให้เข้ามาอยู่บริเวณผิวเม็ดดินในระบบอิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ สำหรับดินในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปนั้น เนื้อดินส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกอนออกไซด์ ซึ่งมีประจุพื้นผิวเป็นประจุลบที่พีเอช (pH) เป็นกลาง ไอออนบวกในน้ำจะมีการรวมตัว และสะสมบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างบริเวณผิวเม็ดดินกับน้ำ โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ 1) ชั้นในเสเทินเลเยอร์ (Stern layer) และ 2) ชั้นนอกที่เกิดการกระจาย (Diffuse layer) โดยเสเทินเลเยอร์จะอยู่ใกล้กับพื้นผิวของเม็ดดิน ซึ่งจะได้รับอิทธิพลทางไฟฟ้าจากผิวดินมาก จึงเป็นชั้นที่ค่อนข้างคงตัว ส่วนชั้นที่เกิดการกระจาย มีลักษณะการจัดกระจายอยู่ห่างออกไปในน้ำ และได้รับแรงกระทำจากผิวเม็ดดินน้อย ส่งผลให้สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้น เมื่อมีแรงกระทำหรืออิทธิพลจากสนามไฟฟ้า ไอออนในชั้นนี้จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้านั้นเอง โดยการเคลื่อนตัวจะดึงให้น้ำในช่องว่างขนาดเล็กเกิดการเคลื่อนตัวตามไปด้วย โดยในกรณีทั่วไป น้ำจะเคลื่อนตัวจากขั้วบวก (Anode) ไปยัง

ขั้วลบ (Cathode) ตามการเคลื่อนตัวของไอออนบวกในชั้นการกระจาย นอกจากนี้ การซึมผ่านโดยอิเล็กโทรออสโมซิส ไม่ค่อยได้รับผลกระทบจากขนาดเม็ดดินหรือขนาดรูพรุนของดิน ต่างจากการซึมผ่านของน้ำตามปกติ (Hydraulic permeability) แต่จะเกี่ยวข้องกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย (Zeta-potential) ความคดเคี้ยวของโครงสร้างรูพรุน และความพรุนของดิน อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยอิเล็กโทรออสโมซิส ในดินมีค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย (Zeta-potential) ไม่กว้างมาก ซึ่งจะมีค่าระหว่าง  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-5}$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  (Casagrande, 1952) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดกับเบิลเลเยอร์กับสารละลายที่อยู่ห่างออกไป แต่เนื่องจากทำการตรวจวัดได้ยาก โดยทั่วไปจะประมาณให้มีค่าเท่ากับความต่างศักย์ที่พื้นผิวเม็ดดินแทน ค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลายนี้จะได้รับผลกระทบจากพีเอช (pH) ความเข้มข้นและประจุของไอออนในสารละลาย ยิ่งไปกว่านั้น องค์ประกอบหลักของดินตามธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างในลักษณะแผ่นเตตระฮีดรัล (Tetrahedral sheet) แต่โดยทั่วไปแล้ว  $\text{Si}^{4+}$  บางตัวในโครงสร้างถูกแทนที่ด้วย  $\text{Al}^{3+}$  จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลายของดินโดยรวมมีค่าเป็นลบที่พีเอช (pH) เป็นกลาง แต่เมื่อพีเอช (pH) ลดลง ค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลายจะมีกำลังลดลง (ติดลบน้อยลง) จนเป็นศูนย์ และสามารถกลับขั้วเป็นบวกได้ (Baek et al., 2009) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่น ๆ ของดินด้วย ส่วนความเข้มข้นของไอออนในน้ำที่มากขึ้นจะทำให้ความหนาของอิเล็กโทรดกับเบิลเลเยอร์ลดลง ทั้งสองกรณีจึงส่งผลให้ไอออนที่อยู่ในอิเล็กโทรดกับเบิลเลเยอร์ลดลงจึงทำให้อิเล็กโทรออสโมซิสน้อยลงตามไปด้วย

2) อิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) คือ การเคลื่อนตัวของไอออนต่าง ๆ ในน้ำ โดยไอออนของสารซึ่งมีประจุจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้าม เช่น สารหนู ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไอออนลบและเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ในขณะที่โลหะหนักชนิดอื่นส่วนใหญ่ที่มีประจุบวกและจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ อิเล็กโทรไมเกรชันมีสมการการคำนวณที่เสนอโดย (Acar and Alshwabkeh, 1993) ดังสมการที่ 1

$$J = u \cdot c \cdot i_e$$

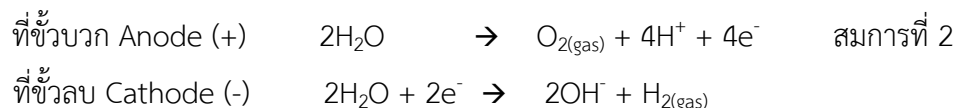
สมการที่ 1

J คือ ฟลักซ์ของไอออน ( $\text{mole s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )

u คือ Effective ionic mobility ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )

c คือ ความเข้มข้นของไอออน ( $\text{mole m}^{-3}$ )

ทั้งนี้ กระบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้นและมีความสำคัญอย่างมากหากมีการประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัด โดยกลศาสตร์ไฟฟ้า คือ การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของน้ำที่ขั้วทั้งสอง ดังสมการที่ 2



ดังแสดงให้เห็นได้ว่า ไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะเคลื่อนตัวไปยังขั้วลบ ในขณะที่ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบจะเคลื่อนตัวเข้าหาขั้วบวก สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ขั้วบวกลดลง และที่ขั้วลบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) เคลื่อนตัวได้ดีกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จึงมักส่งผลให้เกิดการขยายตัวของพื้นที่ ๆ เป็นกรดมากกว่าพื้นที่ ๆ เป็นด่าง นอกจากนี้ ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ยังอาจก่อให้เกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ บริเวณขั้วลบได้อีกด้วย

3) อิเล็กโทรโฟริซิส (Electrophoresis) คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุของขนาดคอลลอยด์ภายในบริเวณที่มีการปนเปื้อน โดยมีการประยุกต์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าเทียบกับช่องของเหลวส่วนที่คงที่ ซึ่งหากเปรียบเทียบกลไกในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนระหว่างกลไกอิเล็กโทรโฟริซิสและกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส จะพบว่า การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนด้วยกลไกอิเล็กโทรโฟริซิสจะไม่สามารถเคลื่อนย้ายอนุภาคในดินที่มีลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดได้ อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนย้ายด้วยกลไกนี้อาจจะเป็นกลไกที่สำคัญที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสถานะแขวนลอยของดิน และใช้ในการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ และไมเซลล์ (Micelle) ด้วย

4) การแพร่ (Diffusion) คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคสารจากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นของสารต่ำ หรือบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่ำ โดยอาศัยพลังงานจลน์ของสารเอง และไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งจะแตกต่างกับกลไกการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรโมเกรชัน อิเล็กโทรออสโมซิส และอิเล็กโทรโฟริซิส โดยกลไกการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบนี้ไม่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการบำบัด เนื่องจากมีอัตราเร็วในการแพร่ต่ำ เมื่อเทียบกับกลไกอื่น ๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว

### 2.3.3 ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด

กระแสไฟฟ้า (Electric current) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในตัวกลางหรือตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า สามารถจำแนกออกได้ 2 ประเภท ได้แก่

ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current; DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current; AC) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละประเภทมีดังต่อไปนี้

1) ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current; DC) คือ การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของอิเล็กตรอนในตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน และไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีกระแสไฟฟ้าแบบนี้ เช่น แบตเตอรี่ (Battery) ถ่านไฟฉาย และไดนาโมกระแสตรง เป็นต้น

2) ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current; AC) คือ กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา และอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ไปมาตลอดเวลา โดยที่มีทิศทางการเคลื่อนที่สลับกัน

#### 2.4 หญ้าสกุลเนเปียร์ (Napier grass)

หญ้าเนเปียร์มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ คือ *Pennisetum purpureum* Schumaach. อยู่ในกลุ่ม *Pennisetum* ดังรูปที่ 2.7 มีทั้งหมด 140 ชนิด โดยเรียกทั่วไปว่า Elephant grass (Brunken, 1977) เป็นหญ้าที่มีถิ่นฐานมาจากแอฟริกา มีอายุหลายปี แพร่กระจายในพื้นที่เขตร้อน และกึ่งร้อนของโลก (Sollenberger et al., 1990) สำหรับในประเทศไทยนั้นมีหญ้าเนเปียร์อยู่หลายสายพันธุ์ ซึ่งพันธุ์หญ้าเนเปียร์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mott Dwarf Napier grass มีลักษณะกอดตั้งตรง ความสูงของต้นประมาณ 170 ถึง 180 เซนติเมตร ขนาดใบใหญ่ ด้านบนและล่างของใบมีขนเล็กน้อยเป็นหญ้าที่ออกดอกเร็ว มีขนาดช่อดอกยาว 15 ถึง 27 เซนติเมตร แต่เป็นหญ้าดอกที่ไม่ติดเมล็ด จึงไม่เป็นปัญหาด้านวัชพืช นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่ชอบแสงเต็มที่ มีน้ำพอเพียง ส่วนด้านการเก็บเกี่ยวนั้นสามารถเก็บเกี่ยวได้นาน 6 ถึง 7 ปี อีกทั้งยังมีผลผลิตสูงเฉลี่ย 40 ถึง 80 ตันสดต่อไร่ต่อปี หญ้าเนเปียร์แคระได้ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2532 โดยนายวิฑูรน์ กำเนิดเพชร นำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำมาปลูกที่องค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค) ต่อมาศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์ ทัดศรี จากคณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ทำการคัดเลือกพันธุ์ที่สมบูรณ์ไปปลูกขยายพันธุ์ ซึ่งมีลักษณะเด่นดังนี้ 1) สัดส่วนของใบมักจะสูงกว่าลำต้น 2) มีความสามารถทนต่อความแห้งแล้ง 3) ออกดอกช้า 4) มีจำนวนข้อถี่ ปล้องสั้น และ 5) สามารถแตกกอดีกว่าหญ้าเนเปียร์ชนิดอื่น นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) มีความสามารถในการปรับตัวได้ในดินที่มีการระบายน้ำได้ดี และไม่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขัง นอกจากนี้ยังมีความสามารถทนอากาศหนาวเย็นได้ดีปานกลาง อย่างไรก็ตามประเทศไทยได้มีการปลูกหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ที่มีความสามารถในการปรับตัวเหมาะสมกับสภาพอากาศและสภาพดินของประเทศไทย ทั้งนี้หญ้าเนเปียร์แคระยังมีความสามารถต่อการทนแล้งได้ดีเพราะมี



ระบบรากลึก และไม่ชอบบริเวณร่มเงามากนัก (สายัณห์ ทัดศรี, 2548) ปัจจุบันมีการปลูกที่อากาศค่อนข้างเย็นในอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ส่วนในจังหวัดอื่น ๆ ที่มีการปลูกเช่นกัน ได้แก่ จังหวัดเพชรบุรีที่มีสภาพดินแบบชุดหุบกะพง หรือเป็นดินแบบร่วนปนทราย (วิรัช และคณะ, 2539) จังหวัดเพชรบูรณ์ที่มีสภาพดินชุดป่าแดง และดินร่วนปนเหนียว (วิระศักดิ์ และคณะ, 2542) จังหวัดนครพนมที่มีสภาพดินชุดโพนพิสัย และดินเหนียวปนดินลูกรังที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (สมพล และคณะ, 2546) และจังหวัดชัยนาทที่มีการชลประทาน และปลูกในดินที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์



รูปที่ 2.7 ลักษณะหญ้าเนเปียร์ในวงศ์ Pennisetum 1) ราก 2) ดอก

ที่มา: Mannetje (1992)

## 2.5 แสงซินโครตรอน (Synchrotron)

แสงซินโครตรอน (Synchrotron) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุ เช่น อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเทียบเท่าความเร็วแสง และถูกบังคับทิศทางให้เกิดการเลี้ยวเบนเป็นเส้นโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนออกมา รวมทั้งเกิดการปลดปล่อยในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะที่เด่นชัดหลายประการ ได้แก่ 1) ความสว่างของแสงมีมากกว่าแสงจากดวงอาทิตย์หลายเท่า 2) ลำแสงมีขนาดเล็ก มีความเข้มแสง ความคมชัด และอำนาจการทะลุทะลวงสูง และ 3) มีสเปกตรัมต่อเนื่องครอบคลุมช่วงพลังงานตั้งแต่แสงอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น แสงอัลตราไวโอเล็ต จนถึงรังสีเอกซ์ จากคุณลักษณะที่กล่าวมาส่งผลให้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพียงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้ประโยชน์ได้ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้หลากหลายด้าน เช่น ฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา รวมไปถึงวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ได้แก่ สิ่งแวดล้อม การแพทย์ เกษตรกรรม และโบราณคดี นอกเหนือจากที่กล่าวมา แสงซินโครตรอนยังเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อ

งานวิจัยเพื่อตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรม ทั้งในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือปรับปรุงกระบวนการผลิต เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron light source) ซึ่งเรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam photon source) ตั้งอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีส่วนประกอบดังนี้

### 2.5.1 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)

ปืนอิเล็กตรอนมีหน้าที่ผลิตอนุภาคอิเล็กตรอนจำนวนมาก มีการเกิดกระบวนการจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับแก๊สโลหะของปืนอิเล็กตรอนจนเกิดความร้อน ทำให้อนุภาคของอิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงบริเวณขั้วบวกในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงต่อไป ดังรูปที่ 2.8

### 2.5.2 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงมีหน้าที่แบ่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่เคลื่อนออกจากปืนอิเล็กตรอนให้เป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า อิเล็กตรอนบันช์ (Electron bunch) หลังจากนั้นจะทำการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่อยู่ในแนวเส้นตรงด้วยคลื่นไมโครเวฟให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) และส่งไปยังเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ดังรูปที่ 2.9

### 2.5.3 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron)

เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมมีหน้าที่เพิ่มพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งการที่จะเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในแนวเส้นตรงเพียงอย่างเดียว นั้น ตัวเครื่องเร่งอนุภาคจะต้องมีความยาวหลายกิโลเมตร ทำให้ช่วงเวลาดำเนินการคิดค้น และออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม เพื่อบังคับอนุภาคอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลม และมีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในระยะเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือใกล้เคียงกับความเร็วแสง หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังวงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนต่อไป ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.8 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)



รูปที่ 2.9 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator)



รูปที่ 2.10 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

#### 2.5.4 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring)

วงกักเก็บอิเล็กตรอนมีหน้าที่เร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) วงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนประกอบด้วย แม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว เพื่อทำหน้าที่บังคับให้อนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อสุญญากาศ โดยบริเวณที่เป็นแม่เหล็กบังคับเบี่ยงเบนสองขั้ว (Bending magnet) จะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน” ดังรูปที่ 2.11

#### 2.5.5 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines: BL)

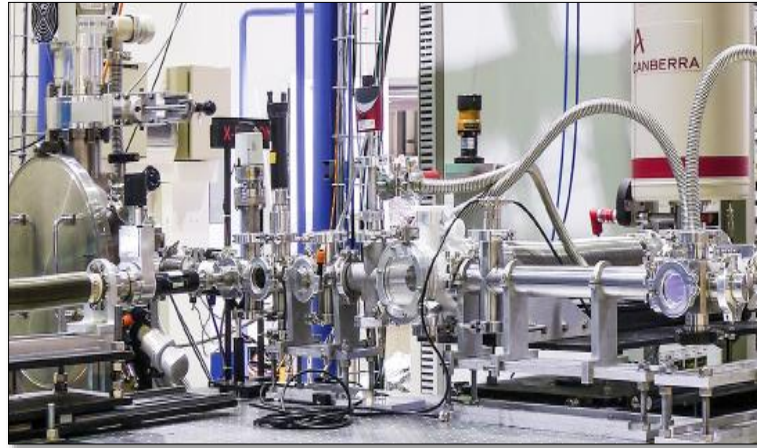
ระบบลำเลียงแสง คือ ระบบที่ทำหน้าที่นำ และคัดเลือกแสงซินโครตรอนในช่วงที่ต้องการใช้ประโยชน์ โดยนำมาจากวงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนส่งมายังสถานีทดลอง โดยที่ระบบลำเลียงแสงประกอบไปด้วยท่อสุญญากาศ (Vacuum) กระจกรวมแสง (Collimating mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) กระจกโฟกัสแสง (Focusing mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (Slit) และอุปกรณ์ย่อยอื่น ๆ ในส่วนท้ายสุดของระบบลำเลียงแสงจะเป็นสถานีทดลอง ซึ่งมีระบบตรวจวัดสัญญาณติดตั้งอยู่สำหรับดำเนินการด้วยเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน ดังรูปที่ 2.12

#### 2.5.6 แสงซินโครตรอน (Synchrotron light)

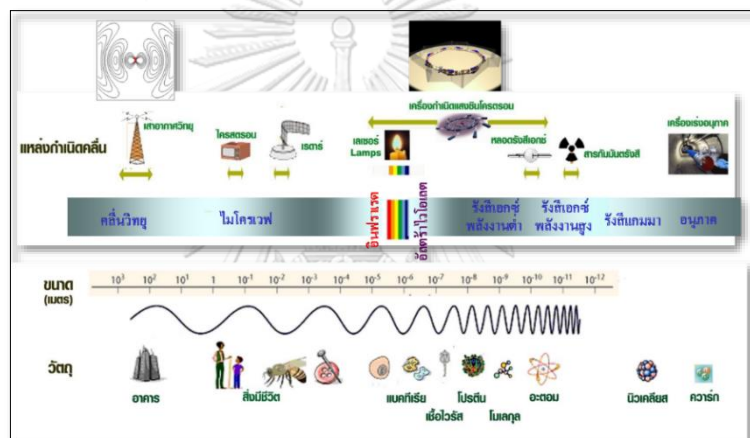
แสงซินโครตรอน (Synchrotron light) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง และถูกบังคับให้เกิดการเลี้ยวเบนเป็นเส้นโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก โดยที่จะเกิดปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมา ซึ่งแสงซินโครตรอนที่ผลิตขึ้นมาจะมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น มีค่าความสว่างของแสงมากกว่าดวงอาทิตย์ถึงหนึ่งล้านเท่า ความเข้มสูง และมีช่วงความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงของอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น แสงอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring)



รูปที่ 2.12 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL)



รูปที่ 2.13 ช่วงของแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

### 2.5.7 อุปกรณ์แทรก (Insertion devices)

อุปกรณ์แทรก (Insertion devices) โดยทั่วไปการผลิตแสงซินโครตรอนนั้น หากมีความต้องการในการใช้ประโยชน์แสงที่มีระดับความเข้มแสงที่มาก และระดับพลังงานสูง จำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้อุปกรณ์แทรก (Insertion devices) ติดตั้งให้กับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยอุปกรณ์แทรกที่นำมาใช้สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยามมี 3 ประเภท ดังนี้

1) อันดูลเลเตอร์ (Undulator) ประกอบด้วย แม่เหล็กสองขั้วจำนวนมากวางสลับไปมา และมีสนามแม่เหล็กติดตั้งอยู่ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอน แม่เหล็กจำนวนมากนี้ส่งผลให้อนุภาคอิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนเป็นเส้นโค้งหลายรอบ โดยที่แต่ละรอบของอนุภาคอิเล็กตรอนจะเกิดการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมา แสงที่ปลดปล่อยออกมาจะรวมกัน และถูก



ลำเลียงไปสู่สถานีทดลอง สำหรับอุปกรณ์แทรกนั้น หมายถึง อุปกรณ์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเข้มแสงซินโครตรอน

2) อุปกรณ์แทรกแบบตัวนำยิ่งยวด (Superconducting wavelength shifter) คือ อุปกรณ์แทรกอีกประเภทหนึ่งที่มีจำนวนแม่เหล็กสองขั้วจำนวนน้อยกว่าประเภทอันดูลเลเตอร์ (Undulator) แต่มีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่า ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนเป็นเส้นโค้งของอนุภาคอิเล็กตรอนที่รุนแรง และมีความเร็วมากกว่า เป็นผลให้แสงที่ได้นั้นมีพลังงานสูงกว่าเมื่อเทียบกับแม่เหล็กสองขั้วหรือประเภทอันดูลเลเตอร์ การที่จะผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนั้น จำเป็นจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำที่เป็นซูเปอร์คอนดักเตอร์ โดยค่าแม่เหล็กที่ผลิตได้จากอุปกรณ์แทรก ณ สถาบัน ฯ มีค่าเท่ากับ 6.5 เทสลา (Tesla magnetic field) สำหรับใช้ในการผลิตแสงให้มีพลังงานสูงในช่วงรังสีเอกซ์ (hard X- rays)

3) แม่เหล็กถาวรประเภทแม่เหล็กหลายขั้ว (Multi-pole wiggler) คือ ประเภทแม่เหล็กหลายขั้วที่ใช้สำหรับเพิ่มพลังงานของแสงซินโครตรอนในการผลิตรังสีเอกซ์ที่พลังงานสูง โดยที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรังสีแกมมา

## 2.5.8 สถานีทดลอง (Experimental Station)

สถานีทดลอง เมื่อแสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างของอะตอม

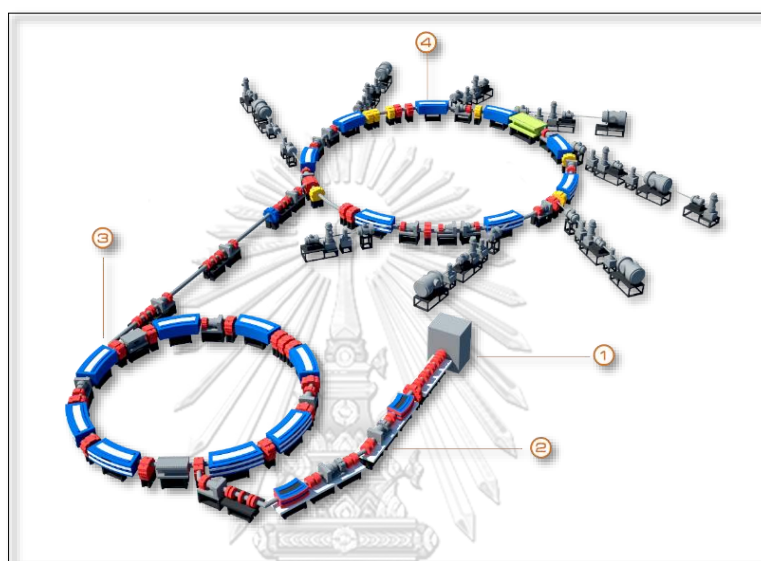
สำหรับขั้นตอนในการผลิตแสงซินโครตรอนประกอบด้วย

1) ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ การผลิตอนุภาคอิเล็กตรอน โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับแก๊นโลหะของปืนอิเล็กตรอนจนเกิดร้อน และทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นจึงใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงบริเวณขั้วบวกในการดึงอนุภาคอิเล็กตรอนให้วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน

2) ขั้นตอนที่สอง เป็นการเร่งความเร็วของอนุภาคอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรง ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง หรือลิแนค (Linac) เพื่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีความเร็วสูงในระดับที่ต้องการ (40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) จากนั้นป้อนอนุภาคอิเล็กตรอนนี้เข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมหรือเครื่องซินโครตรอน

3) ขั้นตอนที่สาม อนุภาคอิเล็กตรอนภายในเครื่องซินโครตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งในทิศทางวงกลม และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีความเร็วสูงใกล้เคียงกับความเร็วแสง (1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ 1 GeV) หลังจากนั้นอนุภาคอิเล็กตรอนจะถูกส่งเข้าสู่วงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนเป็นขั้นตอนสุดท้าย

4) ขั้นตอนที่สุด วงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนทำหน้าที่เพิ่มพลังงานเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) เพื่อการผลิตแสงซินโครตรอนด้วยการใช้สนามแม่เหล็กบีบบังคับให้อนุภาคอิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบน และปลดปล่อยแสงหรือโฟตอนออกมาขณะเลี้ยวเบน และกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้น เพื่อนำแสงซินโครตรอนมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ต่อไป ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

ประโยชน์ของแสงซินโครตรอนมีดังต่อไปนี้

1) งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน แสงซินโครตรอนสามารถใช้งานวิจัยขั้นพื้นฐานในการหาคูณสมบัติของอะตอม โมเลกุล และความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลของสาร การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเมื่ออยู่ในสภาวะความดันและอุณหภูมิสูง การศึกษาคุณสมบัติบางประการของแม่เหล็ก และการศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณพื้นผิว และมลพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ดี เนื่องจากสามารถตรวจวัดสารที่มีปริมาณน้อยมาก (Trace elements) ได้อย่างแม่นยำ

2) งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพ และวิทยาศาสตร์การแพทย์ แสงซินโครตรอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการศึกษาโครงสร้างของสารชีวโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งพบในเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก เป็นต้น ตัวอย่าง เช่น การศึกษาโครงสร้างสามมิติของโปรตีนด้วยเทคนิค Protein crystallography ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน

อุตสาหกรรมการออกแบบตัวยารักษาโรคได้ หรือการใช้เทคนิค Infrared microspectroscopy เพื่อตรวจจำแนกเซลล์ต้นกำเนิด (Stem cell) เป็นต้น

3) งานวิจัยในเชิงอุตสาหกรรม เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ หรือการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่เดิมนั้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาในเชิงลึกโดยนำความรู้ใหม่ ๆ ที่ได้มาใช้ในการเพิ่มมูลค่าในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากพลังงานของแสงซินโครตรอนนั้นครอบคลุมความถี่ตั้งแต่อย่านรังสีอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ จึงครอบคลุมการศึกษาตั้งแต่ขนาดนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดของวัสดุในระดับจุลภาคที่ได้รับการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในการพัฒนาอุตสาหกรรมขั้นสูง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของสารหนูในพืช และดิน

ในสภาวะปัจจุบันการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม นับเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วโลก (Bibi et al., 2016; Shahid et al., 2015) โลหะหนักหลายชนิดนั้นมีความเป็นพิษสูงมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์โดยตรง โดยเฉพาะสารหนูที่ถือได้ว่าเป็นชนิดที่มีความน่ากังวลมากที่สุดในด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ (Rafiq et al., 2017) สารหนูนอกจากจะมีความเป็นพิษสูงแล้ว ยังเป็นโลหะหนักที่เป็นสารก่อมะเร็งได้ด้วย (Rosas-Castor et al., 2014) การบริโภคอาหารที่เกิดจากภาคการเกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนสารหนูในพืช และดิน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์มีมากถึง 90% (Foucault et al., 2013) สารหนูที่ปนเปื้อนในระบบนิเวศระหว่างพืช และดินนั้น สามารถมีพฤติกรรมเคลื่อนตัว ความสามารถในการละลาย และการที่พืชเอาไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันด้วย ตามแต่ละปฏิกิริยาทางเคมี (J. Y. Xu et al., 2016) ซึ่งสามารถพบสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (สถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) อยู่ที่ -3, 0, +3 และ +5) นอกจากนี้ยังสามารถพบอยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ด้วย ได้แก่ โมโนเมทิลอาร์เซนเตต (Monomethyl arsenate) โมโนเมทิลอาร์เซนไต์ (Monomethyl arsenite) ไดเมทิลอาร์เซนเตต (Dimethyl arsenate) และไดเมทิลอาร์เซนไต์ (Dimethyl arsenite) อะตอมของสารหนูที่อยู่ในสารประกอบต่าง ๆ มักพบอยู่ในสองวาเลนซี (Valencies) ได้แก่ แบบไตรวาเลนต์ (Trivalent หรือ 3-Valent) ซึ่งเรียกสารประกอบสารหนูพวกนี้ว่า อาร์เซนไต์ (Arsenite) สัญลักษณ์คือ As (III) หรือ  $As^{3+}$  กับแบบเพนตาวาเลนต์ (Pentavalent หรือ 5-Valent) ซึ่งเรียกสารประกอบสารหนูพวกนี้ว่าอาร์เซนเตต (Arsenate) สัญลักษณ์คือ As (V) หรือ  $As^{5+}$  ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูที่มีอิทธิพลในการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับดินมากที่สุด (Shakoor et al., 2015)



พฤติกรรมของสารหนูในพืชและดิน โดยส่วนใหญ่พบสารหนูอยู่ในรูปอนินทรีย์ (Arsenate และ Arsenite) โดยกลุ่มพวกนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัสดุอินทรีย์ทั้งหมดในดิน (Soil organic matter; SOM) และศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; Eh) เป็นต้น โดยปกติ อาร์เซนเนต (Arsenate; As (V)) ในดินนั้นสามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปในพืชด้วยการทำปฏิกิริยากับฟอสเฟต (Phosphate transporters; PHT) (LeBlanc et al., 2013) ขณะที่อาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) สามารถเคลื่อนที่ด้วยซิลิคอน (Silicon transporters; LSi) เข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำหรือไซเลม (Xylem loading) โดยทั่วไปพืชที่ไม่จัดอยู่ในกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Non-Hyperaccumulator) สารหนูมักจะถูกยึดจับไว้ที่ส่วนราก ขณะที่พืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator) สามารถมีการถ่ายโอนสารหนูไปยังส่วนที่อยู่เหนือรากได้ สำหรับภายในพืชนั้น พบว่า อาร์เซนเนต (Arsenate; As (V)) จะถูกรีดิวซ์โดยสารกลุ่มกลูตาไธโอน (Glutathione) ให้กลายเป็นอาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) ได้ (Mitani-Ueno et al., 2011)

## 2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของสารหนูในพืช และดิน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของสารหนูในพืชและดินเป็นอย่างมาก คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปัจจัยที่มีผลรองลงมา ได้แก่ องค์ประกอบเชิงกายภาพของดิน (Soil texture) ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potential) และองค์ประกอบธาตุในดิน (Mineral matter) ซึ่งสารหนูจะมีการเคลื่อนที่ และสะสมหรือไปกักเก็บไว้ในพืชเพิ่มขึ้น เมื่อสภาวะของดินมีความเป็นกรดประมาณ 5.5 (Signes-Pastor et al., 2007) โดยทั่วไปนั้น ดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำจะส่งผลให้สารหนูอยู่ในรูปสารละลายน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดินยังมีผลต่อการกระจายตัวของสารหนูในรูปอาร์เซนเนต (Arsenate; As (V)) และอาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) อีกด้วย (Adra et al., 2016) การที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สารหนูเกิดการดูดซับและตกตะกอนกับโลหะชนิดที่แตกต่างกันในดินแต่ละประเภท นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า สารหนูสามารถจับตัวและตกตะกอนกับแคลเซียมหรือซัลเฟตได้ง่ายในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูง ในขณะที่ดินที่มีสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำ สารหนูจะมีโอกาสมากที่จะจับตัวกับเหล็กออกไซด์ (Iron(II) oxide) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide) (Moreno-Jimenez et al., 2013) นอกจากนี้ การจับตัวของอาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) กับกลุ่มแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และเคโอลิไนต์ (Kaolinite) มีมากขึ้นในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 3 ถึง 9 ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ต่ำกว่านั้น พบว่า การดูดจับของอาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) กับแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) จะน้อยกว่าการดูดจับกับพวกเหล็ก และอะลูมิเนียมออกไซด์

### 2.6.3 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการใช้พืชในการบำบัดสารโลหะหนัก

จากปัญหาการปนเปื้อนสารหนูในดิน พืช และสิ่งแวดล้อมดังกล่าวข้างต้น ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ซึ่งเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่หลากหลาย ได้แก่ 1) เทคโนโลยีทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น การบำบัดด้วยเคมี (Chemical treatment) การล้างดิน (Soil flushing) การปรับเสถียร (Solidification/Stabilization) การทำลายด้วยความร้อน (Thermal destruction) และการสกัดไอระเหยจากดิน (Soil vapor extraction) และ 2) เทคโนโลยีทางชีวภาพ เช่น การบำบัดด้วยชีววิธี (Bioremediation) และการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) (พันธุศาสตร์ สัมพันธ์พานิช, 2558) ดังนั้นจากสภาวะวิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจของประเทศ การใช้พืชสีเขียวมาบำบัดสารหนูในดิน น้ำ ตะกอนท้องน้ำ และกากโลหะกรรม จึงเป็นวิธีการที่ค่อนข้างมีความเป็นไปได้ และเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ ขอบเขตของการนำพืชมาใช้ในการบำบัดสามารถพิจารณาได้ดังนี้ 1) มีความสามารถในการดูดซับ และสะสมโลหะหนักจากดินได้ในระดับปริมาณความเข้มข้นที่สูง 2) สามารถเจริญเติบโตได้ดี และมีความทนทานต่อปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ได้ดี 3) ไม่แสดงอาการความเป็นพิษ 4) ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา 5) มีวงจรชีวิตสั้น ขยายพันธุ์ได้ดี และมีปริมาณมวลชีวภาพมาก และ 6) เป็นพืชที่ทั้งคนและสัตว์กินไม่ได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้เลือกหญ้าเนเปียร์นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งหญ้าเนเปียร์มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pennisetum purpureum* Schumacher. หรือมีชื่อสามัญหรือที่เรียกทั่วไปว่า Elephant grass อยู่ในกลุ่ม *Pennisetum* มีทั้งหมด 140 ชนิดด้วยกัน (Brunken, 1997) โดยปกติแล้วถือได้ว่าเป็นหญ้าพื้นเมืองของแอฟริกาเขตร้อน มีอายุหลายปี สามารถพบได้ในเขตร้อน และกึ่งร้อนของโลก (Sollenberger et al., 1989) สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันมีหญ้าเนเปียร์อยู่หลายสายพันธุ์ โดยพันธุ์ที่จะนำมาศึกษาในการวิจัยนี้ คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mott dwarf napier grass ซึ่งเป็นหญ้าที่มีลักษณะกอตั้งตรง ความสูงของต้นประมาณ 170 ถึง 180 เซนติเมตร มีอายุหลายปี แต่เป็นหญ้าดอกที่ไม่ติดเมล็ด จึงไม่เป็นปัญหาวัชพืช และมีลักษณะของการปลูกเหมือนการปลูกอ้อย ซึ่งปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6 ถึง 7 ปี นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์แคระยังเป็นพืชชีวมวล (Biomass) ที่ได้รับความสนใจในการผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากมีต้นทุนในการปลูกต่ำ เจริญเติบโตเร็ว และให้ผลผลิตต่อไร่สูง

### 2.6.4 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารโลหะหนัก

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยเฉพาะสารหนูได้มีการนำเทคโนโลยีการใช้พลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electroreclamation หรือ Electrokinetic remediation หรือ Electrochemical decontaminant) มาช่วยในกระบวนการฟื้นฟูมลพิษสิ่งแวดล้อม ที่ออกแบบมาเพื่อบำบัดสารปนเปื้อนในดิน ตะกอน และกากตะกอน (Reddy et al., 2009) โดยในส่วนของ

กระบวนการบำบัดน้ำได้มีการประยุกต์ใช้ศักย์ไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าผ่านอนุกรมอิเล็กโทรดที่มีขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) โดยสนามไฟฟ้าที่เติมลงไปจะมีค่าความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าแต่สามารถไปชักนำให้เกิดปฏิกิริยาในดิน และสารปนเปื้อนเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขั้วแคโทดหรือขั้วแอโนดได้ จากนั้นจึงเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนออกในภายหลัง ทั้งนี้มีนักวิชาการสิ่งแวดล้อมได้นำมาประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยพลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

Senneset and Strout (1998) ได้ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดง โครเมียม และสารหนูด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ทองแดง และโครเมียม สามารถถูกบำบัดได้ 75-90% ส่วนการบำบัดสารหนูนั้นทำได้เพียง 20% เมื่อเวลาของการทดลองผ่านไป 2 เดือน ส่วนการศึกษาของ Pamukcu and Huang (2001) ได้ทำการจำลองการปนเปื้อนสารหนูในดินเหนียว และทราย และทำการทดสอบการบำบัดในห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถบำบัดสารหนูได้ประมาณ 60% หากแต่ตัวอย่างที่มีการเติมกรดฮิวมิกนั้น สามารถบำบัดได้เพียง 30% เท่านั้น ทำให้ทราบว่า กรดฮิวมิกน่าจะตรึงสารหนูไว้ในดิน

Baek et al. (2009) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารหนูที่มีแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณที่สูงถึง 50% ด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า พบว่า การใช้ต่างส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของสารหนูกับแคลเซียม ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่สูงมากเมื่อเทียบกับดินในภาวะปกติหรือชุดควบคุม ส่วนการใช้กรดสามารถช่วยควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้ไม่สูงเกินไป (ประมาณที่ 8) นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนที่ทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Reverse electro-osmosis) คือ มีทิศทางการไหลจากขั้วแคโทด (Cathode) ไปทางขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งเป็นผลจากการกลับค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสะเทินเลเยอร์ (Stern layer) กับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย (Zeta-potential) ของดินเป็นบวกเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำลง จึงสามารถกล่าวได้ว่า การใช้กรดควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างโดยรวมแล้วมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ต่างเล็กน้อย

### 2.6.5 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารโลหะหนัก

ดาร์รัตน์ โรจนพิทยากร (2558) ได้ทำการศึกษาความสามารถของหญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) ในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยดินมีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 0, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เพื่อศึกษาหาความสามารถของพืชในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี ผลการศึกษาพบว่า อัตราการรอดชีวิต และมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่จะสูงเมื่อปลูกในดินที่ทำการเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน รวมทั้งค่ายังไม่มีมีความแตกต่างกันทางสถิติ

กับการปลูกหญ้าที่ปลูกในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี ส่วนการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลาที่ 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน และความหนาแน่นของพืช 0, 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จะส่งผลต่อปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืชที่แตกต่างกัน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และมีความหนาแน่นของพืช 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถางมีประสิทธิภาพสูงสุด

Cang et al. (2011) ได้ทำการศึกษาการปลูกผักกาดสีน้ำตาล (Indian mustard) ร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี โดยทำการทดลองการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ต่อการเจริญเติบโตของพืช และประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะจากดินที่ปนเปื้อน ภายหลังจากการปลูกพืชเป็นระยะเวลา 35 วัน ได้ทำการให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์แตกต่างกัน ดังนี้ 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 16 วัน โดยกระถางที่ใช้ในการปลูกพืชนั้นได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนที่ใช้ปักขั้วแอนดอลในดิน 2) ส่วนที่ไม่มีการปักขั้วอิเล็กโทรด และ 3) ส่วนที่ใช้ปักขั้วแคโทดลงในดิน จากผลการทดลองพบว่า ผักกาดสีน้ำตาลสามารถดึงดูดโลหะที่ปนเปื้อนในดินเพิ่มขึ้นโดยมีกระแสไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ร่วมด้วย โดยที่กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพในการดึงดูดโลหะไปสะสมในพืชได้ดีที่สุด นอกจากนี้ผลของไฟฟ้ากระแสตรงต่อมวลชีวภาพของพืชและความเข้มข้นของโลหะในส่วนขอราก และส่วนเหนือรากนั้นพบว่า ในสภาวะที่ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์สูงนั้นส่งผลให้พืชมีมวลชีวภาพลดลง ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นของโลหะที่พืชสามารถดึงดูดไปเก็บในส่วนต่าง ๆ พบว่า ที่บริเวณรากของผักกาดสีน้ำตาลมีความสามารถในการกักเก็บ และสะสมโลหะที่ปนเปื้อนได้ดีกว่าส่วนเหนือราก

Tahmasbian and Safari Sinegani (2015) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้พืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารคีเลเตอร์ (Chelators) สำหรับขั้นตอนการทดลองใช้ดินที่ปนเปื้อนบริเวณรอบเหมืองโดยนำมาเติมสารคีเลเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ดังนี้ กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) มูลสัตว์ปีก (Poultry manure extract; PME) และมูลวัว (Cow manure extract; CME) ที่ปริมาณ 2 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ต่อมาได้ทำการปลูกต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ลงไปในกระถางที่มีดินที่เติมสารคีเลเตอร์ หลังจากนั้น 1 สัปดาห์ ได้ทำการให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ความต่างศักย์ 0, 10 และ 30 โวลต์ ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน เป็นระยะเวลา 14 วัน หลังจากสิ้นสุดการทดลองได้ทำการตรวจวัดน้ำหนักแห้งในส่วนราก และส่วนเหนือราก ปัจจัยการเคลื่อนย้าย (Translocation factor; TF) ค่าดัชนีการดูดดึงตะกั่ว (Pb uptake index; UI) และปริมาณตะกั่วที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ให้นั้นไม่มีผล

ต่อน้ำหนักแห้งของราก และส่วนเนื้อรากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว และค่าดัชนีการดูดซับตะกั่วที่บำบัดโดยการใช้ EDTA ร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ เพิ่มขึ้น 5 เท่า เมื่อเทียบกับสภาวะปกติหรือชุดควบคุม นอกจากนี้ยังไม่มี ความแตกต่างทางสถิติของค่าดัชนีการดูดซับตะกั่ว ระหว่างการใช้ EDTA ร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ความต่างศักย์ 10 และ 30 โวลต์ ส่วนตะกั่วในดินที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่สภาวะกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ร่วมกับ EDTA ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ตะกั่วที่ดีที่สุด เนื่องจากเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำของรากมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเหตุให้สามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพได้ นอกจากนี้ระยะเวลาของการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ 1 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 14 วัน ไม่มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของราก และส่วนเนื้อรากพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Shin et al. (2016) ทำการศึกษาการเสริมประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic treatment) ในการบำบัดสารหนูร่วมกับการใช้ 1) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) ที่ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) สารหนูที่อยู่ในรูป  $As^{5+}$  ให้เป็น  $As^{3+}$  ซึ่ง สามารถเคลื่อนตัวได้ดีกว่ารูปเดิม และยังสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเหล็กให้ละลายออกมาได้ โดยจะส่งผลทำให้สารหนูหลุดออกมาด้วย 2) กรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งเป็นสารคีเลต (Chelating agent) มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยละลายเหล็กออกมา และทำให้สารหนูหลุดออกมาด้วย และ 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยที่พวกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของสารหนูที่อยู่ในรูปแบบที่เป็น ประจุลบ และป้องกันการดูดซับกลับ จากที่กล่าวมาได้ทำการทดลองความสามารถในการชะสารหนู ด้วยวิธีแบบชุด โดยใช้ดินจากโรงล้างดินที่มีสารหนู 87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณ 5 กรัมต่อสาร สกัดที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยเขย่าเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการ ทดลองสลับสารสกัดระหว่างกรดออกซาลิก (Oxalic acid) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ด้วย อย่างละ 3 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า สามารถสกัดสารหนูออกมาได้ไม่เกิน 40% โดยกรดออกซาลิก (Oxalic acid) ให้ผลดีที่สุดในการสกัดสารหนูออกมาอยู่ที่ 37% ส่วนกรดซิตริก (Citric acid) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันอยู่ที่ 27%

#### 2.6.6 งานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อมวลชีวภาพ และการเจริญเติบโตของพืช

Bi et al. (2010) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของต้นผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ที่ปลูกไว้ในสารละลายที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลองได้ทำ การเพาะเมล็ดผักกาดหอม และให้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 และ 50 โวลต์ เป็นเวลา 60 วัน และทำการเก็บตัวอย่างพืชเพื่อทำการวิเคราะห์ ผลการทดลองพบว่า มวล ชีวภาพของพืชเจริญเติบโตในตุ่มกลางที่ไม่ปนเปื้อนคาร์บอนไดออกไซด์ และการให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

(AC) ที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 และ 50 โวลต์ มีปริมาณที่สูงกว่ามวลชีวภาพของพืชที่เจริญเติบโตในตุ่มกลางที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียม และไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ถึงแม้ว่ามวลชีวภาพของพืชจะลดลงเมื่อปลูกในตุ่มกลางที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม และให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ก็มีมวลชีวภาพที่สูงกว่าพืชที่เจริญเติบโตในตุ่มกลางที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียม และไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) มีส่วนทำให้มวลชีวภาพของพืชเพิ่มขึ้น

### 2.6.7 งานวิจัยที่ประยุกต์ตำแหน่ง และรูปแบบการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ

E. K. Jeon et al. (2015) ได้ทำการประยุกต์ใช้การวางขั้วอิเล็กโทรดแบบหกเหลี่ยม โดยมีรูปแบบการวางขั้วอิเล็กโทรดบนพื้นที่นาข้าว ขนาดความกว้าง 17 เมตร ยาว 12.2 เมตร และลึก 1.6 เมตร เพื่อขจัดสารหนู ทองแดง และตะกั่ว ในนาข้าวที่มีการปนเปื้อน รวมทั้งยังมีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กที่สามารถป้องกันการสึกกร่อนที่เกิดจากสภาวะดินที่เป็นกรดบริเวณใกล้ขั้วบวกด้วย นอกจากนี้ผู้ศึกษายังมีการใช้กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยในการสกัดสารทองแดง และตะกั่ว ให้อยู่ในรูปสารละลาย ผลการศึกษาพบว่า สามารถกำจัดสารหนูได้ 44.4% ทองแดง 40.3% และ ตะกั่ว 46% ที่ระยะเวลาของการทดลอง 24 สัปดาห์ ผลจากการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่า สารหนูถูกจับกับรูปสัณฐานไอออนโลหะ และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) และยังสามารถเปลี่ยนเป็นรูปของสารหนูได้อีกหลายรูปแบบ ส่วนในกรณีของทองแดง และตะกั่วที่มีการยึดจับกับเหล็กและแมงกานีสในรูปออกไซด์ไฮดรอกไซด์นั้นมีปริมาณที่ลดลง นอกจากนี้กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก ยังสามารถสร้างสารประกอบที่มีประจุลบกับทองแดง ตะกั่ว และสารประกอบเหล่านั้นถูกเคลื่อนย้ายไปยังขั้วบวกได้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยนำไปสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชทดลอง มีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

#### 3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทดลองทั้งหมดได้ดำเนินการที่โรงเรียนทดลอง ชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ตึกภาคผนวก ก1) และในส่วนของ การวิเคราะห์ตัวอย่างทดลองทั้งหมดได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัย สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ตึกภาคผนวก ก2) และตัวอย่างพืชทดลองบางส่วนนำไป วิเคราะห์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา (ตึกภาคผนวก ก3)

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในตัวกลางวุ้น และกากโลหกรรม

- 1) วุ้นที่นำมาทดลองเป็นเกรดอาหาร
- 2) กากโลหกรรมที่นำมาทดลอง เป็นตัวอย่างกากโลหกรรมที่ขุดลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร จากบริเวณบ่อกักเก็บกากแร่ของเหมืองทองคำ
- 3) ภาชนะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร และสูง 22 เซนติเมตร และ ทรงเหลี่ยมขนาดกว้าง 29 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร และสูง 27 เซนติเมตร
- 4) ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (Graphite) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.95 เซนติเมตร และ ยาว 30 เซนติเมตร และสแตนเลส เกรด 316L (Stainless steel 316L) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.95 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร
- 5) เข็มขัดรัดขั้วสแตนเลส
- 6) สายไฟทองแดงสีดำ และสีแดง
- 7) กรรไกรตัดสายไฟ
- 8) เทปพันสายไฟ

### 3.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง

- 1) หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)
- 2) ถูเพาะชำ และกะละมังพลาสติก (สำหรับเพาะชำพืช)
- 3) กระจกทรงกระบอกมีขนาดความสูง 30 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร (สำหรับปลูกพืชทดลอง)
- 4) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI)
- 5) เรือนเพาะชำ ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 3 เมตร

### 3.2.3 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง ราก โลหกรรม และพืชทดลอง

- 1) ถูพลาสติกใสแบบมีซิปลสำหรับเก็บตัวอย่าง ราก และกากโลหะกรรม
- 2) น้ำกลั่น (Distilled water)
- 3) ท่อเก็บตัวอย่างโพลีเอทิลีน (Polyethylene tube; PE tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร และยาว 25 เซนติเมตร
- 4) แท่งแก้ว (Glass rod)

### 3.2.4 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่
  - 1.1) ปิเปต (Pipet)
  - 1.2) บีกเกอร์ (Beaker)
  - 1.3) กรวยกรอง (Funnel)
  - 1.4) แท่งแก้ว (Glass rod)
  - 1.5) กระจกตวง (Cylinder)
  - 1.6) กระจกนาฬิกา (Watch glass)
  - 1.7) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
  - 1.8) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- 2) พาราฟิล์ม (Parafilm)
- 3) กระดาษฟรอยด์
- 4) ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
- 5) โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
- 6) ขวดพลาสติก สำหรับใส่สารละลายสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร
- 7) กระดาษกรองเบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman; England)



- 8) หลอดเซนติฟิว (Centrifuge tube)

### 3.2.5 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender) รุ่น RT04A, Korea
- 2) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 3) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne
- 4) ตู้ดูดควันสารเคมี (Chemical flame hood) รุ่น Wiwatsan
- 5) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity meter) WTW รุ่น cond 3210
- 6) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) WTW รุ่น pH 3210
- 7) เครื่องวัดค่าศักย์ภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential meter) WTW รุ่น pH 3210 set 4
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) พิกัด 220 กรัม รุ่น BP 2215, Sartorius สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักสารเคมี
- 9) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE
- 10) เครื่องมือสำหรับย่อยตัวอย่างด้วยเตาไฟฟ้า (Heating box)
- 11) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer; AAS) รุ่น Analyst 800, Perkin Elmer
- 12) เครื่องอินดักทีฟพลาสมา-ออปติคอลล อิมิสชันสเปกโทรเมตรี (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; ICP-OES) รุ่น PQ 9000 Elite
- 13) ลำแสงซินโครตรอน เทคนิค Micro x-ray fluorescence spectrometry (XRF)
  - Monochromator : Crystal monochromator (Horizontally diffractive double crystal monochromator)
  - Energy range : 4-15 keV
  - Resolution : Si(111);  $1.5 \times 10^{-4}$

### 3.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) โพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ )
- 2) โซเดียม อาร์เซนเต ไดเบสิก เฮปตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- 3) กรดไนตริกเข้มข้น (65%  $\text{HNO}_3$ )

#### 4) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)

### 3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

#### 3.3.1 การศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในวุ้นและกากโลหะกรรม รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ

##### 1) การเตรียมภาชนะที่ใช้ทดลอง

การเตรียมภาชนะทดลอง ภาชนะทดลองที่ใช้มี 2 รูปทรง คือ (1) ภาชนะทรงสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 29 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร สูง 27 เซนติเมตร และ (2) ภาชนะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 23 เซนติเมตร นำภาชนะทั้งหมดแช่กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นล้างด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่น นำขั้วอิเล็กโทรดที่สะอาดมาวางในรูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ระยะห่างระหว่างขั้ว 15 เซนติเมตร โดยมีอิเล็กโทรดตรงกลางเป็นขั้วแอโนด (Anode) และอิเล็กโทรดโดยรอบเป็นขั้วแคโทด (Cathode)

##### 2) การเตรียมตัวอย่างวุ้นทดลอง

2.1) การเตรียมตัวอย่างวุ้น วุ้นที่ใช้เป็นเกรตที่ใช้ในการทำอาหาร วุ้นที่เตรียมแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ (1) ชั้นล่างเป็นวุ้นที่ปนเปื้อนสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (2) ชั้นบนเป็นวุ้นที่ไม่มีการปนเปื้อนสารหนู

2.2) การเตรียมวุ้นปนเปื้อน นำสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ( $\text{KNO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ให้ความร้อนจนอุณหภูมิประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส เติมน้ำวุ้นปริมาณ 15 กรัม คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นหยุดให้ความร้อน ผสมสารประกอบสารหนู ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ปริมาณ 0.2173 กรัม (ความเข้มข้นสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) นำสารเทใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ โดยวุ้นชั้นล่างที่ปนเปื้อนสารหนูจะเทให้มีความสูงจากก้นถึงขึ้นมา 10 เซนติเมตรซึ่งภาชนะทรงเหลี่ยมจะใช้ปริมาตร 13.7 ลิตร และทรงกลม 10.8 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนวุ้นแข็งตัว

2.3) การเตรียมวุ้นที่ไม่มีปนเปื้อน นำสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ( $\text{KNO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ให้ความร้อนจนอุณหภูมิประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส เติมน้ำวุ้นปริมาณ 15 กรัม คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารเทใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ โดยวุ้นชั้นบนที่ไม่ปนเปื้อนจะเทให้มีความสูงจากชั้นที่ปนเปื้อนที่แข็งตัวแล้วขึ้นมา 10 เซนติเมตร ซึ่ง

ภาชนะทรงเหลี่ยมจะใช้ปริมาตร 13.7 ลิตร และทรงกลม 13.2 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนวัน  
แข็งตัว

### 3) การเตรียมตัวอย่างกากโลหะกรรม

3.1) ทำการสำรวจพื้นที่ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ความลึกจากพื้น  
กากโลหะกรรมประมาณ 0-30 เซนติเมตร จากบริเวณบ่อกักเก็บกากแร่ของเหมืองทองคำ นำ  
กากโลหะกรรมมาผึ่งให้แห้ง และผสมให้เป็นตัวอย่างเดียวกัน

3.2) ทำการสุ่มตัวอย่างกากโลหะกรรมมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหา  
ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electrical  
conductivity; EC) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance; R) ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน  
(Oxidation reduction potential; ORP) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation  
exchange capacity; CEC) ค่าความชื้น (Moisture) และปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic;  
TAs)

4) การดำเนินการทดลองผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูใน  
วัน และกากโลหะกรรม รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ

4.1) การทดลองในวัน (ดังภาคผนวก ก4) ประกอบด้วยการทดลองขั้ว  
อิเล็กโทรดกราไฟต์ (Graphite) และขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส เกรด 316L (Stainless steel 316L)  
โดยเทวุ้นที่มีระดับความเข้มข้นสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั้นที่ปนเปื้อนได้เทจากกันถึงสูง 10  
เซนติเมตร ส่วนชั้นที่ไม่ปนเปื้อน (ไม่มีการเติมสารหนู) และเทถัดจากชั้นที่ปนเปื้อนสูง 10 เซนติเมตร  
ในภาชนะทรงกลม ขนาด 35×22 เซนติเมตร และทรงเหลี่ยม ขนาด 29×46×27 เซนติเมตร และทำ  
การวางขั้วอิเล็กโทรดขั้วแอโนด (Anode) บริเวณตรงกลาง และวางขั้วแคโทด (Cathode) รอบ  
ขั้วแอโนด (Anode) 6 ขั้ว (รูปทรงหกเหลี่ยม) ทำการป้อนสนามไฟฟ้าปริมาณ 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ )  
และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยในแต่ละปริมาณสนามไฟฟ้า  
ที่ป้อนมีจำนวน 1 ภาชนะ รวมทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง

4.2) การทดลองในกากโลหะกรรมที่มีการปนเปื้อนสารหนู (ดังภาคผนวก ก5)  
โดยนำมาทำการทดลองป้อนปริมาณสนามไฟฟ้า ใช้ชนิดขั้วอิเล็กโทรด และลักษณะภาชนะที่ให้ผลดี  
ที่สุดในการทดลองผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในวัน รวมทั้งหมด 3 ชุดการ  
ทดลอง

### 5) การเก็บตัวอย่าง

5.1) การเก็บตัวอย่างวัน (ดังภาคผนวก ก6) โดยทำการเก็บตัวอย่างวันหลังจาก  
ป้อนสนามไฟฟ้าฟ้าครบ 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทั้งหมด 9 บริเวณ โดยใช้ท่อเอชดีพีอี (HDPE) ในแต่  
ละบริเวณตัวอย่างได้แบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นบน 10 เซนติเมตร และชั้นล่าง 10 เซนติเมตร โดยแต่ละ

บริเวณได้ทำการเก็บ 5 ตัวอย่าง นำมาผสมกันเพื่อเป็นตัวแทนหนึ่งตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างเก็บใส่ถุงซิปลง และนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs)

5.2) การเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรม ทำการเก็บตัวอย่างหลังจากป้อนสนามไฟฟ้าครบ 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 บริเวณ (บริเวณขั้วแอโนด แคโทด และระหว่างขั้ว) โดยใช้ท่อเอชดีพีอี (HDPE) โดยแต่ละส่วนได้ทำการเก็บ 5 ตัวอย่าง (ไม่มีการแบ่งชั้นบนและชั้นล่าง) นำตัวอย่างกากโลหะกรรมมาผสมกันเพื่อเป็นตัวแทนหนึ่งตัวอย่างและแยกเป็น 2 ส่วน หลังจากนั้นนำตัวอย่างเก็บใส่ถุงซิปลง โดยส่วนที่ 1 นำตัวอย่างที่เก็บมาแล้วผึ่งให้แห้งและนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความชื้น (Moisture) จากนั้นนำตัวอย่างส่วนที่ 2 ไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ใส่ถุงซิปลง และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs)

#### 6) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

6.1) การวิเคราะห์รั้ว นำตัวอย่างรั้วมาละลายโดยให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส จนละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตวงให้ได้ปริมาตร 45 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยกรดไนตริก (65% HNO<sub>3</sub>) จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 2007) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) โดยเครื่อง ICP-OES

6.2) การวิเคราะห์กากโลหะกรรม ตัวอย่างกากโลหะกรรมส่วนที่ไม่ได้อบรมนำมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) และค่าความชื้น (Moisture) ส่วนตัวอย่างกากโลหะกรรมที่อบอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ชั่งมา 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (37% HCl) จำนวน 9 มิลลิลิตร และกรดไนตริก (65% HNO<sub>3</sub>) จำนวน 3 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3051A (USEPA, 2007) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) โดยเครื่อง ICP-OES

#### 7) การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการเคลื่อนที่ของสารหนูในรั้ว และกากโลหะกรรม ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ ANOVA เพื่อหาค่า F-value ของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในรั้ว และกากโลหะกรรม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ข้อมูลมีความแตกต่างกัน จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)

### 3.3.2 การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จุลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู

#### 1) การเตรียมตัวอย่างกากโลหกรรม

กากโลหกรรมที่นำมาจากบ่อกักเก็บกากแร่ของการทำเหมืองแร่ทองคำ (ดังภาคผนวก ก7) และทำการแยกเศษไม้หรือเศษวัสดุที่ไม่ต้องการออก จากนั้นผึ่งในที่ร่มให้แห้ง และผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน และนำกากโลหกรรมบางส่วนมาทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น โดยนำกากโลหกรรมไปบดและร่อนผ่านตะแกรกร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร และทำการวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ ได้แก่ ลักษณะเนื้อกากโลหกรรม (Texture) ความชื้น (Moisture) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter content) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available potassium) และปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs)

#### 2) การเตรียมภาชนะปลูก

การทดลองในครั้งนี้ใช้ภาชนะพลาสติกทรงกระบอกความสูง 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร จำนวน 96 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำภาชนะไปผึ่งให้แห้ง

#### 3) การเตรียมตัวอย่างพืชทดลอง (ดังภาคผนวก ก8)

พืชที่ใช้ในการวิจัย คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ตัวอย่างพืชทดลองที่ใช้ในการศึกษานำมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา พืชที่นำมาใช้ในการทดลองปลูกโดยใช้วิธีการปักชำ โดยได้เลือกต้นที่มีอายุ ขนาด และน้ำหนักเท่า ๆ กัน และมีความสมบูรณ์แข็งแรง ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างพืชไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) ในพืชก่อนทำการทดลอง

3.1) ทำการสุ่มตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระในพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนสารหนู โดยทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมสารหนูก่อนทำการปลูกทดลอง ด้วยวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) เป็นการย่อยด้วยกรดไนตริก (65%  $\text{HNO}_3$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) ด้วยเครื่อง ICP-OES จากผลการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณสารหนูทั้งในส่วนใต้ดิน (ราก) และส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีการปนเปื้อนสารหนู

3.2) ทำการคัดเลือกท่อนพันธุ์ที่มีขนาด และความยาวใกล้เคียงกัน นำมาปักชำในดิน จากนั้นดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 3 เดือน ในโรงเรือนเพาะชำ

3.3) คัดเลือกต้นที่มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน น้ำหนักหย้าเนเปียร์แคระอยู่ในช่วงประมาณ 35-40 กรัม จำนวน 96 ท่อน นำพีชมาล้างน้ำให้สะอาดก่อนย้ายลงปลูกในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้

4) การดำเนินการทดลองความสามารถของหย้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู (ดังภาคผนวก ก9)

4.1) การเตรียมชุดทดลองด้วยการปลูกพีชในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) กระจกที่ใช้ปลูกเป็นทรงกระบอกมีขนาดความสูง 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สำหรับปลูกพีช 1 ต้น ต่อหนึ่งกระจก โดยใช้กากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู 68.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณ 11 กิโลกรัมต่อหนึ่งกระจก ทั้งนี้ในการทดลองได้ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสเกรด 316L (Stainless steel 316L) ในการทดลองที่มีรูปแบบเป็นทรงกระบอกสูง 30 เซนติเมตร จำนวน 7 แท่ง สำหรับการทดลองต่อหนึ่งกระจก โดยแบ่งขั้วอิเล็กโทรดที่จะให้กระแสไฟฟ้าผ่าน ดังนี้ ขั้วอิเล็กโทรดที่หนึ่งจะใช้เป็นขั้วแอโนด (Anode) สำหรับปักลงในดินที่จุดศูนย์กลางของกระจก ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เหลืออีกหกขั้วจะใช้เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ที่ปักลงในดินบริเวณขอบกระจกเป็นรูปหกเหลี่ยมในระยะที่เหมาะสม ทำการรดน้ำปริมาณ 200 มิลลิลิตรทุกสองวัน (ความชื้น 15% ของกากโลหะกรรมที่วันแรกของการทดลอง) และไม่มีการใส่ปุ๋ยใด ๆ ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

4.2) การทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองนั้น ประกอบด้วยชุดการทดลอง 1) ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า 2) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร 3) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ 4) ให้กระแสไฟฟ้าที่ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้านาน 3 ชั่วโมงต่อวัน (ช่วงเวลา 09.00 ถึง 12.00 น.)

5) ระยะเวลาของการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด คือ 120 วัน (4 เดือน) โดยทำการเก็บตัวอย่างพีช และกากโลหะกรรม ทุก ๆ 15 วัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง คือ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน โดยปฏิบัติการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

6) การเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างพีชและกากโลหะกรรม

6.1) การเก็บตัวอย่างพีชทำได้โดยแยกกากโลหะกรรมออกจากรากพีช ต่อมานำพีชไปล้างด้วยน้ำประปาและน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) นำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นแยกส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) ออกจากกัน ชั่งน้ำหนักสดในแต่ละส่วน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน

24-48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นบดพืชตัวอย่างแบบแยกส่วนให้ละเอียด และสกัดตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) เป็นการย่อยด้วยกรดในระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) ด้วยเครื่อง ICP-OES

6.2) การเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) โดยใช้ท่อเอชดีพีอี (HDPE) เก็บตัวอย่างบริเวณโดยรอบขั้วอิเล็กโทรด 3 จุด ตามระดับความลึก 20 เซนติเมตร และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของกากโลหะกรรม ในส่วนของตัวแทนตัวอย่างกากโลหะกรรมทั้งกระถางนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด โดยนำตัวอย่างกากโลหะกรรมที่อยู่ในกระถางไปผูกไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำกากโลหะกรรมมาสกัดตามวิธีการของ USEPA method 3051A (USEPA, 2007) เป็นการย่อยด้วยกรดในระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total arsenic; TAs) ด้วยเครื่อง ICP-OES

6.3) การศึกษาการกระจายตัว และการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวอย่างพืชทดลอง โดยนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) เพื่อศึกษาการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ ในชุดการทดลองที่ 120 วัน

#### 7) การบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (มวลชีวภาพ)

ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) ในระหว่างช่วงเวลาของการทดลองต่าง ๆ (Hoffmann, 2002) ข้อมูลที่ได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$RGR = \frac{\ln(W2) - \ln(W1)}{t2 - t1}$$

สมการที่ 3

เมื่อ RGR = อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กรัมต่อวัน)  
 W1 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง (กรัม)  
 W2 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง (กรัม)  
 t1 = เวลาเริ่มทดลอง (วัน)  
 t2 = เวลาหลังทดลอง (วัน)  
 ln = Natural logarithm

#### 8) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงสารหนูในกากโลหกรรม และ ปริมาณการสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะที่ได้จากการทดลองโดยใช้ ANOVA เพื่อหาค่า F-value ของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่พบในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และ ส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และกากโลหกรรม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ ข้อมูลมีความแตกต่างกัน จะนำมาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูล ด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)





## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การศึกษาศักยภาพของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากการทำเหมืองแร่ทองคำได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่สารหนูในวุ้น และกากโลหะกรรม รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ และ 2) การศึกษาศักยภาพของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นและกากโลหะกรรมด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การศึกษาศักยภาพของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อปัจจัยที่มีผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น มีปัจจัยที่ศึกษาดังนี้ ภาชนะทรงกลม และทรงเหลี่ยม ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (Graphite) และสแตนเลส 316L (Stainless steel 316L) ปริมาณของสนามไฟฟ้าฟลักซ์ที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยมีการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Hexagonal) เต็มพื้นที่ และตลอดความลึกของภาชนะทดลอง ซึ่งประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) จำนวน 6 ขั้ว และขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวกได้ใช้เป็นขั้วสแตนเลส (Stainless steel 316L) จำนวน 1 ขั้ว และทำการป้อนสนามไฟฟ้าผ่านตัวกลางวุ้นทดลองที่ปนเปื้อนสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงติดต่อกัน หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างโดยแบ่งบริเวณในการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 9 บริเวณ ที่ 2 ระดับ คือ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) และ 11-20 เซนติเมตร (บน) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในแต่ละส่วน โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 9 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 4.1 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของชุดการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ชุดการทดลอง		รายละเอียดของชุดการทดลอง
1 ชุดควบคุม	(0 V cm <sup>-1</sup> )	ชุดการทดลองที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า
2	(1 V cm <sup>-1</sup> )	ภาวะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp กลม)
3		ภาวะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl กลม)
4		ภาวะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp เหลี่ยม)
5		ภาวะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl เหลี่ยม)
6	(2 V cm <sup>-1</sup> )	ภาวะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (2 V gp กลม)
7		ภาวะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl กลม)
8		ภาวะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (2 V gp เหลี่ยม)
9		ภาวะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl เหลี่ยม)

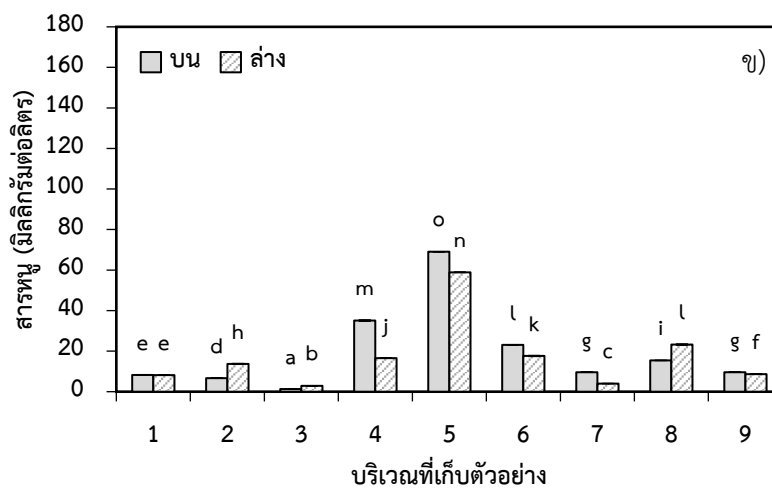
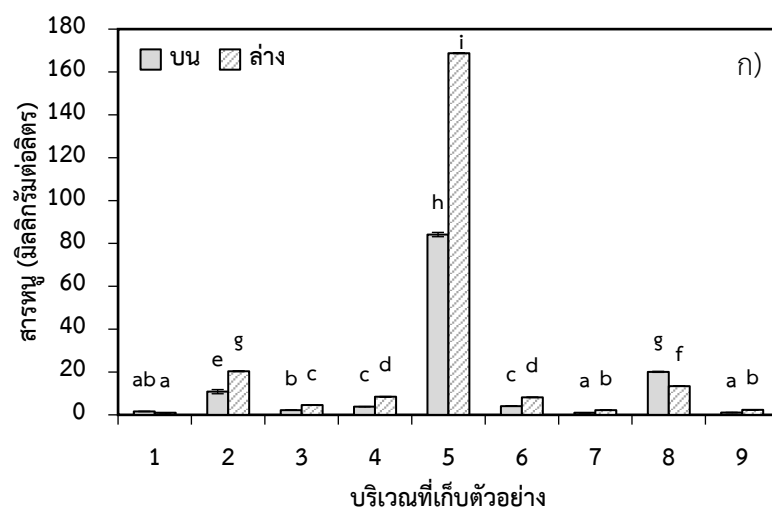
#### 4.1.1 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น

##### 1) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 (1 V cm<sup>-1</sup>) โวลต์ต่อเซนติเมตร

##### 1.1) การทดลองในภาวะทรงกลม

ผลการทดลองในภาวะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp กลม) ดังรูปที่ 4.1k พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละบริเวณ คือ มีการสะสมสารหนูสูงสุดในบริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นบริเวณขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวุ้นชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 166.67-180.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 83.55-85.32 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $168.80 \pm 0.21$  และ  $84.14 \pm 1.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 หรือเป็นบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.98 \pm 0.01$ ,  $20.36 \pm 0.17$ ,  $4.58 \pm 0.04$ ,  $8.44 \pm 0.14$ ,  $8.18 \pm 0.09$ ,  $2.21 \pm 0.03$ ,  $13.42 \pm 0.04$  และ  $2.37 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.58 \pm 0.02$ ,  $10.82 \pm 0.99$ ,  $2.16 \pm 0.02$ ,  $3.86 \pm 0.02$ ,  $4.07 \pm 0.04$ ,  $1.02 \pm 0.01$ ,  $20.07 \pm 0.24$  และ  $1.10 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ภาวะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl กลม) ดังรูปที่ 4.1ข พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในแต่ละบริเวณมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ บริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นบริเวณขั้วบวก มีการสะสมสารหนูสูงสุด โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวุ้นชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 57.69-58.96 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มี

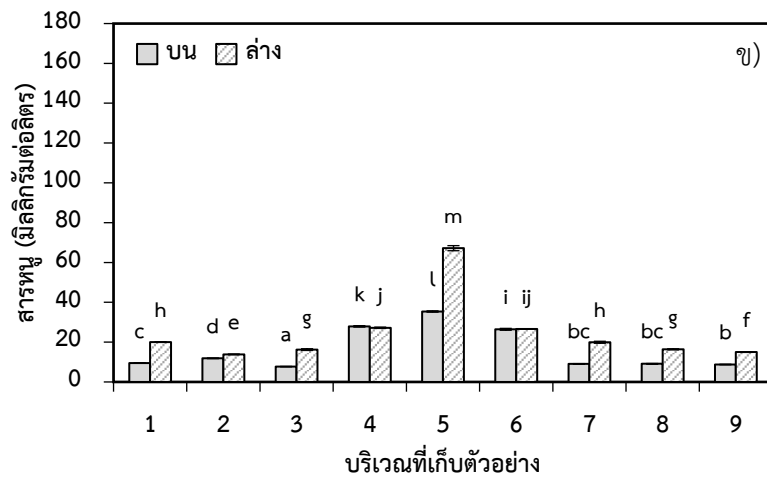
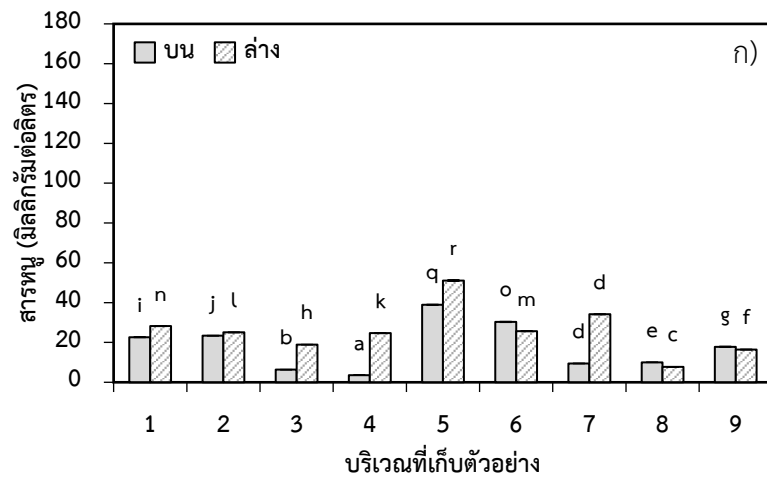
ปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 68.31-68.51 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $58.24 \pm 0.65$  และ  $68.39 \pm 0.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 ซึ่งเป็นบริเวณชั่วคราว มีค่าเท่ากับ  $8.10 \pm 0.05$ ,  $13.63 \pm 0.21$ ,  $2.82 \pm 0.03$ ,  $16.47 \pm 0.09$ ,  $17.55 \pm 0.24$ ,  $3.95 \pm 0.04$ ,  $23.16 \pm 0.31$  และ  $8.60 \pm 0.07$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $8.16 \pm 0.07$ ,  $6.61 \pm 0.07$ ,  $1.24 \pm 0.01$ ,  $35.02 \pm 0.35$ ,  $23.00 \pm 0.08$ ,  $9.53 \pm 0.07$ ,  $15.35 \pm 0.06$  และ  $9.56 \pm 0.08$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงกลม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $1 \text{ V gp}$  กลม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $1 \text{ V sl}$  กลม)

## 1.2) การทดลองในภาชนะทรงเหลี่ยม

ในส่วนของผลการทดลองในภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp เหลี่ยม) ดังรูปที่ 4.2ก นั้น พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมีการสะสมสารหนูสูงสุดในบริเวณที่ 5 ที่เป็นตำแหน่งขั้วบวกเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่วุ้นชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 51.21-51.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 38.09-38.74 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $51.05 \pm 0.38$  และ  $38.84 \pm 0.23$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำเช่นเดียวกับการทดลองในภาชนะทรงกลม (1 V gp กลม) ที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 ซึ่งเป็นบริเวณขั้วลบ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $28.14 \pm 0.15$ ,  $25.01 \pm 0.17$ ,  $18.87 \pm 0.06$ ,  $24.63 \pm 0.18$ ,  $25.61 \pm 0.18$ ,  $34.08 \pm 0.20$ ,  $7.68 \pm 0.04$  และ  $16.36 \pm 0.17$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $22.58 \pm 0.17$ ,  $23.34 \pm 0.09$ ,  $6.29 \pm 0.05$ ,  $3.47 \pm 0.03$ ,  $30.24 \pm 0.24$ ,  $9.38 \pm 0.11$ ,  $9.93 \pm 0.04$  และ  $17.74 \pm 0.24$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl เหลี่ยม) ดังรูปที่ 4.2ข พบว่า ในบริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นขั้วบวก มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวุ้นชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 65.79-68.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 35.17-35.71 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $67.18 \pm 1.28$  และ  $35.38 \pm 0.29$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 ที่เป็นบริเวณขั้วลบ มีค่าเท่ากับ  $9.45 \pm 0.08$ ,  $11.86 \pm 0.14$ ,  $7.72 \pm 0.06$ ,  $27.93 \pm 0.33$ ,  $26.44 \pm 0.46$ ,  $9.09 \pm 0.11$ ,  $9.12 \pm 0.14$  และ  $8.75 \pm 0.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 เป็นบริเวณขั้วลบ มีค่าเท่ากับ  $20.00 \pm 0.11$ ,  $13.86 \pm 0.15$ ,  $16.24 \pm 0.42$ ,  $27.20 \pm 0.32$ ,  $26.57 \pm 0.11$ ,  $19.93 \pm 0.49$ ,  $16.40 \pm 0.22$  และ  $14.99 \pm 0.15$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

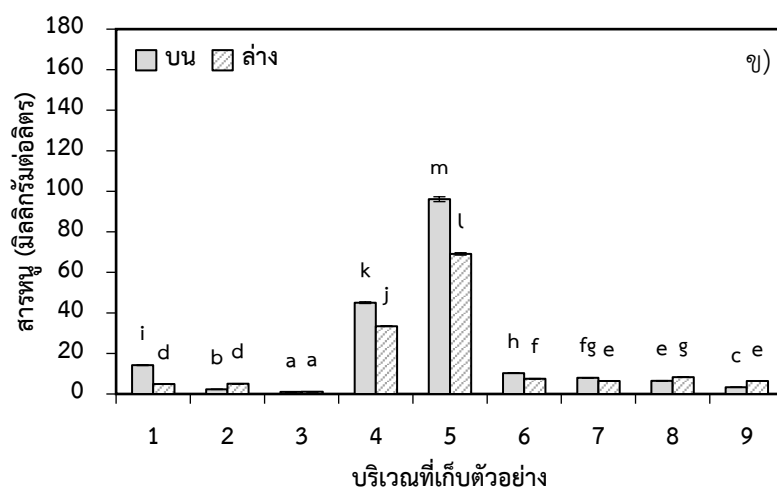
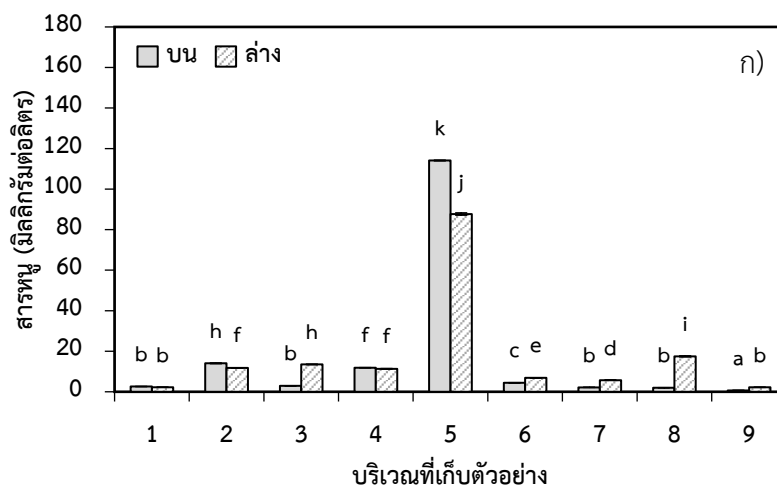


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงเหลี่ยม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $1 \text{ V gp}$  เหลี่ยม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $1 \text{ V sl}$  เหลี่ยม)

2) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า  $2 (2 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร

2.1) การทดลองในภาชนะทรงกลม

ผลการทดลองในภาชนะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  กลม) ดังรูปที่ 4.3ก พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละบริเวณมีความสอดคล้องกับในชุดการทดลอง  $1 (1 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ดังนี้ บริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นขั้วบวก มีการสะสมสารหนูสูงสุด ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวงชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 87.04-88.21 มิลลิกรัมต่อลิตร และวงชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 111.62-115.53 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $87.69 \pm 0.59$  และ  $114.10 \pm 0.21$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่เป็นขั้วลบ ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 เป็นบริเวณขั้วลบ มีค่าเท่ากับ  $2.21 \pm 0.02$ ,  $11.78 \pm 0.09$ ,  $13.53 \pm 0.16$ ,  $11.32 \pm 0.18$ ,  $6.89 \pm 0.05$ ,  $5.71 \pm 0.06$ ,  $17.47 \pm 0.29$  และ  $2.20 \pm 0.05$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $2.60 \pm 0.03$ ,  $14.04 \pm 0.21$ ,  $2.96 \pm 0.04$ ,  $11.88 \pm 0.07$ ,  $4.44 \pm 0.08$ ,  $2.16 \pm 0.02$ ,  $2.02 \pm 0.03$  และ  $0.67 \pm 0.00$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ภาชนะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$  กลม) ดังรูปที่ 4.3ข พบว่า มีปริมาณการสะสมสารหนูสูงสุดในบริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นขั้วบวก โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวงชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 68.52-69.63 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวงชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 94.76-96.08 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ  $69.12 \pm 0.56$  และ  $96.10 \pm 1.20$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วนของการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $4.8 \pm 0.02$ ,  $5.03 \pm 0.06$ ,  $1.10 \pm 0.02$ ,  $33.43 \pm 0.11$ ,  $7.52 \pm 0.10$ ,  $6.43 \pm 0.04$ ,  $8.27 \pm 0.07$  และ  $6.38 \pm 0.12$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $14.19 \pm 0.16$ ,  $2.27 \pm 0.01$ ,  $1.01 \pm 0.00$ ,  $45.05 \pm 0.41$ ,  $10.27 \pm 0.09$ ,  $8.00 \pm 0.06$ ,  $6.51 \pm 0.08$  และ  $3.29 \pm 0.05$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



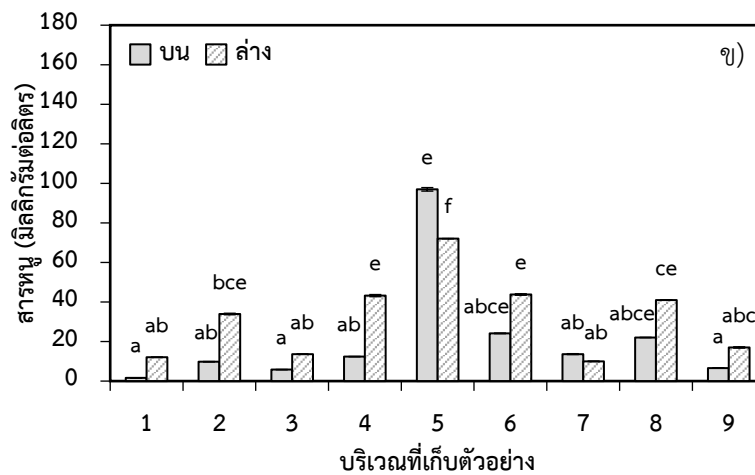
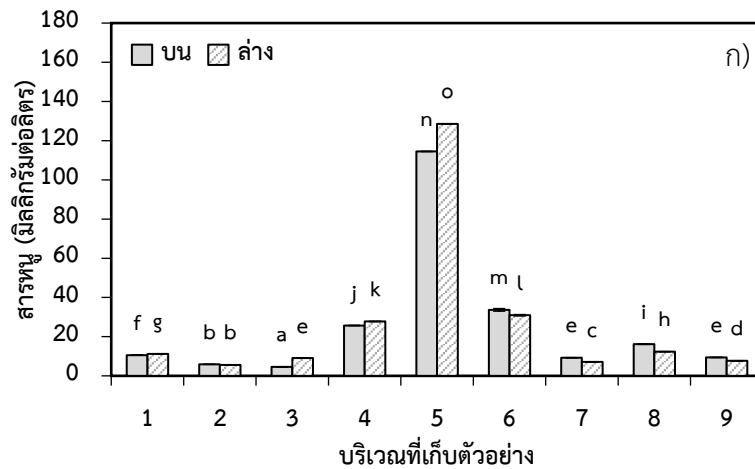
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงกลม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  กลม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$  กลม)

## 2.2) การทดลองในภาชนะทรงเหลี่ยม

ผลการทดลองในภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  เหลี่ยม) ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละบริเวณ ดังนี้ บริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นขั้วบวก มีการสะสมสารหนูสูงสุด ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณนี้ขึ้นข้างล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 127.94-128.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวุ้นชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 113.90-115.54 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $128.60 \pm 0.08$  และ  $114.50 \pm 0.09$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วน

ของบริเวณข้าวลบมีการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $11.21 \pm 0.03$ ,  $5.60 \pm 0.06$ ,  $9.09 \pm 0.09$ ,  $27.75 \pm 0.11$ ,  $30.94 \pm 0.38$ ,  $7.10 \pm 0.10$ ,  $12.37 \pm 0.04$  และ  $7.69 \pm 0.09$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $10.54 \pm 0.07$ ,  $5.86 \pm 0.05$ ,  $4.59 \pm 0.02$ ,  $25.70 \pm 0.12$ ,  $33.68 \pm 0.68$ ,  $9.28 \pm 0.06$ ,  $16.19 \pm 0.17$  และ  $9.41 \pm 0.10$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับในการทดลองภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ใช้อิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl เหลี่ยม) ดังรูปที่ 4.4 พบว่า มีการสะสมสารหนูสูงสุดในบริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นข้าวบวก โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณวันชั้นล่างหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) อยู่ในช่วง 71.91-72.24 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบในวันชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) มีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10.87-108.07 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ  $72.08 \pm 0.02$  และ  $96.99 \pm 0.89$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในส่วนของบริเวณที่มีการสะสมสารหนูในปริมาณที่ต่ำหรือที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร (ล่าง) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $12.04 \pm 0.08$ ,  $33.93 \pm 0.40$ ,  $13.59 \pm 0.07$ ,  $43.23 \pm 0.55$ ,  $43.79 \pm 0.37$ ,  $10.00 \pm 0.13$ ,  $40.99 \pm 0.04$  และ  $17.03 \pm 0.33$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน) บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ  $1.65 \pm 0.01$ ,  $9.83 \pm 0.07$ ,  $5.83 \pm 0.06$ ,  $12.40 \pm 0.07$ ,  $24.15 \pm 0.16$ ,  $13.65 \pm 0.23$ ,  $22.05 \pm 0.06$  และ  $6.56 \pm 0.10$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ





รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของสารหนูในชุดการทดลองสนามไฟฟ้า  $2 (2 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทรงเหลี่ยม ก) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  เหลี่ยม) และ ข) ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$  เหลี่ยม)

จากผลการทดลองในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ทำการบ่อนปริมาณสนามไฟฟ้าพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละบริเวณของพื้นที่เก็บตัวอย่างวุ้น และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีแนวโน้มของการเคลื่อนที่สารหนูไปในทิศทางเดียวกัน คือ บริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 เป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแคโทด มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในปริมาณที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ 5 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแอโนดหรือขั้วบวก โดยพบว่า พลังงานจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถส่งผลให้สารหนูมีการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดหรือขั้วลบไปยังขั้วแอโนดหรือขั้วบวกในแนวราบ เนื่องจากไอออนของสารประกอบสารหนูที่มีประจุเป็นลบสามารถเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีประจุที่ตรงข้าม คือ ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของประจุบวกต่าง ๆ ในตัวกลางที่เคลื่อนที่

จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Virkutyte et al. (2002) และ Putra et al. (2013) ที่พบว่า สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นให้สารประกอบสารหนูเกิดการแตกตัวเป็นไอออนลบ และเกิดการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) นอกจากนี้ เมื่อสังเกตที่ระดับความลึก 11-20 เซนติเมตร (บน) ซึ่งเป็นส่วนของรู้นที่ไม่มีสารปนเปื้อนสารหนู พบว่า มีการสะสมสารหนูเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า จลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถส่งผลให้สารหนูเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด (บริเวณที่ 5) หรือขั้วบวกในแนวตั้งได้ด้วย

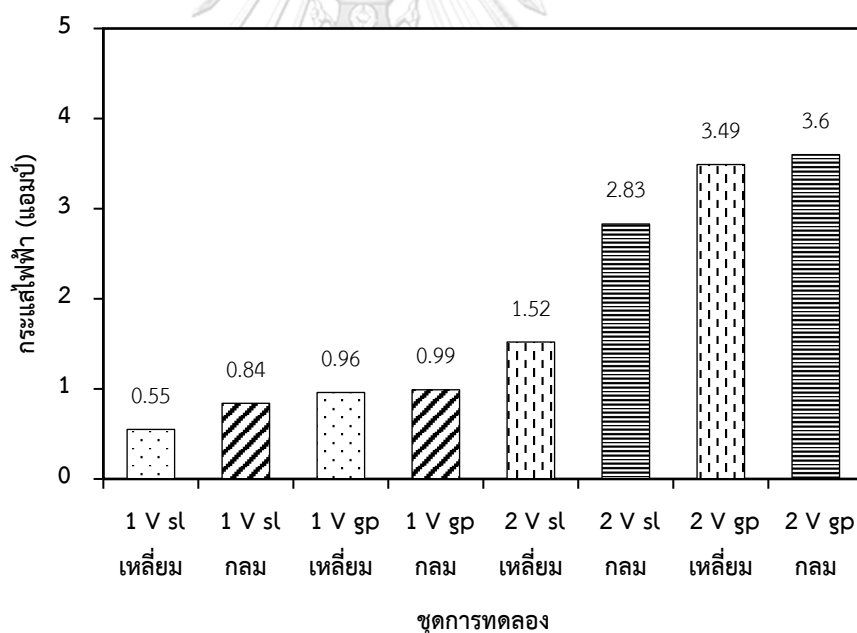
#### 4.1.2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางรู้น

1) ผลของปริมาณสนามไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู จากผลการทดลอง พบว่า ในชุดการทดลองที่ 6, 7, 8 และ 9 ที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร (ดังตารางที่ 4.2) ได้แก่ ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  กลม) ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$  กลม) ภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ( $2 \text{ V gp}$  เหลี่ยม) และภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ( $2 \text{ V sl}$  เหลี่ยม) มีการสะสมสารหนูในบริเวณที่ 5 (รู้นชั้นบน) มีค่ามากที่สุด เท่ากับ  $114.06 \pm 2.13$ ,  $96.10 \pm 1.20$ ,  $114.49 \pm 0.91$  และ  $96.99 \pm 0.89$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) กับชุดการทดลองที่ 2, 3, 4 และ 5 ที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยมีค่าเท่ากับ  $84.14 \pm 1.02$ ,  $68.39 \pm 0.11$ ,  $38.84 \pm 0.23$  และ  $35.38 \pm 0.29$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสนามไฟฟ้า (ดังรูปที่ 4.5) พบว่า สารหนูมีการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นทั้งในแนวราบและตั้ง ซึ่งผลมีความสอดคล้องกับ Tang et al. (2018) ที่มีการเพิ่มปริมาณสนามไฟฟ้าเพื่อการบำบัดและเคลื่อนที่ของสารหนูเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสนามไฟฟ้าสามารถทำให้สารหนูถูกกระตุ้นให้สารประกอบสารหนูเกิดการแตกตัวเป็นไอออนลบ คือ  $\text{NaHAsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  และ  $\text{AsO}_4^{3-}$  ได้มากขึ้น และเกิดการเคลื่อนที่โดยทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทด (Cathode) เข้าหาขั้วแอโนด (Anode) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) เพิ่มขึ้น และยังขึ้นอยู่กับแรงต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางด้วย และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสนามไฟฟ้าสามารถทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางมีผลน้อยลง (ดังภาคผนวก ก10) จึงทำให้สารปนเปื้อนเคลื่อนตัวได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูบริเวณวันชั้นบนหรือที่ระดับ 11-20 เซนติเมตร (บน)

ชุดการทดลอง	รายละเอียดของชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของสารหนู (มิลลิกรัมต่อลิตร; mg l <sup>-1</sup> )
1 (0 V cm <sup>-1</sup> )	ชุดการทดลองที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า	0.00
2	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp กลม)	84.14±1.02 <sup>c</sup>
3	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl กลม)	68.39±0.11 <sup>d</sup>
4 (1 V cm <sup>-1</sup> )	ภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (1 V gp เหลี่ยม)	38.84±0.23 <sup>e</sup>
5	ภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl เหลี่ยม)	35.38±0.29 <sup>f</sup>
6	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (2 V gp กลม)	114.06±2.13 <sup>a</sup>
7	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl กลม)	96.10±1.20 <sup>b</sup>
8 (2 V cm <sup>-1</sup> )	ภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (2 V gp เหลี่ยม)	114.49±0.91 <sup>a</sup>
9	ภาชนะทรงเหลี่ยมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl เหลี่ยม)	96.99±0.89 <sup>b</sup>

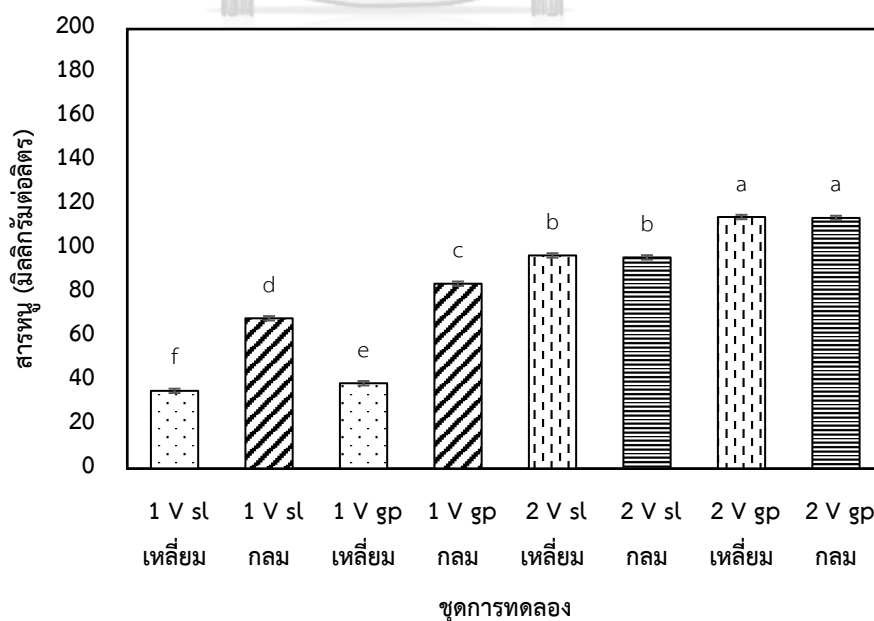
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์



รูปที่ 4.5 การเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง

2) ผลของขั้วอิเล็กโทรดต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวัน จากตารางที่ 4.2 ในชุดการทดลอง พบว่า ในชุดการทดลองที่ 2 (1 V gp กลม) และ 4 (1 V gp เหลี่ยม) ที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 (1 V cm<sup>-1</sup>) โวลต์ต่อเซนติเมตร ลงในภาชนะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ และภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ พบว่า การใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ (Graphite) ส่งผลให้

มีการสะสมความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณที่ 5 (วันชั้นบน) มากที่สุด (ดังตารางที่ 4.2) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปริมาณสนามไฟฟ้าและภาชนะชนิดเดียวกัน (ดังรูปที่ 4.6) มีค่าเท่ากับ  $84.14 \pm 1.02$  และ  $38.84 \pm 0.23$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองที่ 2 (1 V gp กลม) และ 4 (1 V gp เหลี่ยม) โดยค่ามีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่ 3 (1 V sl กลม) และ 5 (1 V sl เหลี่ยม) ที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (Stainless steel 316 L) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $68.39 \pm 0.11$  และ  $35.38 \pm 0.29$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองที่ 3 และ 5 นอกจากนี้ยังพบว่า ในชุดการทดลองที่ 6 (2 V gp กลม) และ 8 (2 V gp เหลี่ยม) ที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่  $2 (2 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ได้แก่ ภาชนะทรงกลมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ และภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ พบว่า การสะสมสารหนูในบริเวณที่ 5 (วันชั้นบน) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $114.06 \pm 2.13$  และ  $114.49 \pm 0.91$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองที่ 6 และ 8 ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) กับชุดการทดลองที่ 7 (2 V sl กลม) และ 9 (2 V sl เหลี่ยม) ที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส โดยมีค่าเท่ากับ  $96.10 \pm 1.20$  และ  $96.99 \pm 0.89$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองที่ 7 และ 9 ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติของขั้วกราไฟต์ที่มีการนำไฟฟ้าได้ดี และให้สนามไฟฟ้าที่มีความเสถียรภาพมากกว่าขั้วสแตนเลส โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงของการให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง พบว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองด้วยขั้วกราไฟต์มีมากกว่าการใช้ขั้วสแตนเลส (ดังรูปที่ 4.5) ซึ่งเมื่อมีปริมาณกระแสไฟฟ้ามากในตัวกลางวัน สามารถส่งผลให้สารหนูถูกกระตุ้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนลบ และเกิดการเคลื่อนที่สารหนูเข้าหาขั้วแอโนดมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.6 ระดับความเข้มข้นของสารหนูบริเวณส่วนที่ 5 ที่ระดับความลึก 11-20 เซนติเมตร (บน) ของภาชนะทดลอง

3) ผลของภาชนะต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า หลังทำการเก็บตัวอย่างที่ 72 ชั่วโมง ใน 8 ชุดการทดลอง พบว่า ในชุดที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า ภาชนะรูปแบบทรงกลมที่ใช้ขั้วกราไฟท์ (1 V gp กลม) และขั้วสแตนเลส (1 V sl กลม) มีระดับความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 มากที่สุด เท่ากับ  $84.14 \pm 1.02$  และ  $68.39 \pm 0.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 มีความแตกต่างกับชุดการทดลองรูปแบบทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วกราไฟท์ (1 V gp เหลี่ยม) และขั้วสแตนเลส (1 V sl เหลี่ยม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $38.84 \pm 0.23$  และ  $35.38 \pm 0.29$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองที่ใช้ภาชนะรูปแบบทรงกลมนั้นมีพื้นที่ ๆ ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตำแหน่งการวางขั้วอิเล็กโทรดครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่ารูปแบบภาชนะทรงเหลี่ยม รวมทั้งรูปแบบภาชนะประเภทอื่น ๆ ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Isosaari and Sillanpää (2012); E. K. Jeon et al. (2015); D.-H. Kim et al. (2012) ที่พบว่า การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ให้ผลในการเคลื่อนที่ของสารหนูในแต่ละพื้นที่เข้าหาขั้วแอโนดที่วางตำแหน่งตรงกลางภาชนะทดลองได้ดีขึ้น ซึ่งการวางขั้วอิเล็กโทรดในพื้นที่ ๆ ต้องการบำบัดให้มีรูปแบบใกล้เคียงกับรูปแบบภาชนะทรงกลมมากที่สุดจะส่งผลให้ระนาบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและตัวกลางในการบำบัด ณ ที่นี้ คือ วุ้น เกิดสนามไฟฟ้าในขอบเขตพื้นที่ ๆ กว้างขึ้นตามรัศมีของวงกลมในระนาบแนวนอน 2 มิติ ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า รูปแบบภาชนะทรงเหลี่ยมมีพื้นที่บางส่วนที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า จึงส่งผลให้สารหนูที่อยู่ในพื้นที่บริเวณนั้นมีการเคลื่อนที่ต่ำมากหรือแทบไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ชุดการทดลองรูปแบบภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้วสแตนเลส (2 V sl เหลี่ยม) มีความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 มากที่สุด เท่ากับ  $96.99 \pm 0.89$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองรูปแบบทรงกลมที่ใช้ขั้วสแตนเลส (2 V sl กลม) ที่มีความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 เท่ากับ  $96.10 \pm 1.20$  มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับชุดการทดลองรูปแบบภาชนะทรงเหลี่ยมที่ใช้ขั้ว กราไฟท์ (2 V gp เหลี่ยม) มีความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 มากที่สุด เท่ากับ  $114.49 \pm 0.91$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองรูปแบบทรงกลมที่ใช้ขั้วกราไฟท์ (2 V gp กลม) ที่มีความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 เท่ากับ  $114.06 \pm 2.13$  มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสนามไฟฟ้าจาก 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็น 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถส่งผลให้สารหนูมีการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น หากแต่ในสภาวะตัวกลาง คือ วุ้น ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 1.23 กิโลโอห์ม ซึ่งถือว่าเป็นค่าความต้านทานที่ต่ำมากจนใกล้เคียงกับ 0 กิโลโอห์ม จึงทำให้สภาวะของตัวกลางวุ้นที่สนามไฟฟ้า 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่ขั้วแอโนดได้เร็วกว่าปกติ เป็นผลให้ตัวกลางวุ้นใน

ชุดการทดลองที่ใช้ขั้วสแตนเลสเริ่มมีการละลายและแตกตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณขั้วแอโนดนั้นเพิ่มขึ้นสูงตามปริมาณสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ชัดเจนตั้งแต่ระยะเวลาการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 50 ชั่วโมงขึ้นไป ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารหนูต่ำลงหรือไม่มีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ ในส่วนของชุดการทดลองที่ใช้ขั้วกราไฟต์จะพบการละลายและแตกตัวของตัวกลางวันบริเวณขั้วแอโนดเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 65 ชั่วโมงของการทดลอง เนื่องจากการรูปแบบโครงสร้างของกราไฟต์จะมีการเรียงตัวเป็นชั้นคาร์บอนในรูปแบบเฮลฟา หรือเป็นรูปผลึก 6 หน้า (Hexagonal) ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแต่ละระนาบ โดยอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดมีการถ่ายเทพลังงานได้ดีกว่าชนิดขั้วสแตนเลสที่มีโครงสร้างแบบคอมเพล็กซ์ของโลหะผสม ได้แก่ เหล็ก โครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงไม่มีความเสถียร แม้ว่าปริมาณสนามไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับการเคลื่อนที่ของสารหนูเข้าหาขั้วแอโนดก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tang et al., (2018) พบว่า ปริมาณสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลให้การบำบัด และการเคลื่อนที่ของสารหนูเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังพบว่า มีปัจจัยด้านความต้านทานของตัวกลางที่มาเกี่ยวข้องด้วย ทั้งนี้ผลของขั้วอิเล็กโทรดต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู ยังพบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ใช้ขั้วกราไฟต์ (1 V gp เหล็ก, 1 V gp กลม, 2 V gp เหล็ก และ 2 V gp กลม) มีความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่ 5 มีค่าเท่ากับ  $38.84 \pm 0.23$ ,  $84.14 \pm 1.02$ ,  $114.49 \pm 0.91$  และ  $114.06 \pm 2.13$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ใช้ขั้วสแตนเลส (1 V sl เหล็ก, 1 V sl กลม, 2 V sl เหล็ก และ 2 V sl กลม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $35.38 \pm 0.29$ ,  $68.39 \pm 0.11$ ,  $96.99 \pm 0.89$  และ  $96.10 \pm 1.20$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวันที่ทำการทดลองในภาชนะทรงกลม และขั้วกราไฟต์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของสารหนูได้ดีที่สุด ทั้งในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่เนื่องจากการใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบกราไฟต์นั้นมีต้นทุนสูง และเปราะหักแตกง่ายไม่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับงานในพื้นที่ปนเปื้อนจริง อย่างไรก็ตามการใช้ขั้วสแตนเลสมีความสามารถไม่แตกต่างกับการใช้ขั้วกราไฟต์มากนัก อีกทั้งยังส่งผลต่อการนำไฟฟ้าทำให้สารหนูเคลื่อนที่ในตัวกลางได้เช่นกัน จึงได้พิจารณาเลือกนำขั้วสแตนเลสมาใช้ในภาชนะทรงกลม เพื่อทำการศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในตัวกลางกาทโลหะกรรม ซึ่งมีการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบ 2 มิติ (Two-dimension) โดย D.-H. Kim et al. (2012) ได้กล่าวว่า การวางขั้วแบบ 2 มิติ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็น 2 มิติเชิงเส้น กระแสไฟฟ้าจะมีการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และลดบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าให้น้อยลง อย่างไรก็ตามการวางขั้วแบบหกเหลี่ยม

(Hexagonal) นั้น ส่งผลให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าหนาแน่นมากยิ่งขึ้น และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นแบบ 2 มิติไม่เชิงเส้น จึงส่งผลให้บริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าให้ลดลง หรือกล่าวสรุปได้ว่าปริมาณสนามไฟฟ้ามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้สารหนุมีการเคลื่อนที่มากขึ้น

#### 4.1.3 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรม

กากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลองเป็นกากโลหกรรมที่เก็บจากความลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร จากบ่อกักเก็บกากแร่ บริเวณพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าลักษณะของกากโลหกรรมเป็นดินร่วนปนทราย โดยมีอัตราส่วน ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เท่ากับ 56.6: 33.8: 9.6 กากโลหกรรมมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.35 ซึ่งถือได้ว่ามีความเป็นด่างกลาง ซึ่งส่งผลให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในกากโลหกรรมละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย และอาจอยู่ในรูปของการตกตะกอน สำหรับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 2.43 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2,546 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือ 0.025 เดซิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 242.18 มิลลิโวลต์ ซึ่งค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นบวก แสดงให้เห็นว่ากากโลหกรรมอยู่ในสภาวะออกซิเดชัน ในส่วนความต้านทานไฟฟ้าของกากโลหกรรมพบว่ามีค่าเท่ากับ 21 กิโลโอห์ม ปริมาณอินทรีย์วัตถุในกากโลหกรรมมีค่าเท่ากับ 0.65 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ สมบัติของกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.0325 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 18.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 294 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสารหนูทั้งหมดในกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 60.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเข้มข้นของสารหนูสูง โดยปกติมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีความเข้มข้นของสารหนูไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจาก การอยู่อาศัยและเกษตรกรรมต้องมีความเข้มข้นของสารหนูไม่เกิน 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้นของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติของกากโลหะกรรม	วิธีการ	ค่าที่ตรวจวัดได้
ทราย:ทรายแป้ง:ดินเหนียว	Hydrometer	56.6: 33.8: 9.6
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	1:2 soil/water mixture	8.35
ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1:2 soil/water mixture	2,546
ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; mV)	1:2 soil/water mixture	242.18
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	Ammonium acetate saturation	2.43
ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance; $\text{k}\Omega$ )	Wenner Soil Resistivity Test 4-Point	21
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter; %)		0.65
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; %)		0.0325
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Available phosphorus; $\text{mg kg}^{-1}$ )		18.9
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available potassium; $\text{mg kg}^{-1}$ )		294
ปริมาณสารหนู (Total arsenic; $\text{mg kg}^{-1}$ )	USEPA 3015A	60.02

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ ต่อเซนต์เมตร ต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรม ที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน โดยเลือกใช้ ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส 316L (Stainless steel 316L) และปลุกพืชทดลองในภาชนะทรงกลม ซึ่งประกอบด้วย 2 ชุดการทดลอง แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของชุดการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ชุดการทดลอง	รายละเอียดของชุดการทดลอง
1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ )	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (1 V sl กลม)
2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ )	ภาชนะทรงกลมและขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส (2 V sl กลม)



### 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกากโลหะกรรม

จากการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส 316L (Stainless steel 316L) และทำการทดลองในภาชนะทรงกลม พบว่า การให้สนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ 3, 5 และ 7 วัน มีค่าความเป็นกรด-ด่างในบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) ระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนด (Between) และแอโนด (Anode) (ดังตารางที่ 4.5) โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง คือ 3, 5, และ 7 วัน โดยมีค่าบริเวณขั้วแคโทดเท่ากับ 7.99, 8.41 และ 8.34 ตามลำดับของวันที่เก็บตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดมีความเป็นต่างกลาง ส่วนกากโลหะกรรมบริเวณระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดมีความเป็นต่างกลางเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 7.83, 7.88 และ 7.62 ตามลำดับของวันที่เก็บตัวอย่าง สำหรับกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นจาก 3, 5, และ 7 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 6.57, 5.84 และ 5.70 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดมีความเป็นกรดอ่อน ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมภายหลังทำการเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน นั้นมีแนวโน้มเดียวกับชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมในแต่ละบริเวณของขั้วมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้นตามระยะเวลาที่ป้อนสนามไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า กากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง คือ 3, 5, และ 7 โดยมีค่าเท่ากับ 7.31, 8.67 และ 9.13 ตามลำดับของวันที่เก็บตัวอย่าง ส่วนกากโลหะกรรมบริเวณระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนด พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่ากับ 8.08, 7.53 และ 8.04 ตามลำดับของวันที่เก็บตัวอย่าง สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดนั้น มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการทดลอง คือ 3, 5, และ 7 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 5.74, 2.89 และ 2.41 ตามลำดับของวันที่เก็บตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กากโลหะกรรมในชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นปริมาณสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นกว่าชุดการทดลองแรกส่งผลให้กากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดมีความเป็นต่างสูงขึ้น และในส่วนของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดมีความเป็นกรดสูงขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกากโลหกรรมในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ปริมาณสนามไฟฟ้า	ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม		
		ขั้วแคโทด (Cathode)	ระหว่างขั้ว (Between)	ขั้วแอโนด (Anode)
3	$1 \text{ V cm}^{-1}$	$7.99 \pm 0.12^b$	$7.83 \pm 0.020^b$	$6.57 \pm 0.275^a$
5		$8.41 \pm 0.15^c$	$7.88 \pm 0.045^b$	$5.84 \pm 0.158^a$
7		$8.34 \pm 0.24^c$	$7.62 \pm 0.080^b$	$5.70 \pm 0.283^a$
3	$2 \text{ V cm}^{-1}$	$7.31 \pm 0.74^b$	$8.08 \pm 0.070^c$	$5.74 \pm 0.223^a$
5		$8.67 \pm 0.20^c$	$7.53 \pm 0.236^b$	$2.89 \pm 0.271^a$
7		$9.13 \pm 0.60^c$	$8.04 \pm 0.062^b$	$2.41 \pm 0.323^a$

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (ดังตารางที่ 4.5) ของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทด ระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนด และแอโนด ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างที่ 3, 5 และ 7 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า  $1 \text{ V cm}^{-1}$  และ  $2 \text{ V cm}^{-1}$  โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างในแต่ละบริเวณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อมีปริมาณสนามไฟฟ้า และระยะเวลาการป้อนสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ส่วนบริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง เนื่องจากบริเวณขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่มากขึ้นเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อมีการสะสมของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างบริเวณนี้มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนบริเวณขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ทำให้มีการสะสมของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างบริเวณนี้มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างบริเวณระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดมีค่าอยู่ในช่วง 7 ถึง 8.5 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sharma and Reddy (2004), Ryu et al. (2009) และ C. Cameselle et al. (2013) ที่พบว่า เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าในดินที่ทำการบำบัดจะส่งผลให้บริเวณขั้วแอโนดมีสภาพเป็นกรด บริเวณขั้วแคโทดมีสภาพเป็นด่าง และบริเวณระหว่างขั้วมีสภาพเป็นกลาง

## 2) ค่าความชื้น (Moisture content) ของกากโลหะกรรม

การทดลองในครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ 3, 5 และ 7 วัน แล้วทำการเติมน้ำในวันที่ 3 และ 5 ในปริมาตร 2 ลิตร ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างแล้ว และนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาค่าความชื้น (ตารางที่ 4.6) พบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าความชื้นของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 15.36, 15.85 และ 17.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกากโลหะกรรมบริเวณระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 13.08, 12.59 และ 16.69 ตามลำดับ และในส่วนของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 13.97, 11.35 และ 16.01 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความชื้นของชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า กากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 15.36, 16.66 และ 19.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กากโลหะกรรมบริเวณขั้วระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดในระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 12.59, 13.71 และ 17.64 ตามลำดับ และในส่วนของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดที่ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 12.10, 13.07 และ 14.46 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าความชื้นของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ปริมาณสนามไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้น		
		ขั้วแคโทด (Cathode)	ระหว่างขั้ว (Between)	ขั้วแอโนด (Anode)
3	1 $\text{V cm}^{-1}$	15.36	13.08	13.97
5		15.85	12.59	11.35
7		17.09	16.69	16.01
3	2 $\text{V cm}^{-1}$	15.36	12.59	12.10
5		16.66	13.71	13.07
7		19.32	17.64	14.46

จากการวิเคราะห์ความชื้นในกากโลหะกรรม พบว่า จลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถส่งผลให้สารหนูเคลื่อนที่ได้ โดยเฉพาะในบริเวณขั้วแคโทดที่มีความชื้นสูงกว่าในบริเวณขั้วแอโนด ในทุกระยะเวลา และทุกชุดของการทดลอง ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Shin et al. (2016) และ Virkutyte et al. (2002) ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุภาคของกากโลหะกรรมที่มีประจุลบ และ

โมเลกุลของน้ำหมุนเวียนรอบ ๆ จับกับผิวภาคโลหกรรมจนไม่มีแคตไอออนเหลืออยู่ทำให้โมเลกุลของน้ำที่เหลืออยู่รอบ ๆ ผิวภาคโลหกรรมก่อตัวเป็นชั้น และเกิดการเคลื่อนตัวของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคภาคโลหกรรมผ่านไปตามช่องว่างขนาดเล็กในภาคโลหกรรมโดยแรงกระทำที่เกิดจากสนามไฟฟ้า ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีน้ำอยู่ในช่องว่างขนาดเล็กระหว่างภาคโลหกรรม ซึ่งเมื่อพื้นผิวที่มีประจุสัมผัสกับน้ำจึงส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของไอออนอิเล็กตริก ดับเบิลเลเยอร์ (Electric double layer) ซึ่งทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดสมดุลง ดังนั้น เมื่อมีแรงกระทำหรืออิทธิพลจากสนามไฟฟ้า ไอออนในชั้นนี้จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับไอออนซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้านั้นเอง การเคลื่อนตัวของไอออนบวกจึงดึงให้น้ำในช่องว่างขนาดเล็กเกิดการเคลื่อนตัวตามไปด้วย โดยทั่วไปน้ำจะเคลื่อนตัวจากขั้วบวก (Anode) ไปยังขั้วลบ (Cathode) ตามการเคลื่อนตัวของไอออนบวกในชั้นการกระจาย (Diffuse layer) ทั้งนี้การเพิ่มความชื้นในตัวกลางภาคโลหกรรมสามารถขยายรูพรุน เพิ่มช่องว่างของภาคโลหกรรม และเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของสารหนูในภาคโลหกรรมเมื่อมีความชื้นมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวกลางภาคโลหกรรมได้ดีและส่งผลให้สารหนูสามารถเคลื่อนที่ได้ดีเช่นกัน

### 3) ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางภาคโลหกรรม

ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางภาคโลหกรรม เป็นการศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในตัวกลางภาคโลหกรรม 2 ชุดการทดลอง คือ สนามไฟฟ้าที่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร (ดังตารางที่ 4.7) โดยใช้ภาชนะทรงกลม และขั้วสแตนเลส (Stainless steel 316L) เป็นอิเล็กโทรด ระยะเวลาที่ 3, 5 และ 7 วัน และทำการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในแต่ละบริเวณ คือ แคโทด (Cathode) ระหว่างขั้ว (Between) และแอโนด (Anode) ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

3.1) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่า ในวันที่ 3, 5 และ 7 วัน ที่ทำการทดลองและเก็บตัวอย่างภาคโลหกรรมไปทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) ระหว่างขั้ว (Between) และแอโนด (Anode) พบว่า ในวันที่ 3 ความเข้มข้นของสารหนูบริเวณขั้วแคโทด ระหว่างขั้ว และขั้วแอโนด มีค่าเท่ากับ  $61.71 \pm 0.91$ ,  $62.17 \pm 1.05$  และ  $62.33 \pm 1.66$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ จากผลแสดงให้เห็นว่า จลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ปริมาณสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่ส่งผลให้สารหนูเคลื่อนที่ โดยในวันที่ 5 มีค่าความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแคโทด ระหว่างขั้ว และแอโนด เท่ากับ  $60.73 \pm 1.40$ ,  $61.76 \pm 1.07$  และ  $58.51 \pm 0.78$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันที่ 7 มีค่าเท่ากับ  $60.85 \pm 2.19$ ,  $61.02 \pm 2.74$  และ  $57.77 \pm 0.68$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

3.2) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่า ในวันที่ 3 มีความเข้มข้นของสารหนูในภาคโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทด

ระหว่างขั้ว และแอโนด มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ  $64.15 \pm 1.63$ ,  $60.92 \pm 2.13$  และ  $60.92 \pm 2.13$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า จลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ปริมาณสนามไฟฟ้า 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในระยะเวลา 3 วัน มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูน้อยซึ่งค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ระยะเวลา 5 วัน ความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแคโทด และแอโนดไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ  $59.04 \pm 0.61$  และ  $57.52 \pm 1.16$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หากแต่ในบริเวณระหว่างขั้ว พบว่า กากโลหะกรรมมีการสะสมสารหนูมากที่สุดเท่ากับ  $63.07 \pm 1.60$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) กับบริเวณขั้วแคโทด และแอโนด สำหรับที่ระยะเวลา 5 วัน มีการเคลื่อนที่ของสารหนูจากบริเวณขั้วแคโทด และแอโนด มาอยู่ตรงบริเวณระหว่างขั้วมากที่สุด

ตารางที่ 4.7 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ปริมาณสนามไฟฟ้า	ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม; $\text{mg kg}^{-1}$ )		
		ขั้วแคโทด (Cathode)	ระหว่างขั้ว (Between)	ขั้วแอโนด (Anode)
		3	$61.71 \pm 0.91^a$	$62.17 \pm 1.05^a$
5	$60.73 \pm 1.40^a$	$61.76 \pm 1.07^a$	$58.51 \pm 0.78^a$	
7	$60.85 \pm 2.19^a$	$61.02 \pm 2.74^a$	$57.77 \pm 0.68^a$	
3	$64.15 \pm 1.63^a$	$60.92 \pm 2.13^a$	$60.92 \pm 2.13^a$	
5	$59.04 \pm 0.61^a$	$63.07 \pm 1.60^b$	$57.52 \pm 1.16^a$	
7	$61.33 \pm 1.85^b$	$62.43 \pm 0.74^b$	$53.60 \pm 0.53^a$	

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ สามารถสรุปได้ว่าการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ในรูปแบบภาชนะทรงกลมที่บรรจุกากโลหะกรรมมีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนด์เลสแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า และป้อนสนามไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 3, 5 และ 7 วันอย่างต่อเนื่อง (ตารางที่ 4.7) พบว่า ชุดการทดลองมีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในวันที่ 3, 5 และ 7 วัน มีระดับค่าความเข้มข้นของสารหนูทั้ง 3 บริเวณ ได้แก่ ขั้วแคโทด ระหว่างขั้ว และขั้วแอโนด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าที่ปริมาณ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่

ส่งผลให้สารหนูเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากปริมาณสนามไฟฟ้าต่ำเกินไป และค่าความต้านทานของกากโลหกรรมอยู่ที่ 21 กิโลโอห์ม จึงส่งผลให้สนามไฟฟ้าในกากโลหกรรมมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ W. S. Kim et al. (2014) ที่พบว่า สนามไฟฟ้าที่ต่ำ และระยะเวลาที่ป้อนสนามไฟฟ้าน้อยเกินไป ไม่สามารถส่งผลให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ได้ในดิน ที่มีองค์ประกอบอนุภาคทรายสูง สำหรับชุดการทดลองมีการป้อนสนามไฟฟ้า  $2 (2 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลาที่ 5 วัน พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนด และแคโทดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ  $59.04 \pm 0.61$  และ  $57.52 \pm 1.16$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แต่บริเวณระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด พบค่าการสะสมของสารหนูมากที่สุด มีค่าเท่ากับ  $63.07 \pm 1.60$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) กับบริเวณแอโนด และแคโทด แสดงให้เห็นว่า ในระยะเวลา 5 วัน ที่ป้อนสนามไฟฟ้าที่ปริมาณ  $2 (2 \text{ V cm}^{-1})$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารหนูจากบริเวณขั้วแอโนด และแคโทด มาอยู่ตรงบริเวณระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด อย่างไรก็ตามสารหนูที่จะถูกบำบัดหรือกำจัดออกนั้น ต้องเป็นสารหนูที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และเมื่อพิจารณากลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน พบว่า สารหนูมีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่สวนทางกัน กล่าวคือ อิเล็กโตรออสโมซิส (Electro-osmosis) จะนำพาน้ำไปทางขั้วแคโทด ส่วนกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) จะนำพาสารหนูที่อยู่ในรูปไอออนลบนั้นไปทางขั้วแอโนด ซึ่งสวนทางกัน จึงส่งผลทำให้มีสารหนูสะสมอยู่ในบริเวณระหว่างขั้วสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Isosaari and Sillanpää (2012) ที่พบว่า การใช้กระบวนการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดินโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า สามารถทำให้มีการสะสมสารหนูที่บริเวณระหว่างขั้วด้วยเช่นกัน ซึ่งให้ผลที่แตกต่างจากโลหะหนักชนิดอื่นที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไอออนบวก นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ยังสามารถทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในกากโลหกรรมแต่ละขั้วแตกต่างกันอย่างมาก (ดังตารางที่ 4.5) ซึ่งสอดคล้องกับ Aboughalma and Schlaak (2008) และ E.-K. Jeon et al. (2015) ที่พบว่า ขั้วแอโนด มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 2-4 ส่วนขั้วแคโทด มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 10-12

#### 4.2 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการดูดซับและสะสมสารหนูในพืชทดลอง

จากการศึกษาความสามารถของพืชทดลอง คือ หนุ้าเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู ได้ทำการแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าหรือชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) 2) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) 3) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 4

โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โดยมีระยะเวลาที่ให้สนามไฟฟ้านาน 3 ชั่วโมงต่อวัน (ช่วงเวลา 09.00 ถึง 12.00 น.) และทำการเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหกรรมในวันที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน โดยก่อนทำการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากโลหกรรม วิเคราะห์การปนเปื้อนสารหนูในพืช และในการทดลองที่ระยะเวลา 15-120 วัน ได้ทำการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ มวลชีวภาพ และปริมาณสารหนูทั้งหมดในพืชทดลองและกากโลหกรรม โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

#### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากโลหกรรม

##### 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH)

ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมระยะเวลาของการทดลองที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) และ 2) ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด พบว่า ก่อนเริ่มต้นทำการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมอยู่ในช่วง 7.64-7.72 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.68 \pm 0.01$  (ดังตารางที่ 4.8) และเมื่อเริ่มต้นทำการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด ที่ระยะเวลาการทดลอง 15 ถึง 120 วัน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.9 สำหรับชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 15 วัน มีค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม เท่ากับ  $7.56 \pm 0.09$ ,  $7.35 \pm 0.05$  และ  $7.16 \pm 0.04$  ตามลำดับ และเมื่อการทดลองสิ้นสุดที่ 120 วัน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนดลดลงจนมีความเป็นกรดสูง เท่ากับ  $5.21 \pm 0.04$ ,  $4.42 \pm 0.04$  และ  $2.94 \pm 0.05$  ตามลำดับ สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทดนั้น พบว่า ให้ผลที่ตรงข้ามกัน โดยที่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ดังตารางที่ 4.10 โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) สำหรับชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 15 วัน พบว่า บริเวณขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับ  $7.89 \pm 0.02$ ,  $7.86 \pm 0.09$  และ  $7.95 \pm 0.03$  ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าเท่ากับ  $9.32 \pm 0.08$ ,  $9.63 \pm 0.05$  และ  $10.15 \pm 0.23$  ตามลำดับ สำหรับในส่วนของชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลองจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งจากสภาวะที่เปลี่ยนไปของความเป็นกรด-ด่างในชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้านี้ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีปริมาณสนามไฟฟ้า และระยะเวลา

การป้อนสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น บริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง ส่วนบริเวณขั้วแคโทดนั้นมีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของน้ำที่ขั้วทั้งสอง โดยบริเวณขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ดังสมการ  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_{2(\text{gas})} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$  ทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่มากขึ้นเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อมีการสะสมของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างบริเวณนี้มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนบริเวณขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังสมการ  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_{2(\text{gas})}$  ทำให้มีการสะสมของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างบริเวณนี้มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) เคลื่อนตัวได้ดีกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จึงมักส่งผลให้เกิดการขยายตัวของพื้นที่ ๆ เป็นกรดมากกว่าพื้นที่ ๆ เป็นด่าง นอกจากนี้ ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ยังอาจก่อให้เกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ บริเวณขั้วลบได้อีกด้วย (C. Cameselle et al., 2013; Cang et al., 2012; Paz-Garcia et al., 2012; Peng et al., 2012) นอกจากนี้ในส่วนของปฏิกิริยาและกระบวนการต่าง ๆ ของรากพืช อาจมีผลต่อการเพิ่มความเป็นกรดของกากโลหกรรมบริเวณรอบ ๆ รากพืชด้วย เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกปล่อยมาทางรากพืช ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาล (Sugars) กรดอะมิโน (Amino acids) และกรดอินทรีย์ (Organic acids) เช่น ซิตริก (Citric) ออกซาลิก (Oxalic) มาลิก (Malic) และอะซิติก (Acetic) (Bais et al., 2006; Carvalhais et al., 2011) จากที่กล่าวมาถือเป็นกลไกทั่วไปที่พืชใช้ในการปรับเปลี่ยนเพื่อที่จะได้รับสารอาหาร และนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืช (A. S. Wang et al., 2006)



ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้นของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติของกากโลหะกรรม	วิธีการ	ค่าที่ตรวจวัดได้
ทราย:ทรายแป้ง:ดินเหนียว	Hydrometer	83.8: 15.2: 1.0
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	1:2 soil/water mixture	7.68
ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1:2 soil/water mixture	1,654.5
ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; mV)	1:2 soil/water mixture	171.0
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	Ammonium acetate saturation	3.0
ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance; $k\Omega$ )	Wenner Soil Resistivity Test 4-Point	27
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter; %)		0.916
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; %)		0.029
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Available phosphorus; $\text{mg kg}^{-1}$ )		35.1
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available potassium; $\text{mg kg}^{-1}$ )		102
ปริมาณอลูมิเนียม (Total aluminium; $\text{mg kg}^{-1}$ ) ในกากโลหะกรรม	USEPA 3051A	9,292.96
ปริมาณเหล็ก (Total iron; $\text{mg kg}^{-1}$ ) ในกากโลหะกรรม	USEPA 3051A	18,792.40
ปริมาณแมงกานีส (Total manganese; $\text{mg kg}^{-1}$ ) ในกากโลหะกรรม	USEPA 3051A	989.42
ปริมาณสารหนู (Total arsenic; $\text{mg kg}^{-1}$ ) ในกากโลหะกรรม	USEPA 3051A	68.70
ปริมาณสารหนู (Total arsenic; $\text{mg kg}^{-1}$ ) ในพืชทดลอง	USEPA 3052	ND

หมายเหตุ; ND หมายถึง ไม่สามารถตรวจพบ

ตารางที่ 4.9 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode)

ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรม			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	2 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	4 โวลต์ต่อ เซนติเมตร
15	7.68±0.02 <sup>a</sup>	7.56±0.09 <sup>a</sup>	7.35±0.05 <sup>b</sup>	7.16±0.04 <sup>c</sup>
30	7.67±0.02 <sup>a</sup>	6.73±0.04 <sup>d</sup>	6.15±0.05 <sup>fg</sup>	5.71±0.07 <sup>h</sup>
45	7.68±0.02 <sup>a</sup>	6.41±0.14 <sup>e</sup>	5.73±0.35 <sup>h</sup>	5.33±0.04 <sup>i</sup>
60	7.66±0.02 <sup>a</sup>	6.21±0.03 <sup>f</sup>	5.52±0.05 <sup>i</sup>	4.92±0.04 <sup>l</sup>
75	7.67±0.01 <sup>a</sup>	6.07±0.03 <sup>g</sup>	5.20±0.04 <sup>k</sup>	4.49±0.04 <sup>n</sup>
90	7.65±0.01 <sup>a</sup>	5.83±0.03 <sup>h</sup>	4.96±0.08 <sup>l</sup>	3.90±0.01 <sup>o</sup>
105	7.67±0.02 <sup>a</sup>	5.55±0.05 <sup>i</sup>	4.71±0.03 <sup>m</sup>	3.45±0.04 <sup>p</sup>
120	7.67±0.01 <sup>a</sup>	5.21±0.04 <sup>k</sup>	4.42±0.04 <sup>n</sup>	2.94±0.05 <sup>q</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode)

ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรม			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	2 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	4 โวลต์ต่อ เซนติเมตร
15	7.65±0.10 <sup>l</sup>	7.89±0.02 <sup>kl</sup>	7.86±0.09 <sup>kl</sup>	7.95±0.03 <sup>k</sup>
30	7.65±0.09 <sup>l</sup>	8.00±0.06 <sup>k</sup>	8.00±0.06 <sup>k</sup>	8.03±0.27 <sup>k</sup>
45	7.64±0.07 <sup>l</sup>	8.75±0.26 <sup>j</sup>	9.00±0.12 <sup>i</sup>	9.03±0.04 <sup>hi</sup>
60	7.65±0.04 <sup>l</sup>	9.13±0.17 <sup>ghi</sup>	9.16±0.21 <sup>fghi</sup>	9.38±0.31 <sup>efg</sup>
75	7.65±0.02 <sup>l</sup>	9.21±0.09 <sup>fghi</sup>	9.23±0.07 <sup>fghi</sup>	9.50±0.07 <sup>de</sup>
90	7.66±0.03 <sup>l</sup>	9.20±0.13 <sup>fghi</sup>	9.22±0.10 <sup>fghi</sup>	9.77±0.31 <sup>bc</sup>
105	7.68±0.01 <sup>l</sup>	9.28±0.14 <sup>efgh</sup>	9.40±0.07 <sup>def</sup>	9.92±0.04 <sup>b</sup>
120	7.67±0.02 <sup>l</sup>	9.32±0.08 <sup>efg</sup>	9.63±0.05 <sup>cd</sup>	10.15±0.23 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

## 2) ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)

ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมที่ระยะเวลาของการทดลอง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) และ 2) ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) โดยที่ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างกากโลหกรรมก่อนทำการทดลองอยู่ในช่วง 1645.56-1662.20 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1654.50 \pm 8.39$  ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ตารางที่ 4.8) และเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น พบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด และแคโทด รวมทั้งช่วงเวลาของการทดลองที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยพบว่า กากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด และขั้วแคโทดมีแนวโน้มของค่าความนำไฟฟ้าในกากโลหกรรมที่ลดลงตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น สำหรับในชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง ทั้งนี้ค่าความนำไฟฟ้าของชุดการทดลอง 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร บริเวณขั้วแอโนด ที่ระยะเวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ  $1578.42 \pm 61.10$ ,  $1868.69 \pm 55.27$ ,  $2040.01 \pm 62.95$  และ  $2384.73 \pm 110.40$  ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.11) สำหรับค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแคโทดที่ระยะเวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ  $1635.45 \pm 34.78$ ,  $1498.63 \pm 64.33$ ,  $1187.92 \pm 68.92$  และ  $854.46 \pm 94.31$  ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ (ตารางที่ 4.12) และเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นจนครบ 120 วัน พบว่าค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมมีแนวโน้มลดลงทั้งบริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลอง 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าเท่ากับ  $1543.21 \pm 61.27$ ,  $1004.95 \pm 34.21$ ,  $972.39 \pm 7.46$  และ  $933.07 \pm 73.86$  ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ  $1614.21 \pm 31.50$ ,  $455.07 \pm 36.13$ ,  $418.17 \pm 34.28$  และ  $209.00 \pm 26.27$  ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่สูง ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดได้ไวกว่าชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าต่ำลงมา ( $1 \text{ V cm}^{-1}$  และ  $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โดยที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าสูงกว่าแคโทดเสมอ หรือสามารถกล่าวได้ว่า ค่าความนำไฟฟ้าของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาบริเวณขั้วแอโนดค่อนข้างสูงกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่เกิดจากบริเวณขั้วแคโทด ( $35.0$  เทียบกับ  $19.8 \text{ mSm}^2 \text{ mol}^{-1}$ ) และแอนไอออน (Anions) อื่น ๆ เช่น คลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) เป็นต้น (Cameselle et al., 2019) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของปริมาณน้ำระหว่างอนุภาคกากโลหกรรมสามารถส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าแตกต่างกันได้ โดยสามารถอธิบายได้ในแง่ของการเคลื่อนที่ของไอออนของธาตุต่าง ๆ ใน

กากโลหะกรรมที่อยู่ในรูปสารละลายจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ดีเมื่อปฏิกิริยาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในสถานะที่มีปริมาณน้ำในตัวกลางหรือกากโลหะกรรมสูง (ความชื้นสูง) ดังนั้น ค่าความนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับปริมาณไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เสมอเมื่ออยู่ในสถานะที่มีสนามไฟฟ้า และยิ่งไปกว่านั้นค่าความนำไฟฟ้าที่สูงมากบริเวณขั้วแอโนดในช่วง 1 เดือนแรกของการทดลอง อาจเป็นเพราะอิทธิพลมาจากสารประกอบอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกจากรากพืช (Root exudates) ในขณะที่พืชยังมีชีวิต และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูง ควบคุมเกี่ยวกับสถานะความเป็นกรดที่บริเวณขั้วแอโนด (ตารางที่ 4.9) ที่เกิดจากการอิเล็กโทรออสโมซิส (Electro-osmosis) และฟลักซ์ไฟฟ้า จึงส่งผลให้ธาตุต่าง ๆ ทั้งที่พืชนำมาใช้เป็นอาหารได้และไม่ได้ ละลายออกมาอยู่ในรูปสารละลายมากขึ้น และเมื่อระยะของการทดลองที่ยาวนานถึง 120 วัน จึงอาจส่งผลให้เกิดการคงที่ของค่าความเป็นกรดต่าง และเกิดการตกตะกอนของไอออนบางอย่างบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขึ้นได้ ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าในช่วงท้ายของการทดลองมีค่าต่ำกว่าในช่วงแรกของการทดลอง (Lopez-Vizcaino et al., 2017)

ตารางที่ 4.11 ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode)

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ค่าความนำไฟฟ้า (ไม่โครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร; $\mu S cm^{-1}$ )			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ	2 โวลต์ต่อ	4 โวลต์ต่อ
		เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร
15	1578.43±61.10 <sup>ef</sup>	1868.69±55.27 <sup>c</sup>	2040.02±62.95 <sup>b</sup>	2384.74±110.40 <sup>a</sup>
30	1569.53±66.13 <sup>ef</sup>	1665.37±64.99 <sup>de</sup>	1793.73±84.53 <sup>c</sup>	2059.50±55.53 <sup>b</sup>
45	1567.60±63.31 <sup>ef</sup>	1513.85±50.28 <sup>fg</sup>	1532.45±75.97 <sup>fg</sup>	1767.13±43.62 <sup>cd</sup>
60	1561.77±63.71 <sup>ef</sup>	1398.42±84.96 <sup>h</sup>	1235.73±54.48 <sup>i</sup>	1437.77±23.59 <sup>gh</sup>
75	1558.48±63.18 <sup>efg</sup>	1198.69±69.06 <sup>ij</sup>	1122.29±160.17 <sup>jk</sup>	1089.50±15.90 <sup>jkl</sup>
90	1542.21±67.90 <sup>efg</sup>	1053.74±34.60 <sup>klm</sup>	1023.61±34.94 <sup>klm</sup>	1016.43±66.61 <sup>klm</sup>
105	1546.91±65.69 <sup>efg</sup>	1048.15±42.48 <sup>klm</sup>	1018.32±64.39 <sup>klm</sup>	972.68±7.22 <sup>lm</sup>
120	1543.21±61.27 <sup>efg</sup>	1004.95±34.21 <sup>klm</sup>	972.39±7.46 <sup>lm</sup>	933.07±73.86 <sup>m</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 4.12 ค่าความนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode)

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ค่าความนำไฟฟ้า			
	(ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร; $\mu\text{S cm}^{-1}$ )			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อเซนติเมตร	2 โวลต์ต่อเซนติเมตร	4 โวลต์ต่อเซนติเมตร
15	1635.45±34.79 <sup>a</sup>	1498.63±64.33 <sup>b</sup>	1187.92±68.93 <sup>c</sup>	854.46±94.31 <sup>fg</sup>
30	1632.11±32.21 <sup>a</sup>	1212.32±97.70 <sup>c</sup>	983.38±14.52 <sup>e</sup>	672.18±103.49 <sup>hi</sup>
45	1628.34±30.30 <sup>a</sup>	1086.84±22.89 <sup>d</sup>	868.64±44.31 <sup>fg</sup>	573.16±37.10 <sup>ji</sup>
60	1624.26±31.66 <sup>a</sup>	923.58±20.69 <sup>ef</sup>	775.89±21.79 <sup>gh</sup>	468.90±77.35 <sup>kl</sup>
75	1620.85±29.51 <sup>a</sup>	826.54±21.03 <sup>fg</sup>	672.04±41.28 <sup>hi</sup>	361.48±32.60 <sup>lm</sup>
90	1620.06±28.63 <sup>a</sup>	654.81±28.16 <sup>i</sup>	636.51±20.29 <sup>ji</sup>	316.11±10.29 <sup>mn</sup>
105	1618.31±28.21 <sup>a</sup>	582.75±70.31 <sup>ji</sup>	534.54±38.87 <sup>kl</sup>	237.16±23.50 <sup>no</sup>
120	1614.21±31.50 <sup>a</sup>	455.07±36.13 <sup>kl</sup>	418.17±34.28 <sup>lm</sup>	209.00±26.27 <sup>o</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

### 3) ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP)

ในส่วนของศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง พบว่า ค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ (ตารางที่ 4.13 และ 4.14) โดยที่ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างกากโลหะกรรมก่อนทำการทดลองอยู่ในช่วง 165.34-175.42 มิลลิโวลต์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 170.78±5.09 มิลลิโวลต์ (ตารางที่ 4.8) ซึ่งชุดการทดลองที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้าหรือชุดควบคุม 0 (0 V cm<sup>-1</sup>) และชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 (1 V cm<sup>-1</sup>), 2 (2 V cm<sup>-1</sup>) และ 4 (4 V cm<sup>-1</sup>) มิลลิโวลต์ มีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) ที่ระยะเวลาของการทดลองที่ 15 วัน มีค่าเท่ากับ 172.50±2.80, 173.28±2.02, 178.23±0.21 และ 197.93±2.69 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น พบว่า ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P<0.05) จนสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) มีค่าเท่ากับ 167.71±4.79, 254.99±2.11, 270.41±2.39 และ 319.62±2.09 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13) สำหรับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดนั้น พบว่า ผลตรงข้ามกับ

บริเวณขั้วแอโนด โดยมีค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode) ที่เวลาของการทดลอง 15 วัน มีค่าเท่ากับ  $171.63 \pm 3.79$ ,  $170.33 \pm 1.42$ ,  $168.08 \pm 2.80$  และ  $160.33 \pm 1.42$  มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) มีค่าเท่ากับ  $165.81 \pm 3.04$ ,  $146.53 \pm 1.21$ ,  $137.23 \pm 1.30$  และ  $122.29 \pm 0.82$  มิลลิโวลต์ (ตารางที่ 4.14) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มสูงกว่าบริเวณขั้วแคโทดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเสมอ โดยค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ที่บริเวณขั้วแอโนดได้เร็วกว่า ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด และแคโทด ส่วนค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดที่มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถกล่าวได้ว่า ในการเกิดกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสนั้น บริเวณขั้วแอโนดที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) มักส่งผลให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนออกมาจากสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน หรือเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ได้แก่ น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคกากโลหะกรรมที่มีอิทธิพลต่อการให้อิเล็กตรอนมากที่สุดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่บริเวณขั้วแอโนด ส่งผลให้มีโมเลกุลของออกซิเจนสูงขึ้น ทำให้ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดสูงกว่าบริเวณขั้วแคโทด (Reddy et al., 2011) นอกจากนี้ที่กล่าวมานั้น โดยทั่วไปดินส่วนใหญ่มักพบศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าเป็นเชิงบวกมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับอากาศหรือโมเลกุลออกซิเจน และมักจะมีค่าเป็นเชิงลบมากขึ้นในระบบ เช่น ดินหรือตะกอนที่ถูกทับถมไว้บริเวณที่ลึกกว่าความลึกของหน้าดิน จึงส่งผลให้อยู่ในสภาวะที่ไม่ได้สัมผัสกับอากาศ (Lageman et al., 2005) สำหรับในการทดลองปลูกพืชนั้น ความลึกของภาชนะที่บรรจุกากโลหะกรรมในการปลูกนั้นมีความลึกประมาณ 20 เซนติเมตร และในช่วงการทดลองไม่มีน้ำขังสะสมไว้ที่ก้นภาชนะ จึงส่งผลให้กากโลหะกรรมสามารถได้รับอิทธิพลจากอากาศหรือก๊าซออกซิเจนอยู่ ซึ่งในกรณีนี้อาจทำให้ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทดยังคงเป็นบวก แม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลงในระยะของการทดลองที่เพิ่มขึ้นก็ตาม

ตารางที่ 4.13 ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode)

ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์; mV)			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ	2 โวลต์ต่อ	4 โวลต์ต่อ
		เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร
15	172.50±2.80 <sup>m</sup>	173.28±2.02 <sup>m</sup>	178.23±0.21 <sup>m</sup>	197.93±2.69 <sup>l</sup>
30	171.57±2.20 <sup>m</sup>	199.60±1.47 <sup>l</sup>	207.66±2.71 <sup>kl</sup>	225.70±3.83 <sup>ji</sup>
45	171.65±5.43 <sup>m</sup>	204.31±2.91 <sup>l</sup>	209.11±5.98 <sup>kl</sup>	239.65±1.59 <sup>gh</sup>
60	170.75±5.03 <sup>m</sup>	218.10±2.86 <sup>jk</sup>	234.32±3.86 <sup>hi</sup>	256.70±4.33 <sup>de</sup>
75	171.47±2.63 <sup>m</sup>	223.80±1.59 <sup>ji</sup>	241.91±0.26 <sup>fgh</sup>	272.58±2.48 <sup>c</sup>
90	173.42±2.00 <sup>m</sup>	231.27±0.90 <sup>hi</sup>	252.93±2.44 <sup>def</sup>	288.15±2.78 <sup>b</sup>
105	169.31±3.65 <sup>m</sup>	248.51±2.48 <sup>efg</sup>	262.01±2.70 <sup>cd</sup>	308.44±3.77 <sup>a</sup>
120	167.71±4.79 <sup>m</sup>	254.99±2.11 <sup>de</sup>	270.41±2.39 <sup>c</sup>	319.62±2.09 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.14 ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของกากโลหะกรรมบริเวณขั้วแคโทด (Cathode)

ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์; mV)			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ	2 โวลต์ต่อ	4 โวลต์ต่อ
		เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร
15	171.63±3.79 <sup>a</sup>	170.33±1.42 <sup>ab</sup>	168.08±2.80 <sup>abc</sup>	160.33±1.42 <sup>ef</sup>
30	171.23±5.32 <sup>a</sup>	163.73±1.59 <sup>cdef</sup>	159.67±3.60 <sup>ef</sup>	151.87±1.39 <sup>gh</sup>
45	169.90±4.10 <sup>ab</sup>	162.56±2.31 <sup>def</sup>	160.23±1.51 <sup>ef</sup>	146.11±1.98 <sup>i</sup>
60	170.29±1.42 <sup>ab</sup>	164.23±1.06 <sup>cde</sup>	154.63±3.35 <sup>g</sup>	145.16±2.44 <sup>i</sup>
75	170.05±2.58 <sup>ab</sup>	159.15±2.47 <sup>f</sup>	163.15±1.18 <sup>def</sup>	139.73±3.07 <sup>j</sup>
90	170.74±2.78 <sup>ab</sup>	151.70±2.73 <sup>gh</sup>	146.55±2.85 <sup>i</sup>	127.94±2.14 <sup>k</sup>
105	167.01±3.42 <sup>abcd</sup>	149.80±2.56 <sup>hi</sup>	145.56±3.34 <sup>i</sup>	124.13±2.03 <sup>kl</sup>
120	165.81±3.04 <sup>bcd</sup>	146.53±1.21 <sup>i</sup>	137.23±1.30 <sup>j</sup>	122.29±0.82 <sup>l</sup>

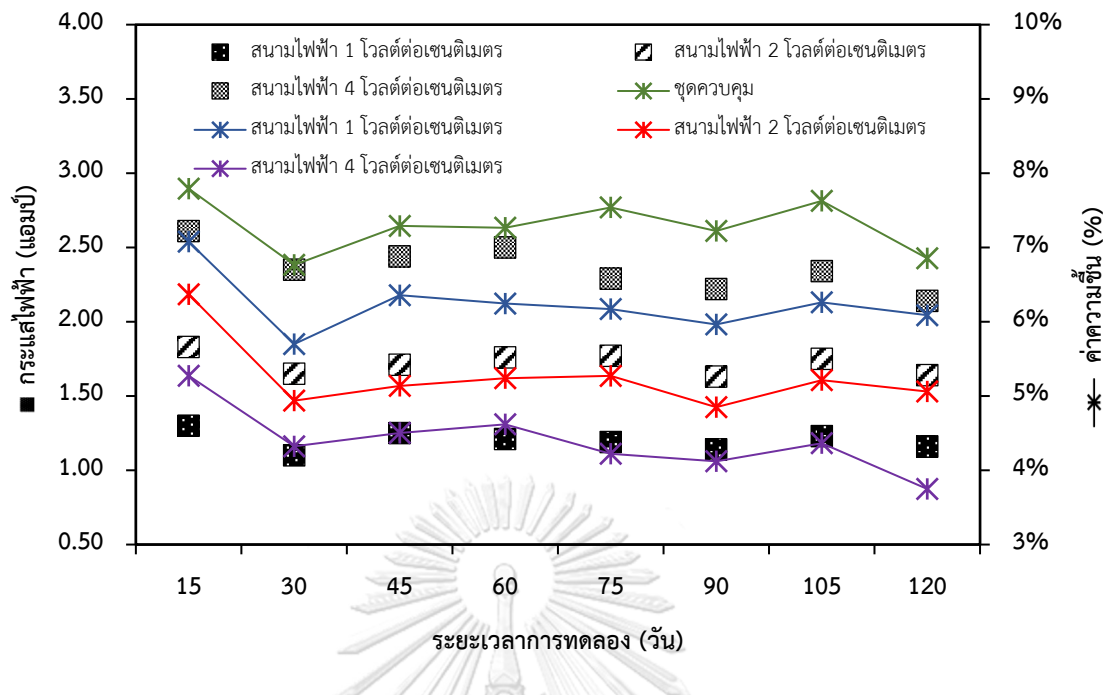
หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และมวลชีวภาพของพืช

##### 1) ความสัมพันธ์ของจลนศาสตร์ไฟฟ้ากับความชื้นในอากาศโลหกรรม

จากการทดลองให้กระแสไฟฟ้าและทำการวัดค่าหลังระยะเวลาของการทดลองในชุดการทดลองที่ป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไป ได้แก่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.10-1.30, 1.63-1.83 และ 2.14-2.61 แอมป์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 โดยในการทดลองการบำบัดอากาศโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยไฟฟ้านั้นสามารถเป็นตัวชี้วัดค่าความต้านทาน (Resistance) ของอากาศโลหกรรมได้ โดยที่ค่าความต้านทานอากาศโลหกรรมเริ่มต้น (หลังจากการผึ่งแห้ง) อยู่ที่ 27 กิโลโอห์ม แต่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทั่วไปนั้นมักมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อค่าความต้านทาน เช่น ความชื้น ความพรุน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอออนของกลุ่มโลหะที่อยู่ในรูปสารละลาย และไม่ละลาย หากแต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก คือ ค่าความชื้นเป็นหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้านั้นมีความแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นที่อยู่ในอากาศโลหกรรมเสมอ โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ให้ปริมาณสนามไฟฟ้าไม่สูงมาก เช่น 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีความชื้นสูง แต่ในทางตรงข้ามหากให้สนามไฟฟ้าที่สูงถึงระดับ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความชื้นในอากาศโลหกรรมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความชื้นที่มากกว่าปกติ เพราะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่รุนแรงในสถานะสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นมาก นอกจากนี้ รากของพืชยังสามารถช่วยเพิ่มความพรุนให้กับอากาศโลหกรรม โดยจะไปช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างอนุภาคอากาศโลหกรรมให้มีการกักเก็บน้ำและการเคลื่อนที่ของไอออนเพิ่มขึ้น (Sanchez et al., 2018) นอกจากนี้ พืชยังสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไอออนิกของอากาศโลหกรรมบริเวณรอบ ๆ รากพืชได้ อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยกลุ่มสารเคมีที่มีประจุต่าง ๆ มาช่วยในกระบวนการดูดซึมสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืช (LeFevre et al., 2013; Vassilev et al., 2004) ส่วนการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตรนั้น อาจสัมพันธ์กับปริมาณไอออนจากรากพืชที่ลดลง เนื่องจากพืชในชุดการทดลอง 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 วัน มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำมากจนมีค่าติดลบ (ดังรูปที่ 4.8) ทำให้กระบวนการดูดดึงสารอาหารของพืชหยุดลงตั้งแต่บริเวณราก นอกจากนี้ อาจมีกระบวนการดำเนินงานอื่น ๆ ซึ่งสามารถเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าของอากาศโลหกรรมได้ด้วย (Cang et al., 2011; Chirakkara et al., 2015; Risco et al., 2015; Risco et al., 2016)



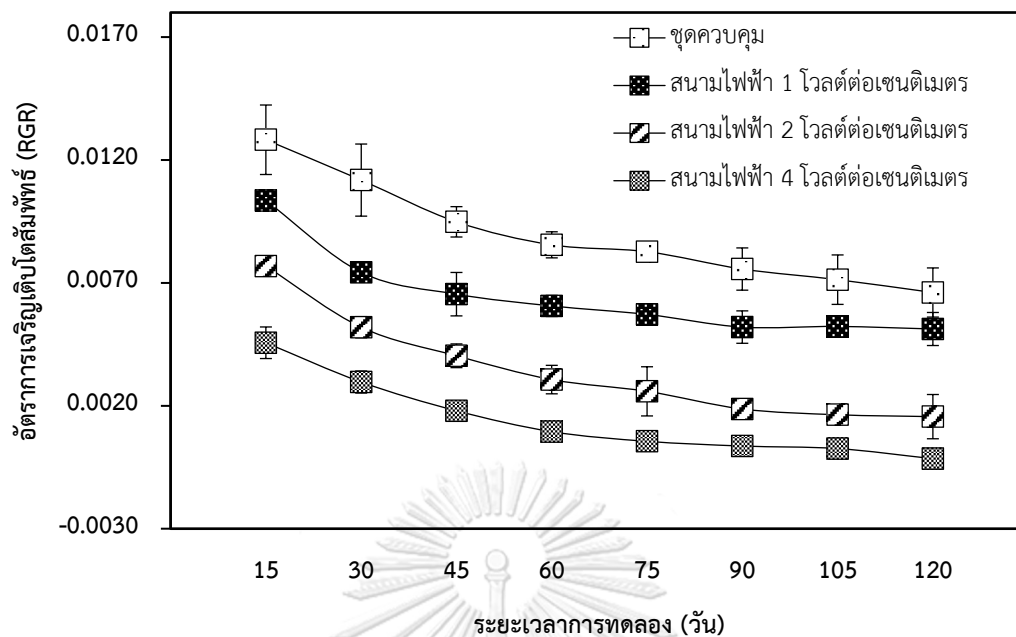


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในกากโลหกรรมที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

## 2) การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR)

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างพืชในวันที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง คือ 1) ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าหรือชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) 2) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) 3) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) ซึ่งสามารถสรุปผลของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ได้ดังนี้ จากการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จุลนาศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู พบว่า พืชทดลองมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลง เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.15 โดยที่ระยะเวลาการทดลองที่ 15 วัน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของชุดทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าเท่ากับ  $0.0128 \pm 0.0014$ ,  $0.0103 \pm 0.0003$ ,  $0.0077 \pm 0.0002$  และ  $0.0046 \pm 0.0007$  ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น และยังพบว่า ค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเหลือเท่ากับ  $0.0066 \pm 0.0010$ ,  $0.0051 \pm 0.0007$ ,  $0.0016 \pm 0.0009$  และ  $-0.0001 \pm 0.0001$  ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อ

เซนติเมตร กับชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้า ได้แก่ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างชัดเจน โดยที่ชุดการทดลองที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่สูงที่สุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ มีการเจริญเติบโตดีที่สุด ทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง แต่ในทางตรงกันข้ามชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้ามีการส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดต่ำลงกว่าปกติหรือมีการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าชุดควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะในชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่า ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ให้สูงขึ้นมากเพียงโดยอ้อมส่งผลต่อการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ให้ต่ำลงมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้า 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในสภาวะของกาบไลทอกรมที่ปกตินั้น อัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลองจะเป็นไปตามธรรมชาติ เพราะมีความอุดมสมบูรณ์ของแร่ธาตุในกาบไลทอกรมหรือดินที่ปลูก ในขณะที่กาบไลทอกรมที่ทำการทดลองนั้นมีความอุดมสมบูรณ์ที่ต่ำ และไม่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืช จึงทำให้ชุดควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ตั้งแต่ 15 วันแรก ถึงวันที่สิ้นสุดการทดลองที่ 120 วัน มีค่าต่ำกว่าการปลูกพืชในดินทั่วไปมาก นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้านั้น หากมองในด้านการเจริญเติบโตของพืชเป็นหลักแล้วจะให้ผลไม่ดีมากนัก เพราะสนามไฟฟ้าที่ให้ในระยะเวลา และปริมาณที่มากเกินไป เช่น 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของกาบไลทอกรมไปจากเดิมมาก เช่น ความพรุนของอนุภาคของกาบไลทอกรม ค่าความชื้น รูปแบบทางเคมีของแร่ธาตุ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของกาบไลทอกรมหรือดินให้ต่ำลง รวมทั้งกระแสไฟฟ้าที่สูงย่อมส่งผลต่อเซลล์ของรากพืชที่ใช้ในกระบวนการดูดซึมสารอาหารอีกด้วย



รูปที่ 4.8 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR) ของฟิชทดลอง

ตารางที่ 4.15 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของฟิชทดลอง

ระยะเวลา การทดลอง (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	2 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	4 โวลต์ต่อ เซนติเมตร
15	0.0128±0.0014 <sup>a</sup>	0.0103±0.0003 <sup>bc</sup>	0.0077±0.0002 <sup>ef</sup>	0.0046±0.0007 <sup>jk</sup>
30	0.0112±0.0015 <sup>b</sup>	0.0074±0.0003 <sup>efg</sup>	0.0052±0.0004 <sup>ijk</sup>	0.0030±0.0005 <sup>lm</sup>
45	0.0095±0.0006 <sup>cd</sup>	0.0066±0.0009 <sup>fghi</sup>	0.0040±0.0005 <sup>kl</sup>	0.0018±0.0004 <sup>mno</sup>
60	0.0085±0.0006 <sup>de</sup>	0.0060±0.0004 <sup>ghij</sup>	0.0031±0.0006 <sup>lm</sup>	0.0010±0.0003 <sup>nopq</sup>
75	0.0083±0.0003 <sup>de</sup>	0.0057±0.0004 <sup>hij</sup>	0.0026±0.0010 <sup>mn</sup>	0.0006±0.0001 <sup>nopq</sup>
90	0.0076±0.0009 <sup>ef</sup>	0.0052±0.0007 <sup>ijk</sup>	0.0019±0.0003 <sup>mno</sup>	0.0003±0.0002 <sup>opq</sup>
105	0.0071±0.0010 <sup>efgh</sup>	0.0052±0.0005 <sup>ijk</sup>	0.0016±0.0003 <sup>mno</sup>	0.0003±0.0001 <sup>pq</sup>
120	0.0066±0.0010 <sup>fghi</sup>	0.0051±0.0007 <sup>ijk</sup>	0.0016±0.0009 <sup>mno</sup>	-0.0001±0.0001 <sup>q</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

### 3) มวลชีวภาพ (Biomass)

การเจริญเติบโตของพืชทดลองจาก 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าหรือชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) 2) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) 3) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4) ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าที่ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) ได้ทำการเก็บตัวอย่างพืชศึกษาที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า พืชทั้ง 4 ชุดการทดลองมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P \leq 0.05$ ) ตามช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (ตารางที่ 4.16) นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 15 วัน ของชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า พืชในแต่ละชุดการทดลองมีมวลชีวภาพเท่ากับ  $4.05 \pm 0.26$ ,  $4.11 \pm 0.11$ ,  $4.74 \pm 0.70$  และ  $5.28 \pm 0.72$  กรัม ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า มีมวลชีวภาพเท่ากับ  $13.49 \pm 0.75$ ,  $15.09 \pm 0.65$ ,  $13.37 \pm 0.43$  และ  $8.82 \pm 0.57$  กรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณมวลชีวภาพของทุกชุดการทดลอง พบว่า เมื่อระยะเวลาของการทดลองผ่านไปจนถึงวันสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) มวลชีวภาพของชุดควบคุม 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยเฉพาะที่ 120 วัน ชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ให้ผลในการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของพืชทดลองได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cang et al. (2011) ที่ทำการศึกษาค้นคว้าผลของสนามไฟฟ้าต่อการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยผักกาดสี น้ำตาล และพบว่า การให้สนามไฟฟ้าระดับต่ำ ในระยะเวลาไม่นานเกินไปหรือไม่เกิน 4-5 ชั่วโมงต่อวัน จะสามารถช่วยกระตุ้นให้พืชทดลองมีการเจริญเติบโตได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการทดลองครั้งนี้ยังพบว่า มวลชีวภาพของชุดการทดลอง 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าของมวลชีวภาพต่ำกว่าชุดควบคุม 0 ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า การให้สนามไฟฟ้าในปริมาณที่สูงอาจส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของพืชต่ำลงกว่าปกติ (Aboughalma and Schlaak, 2008)

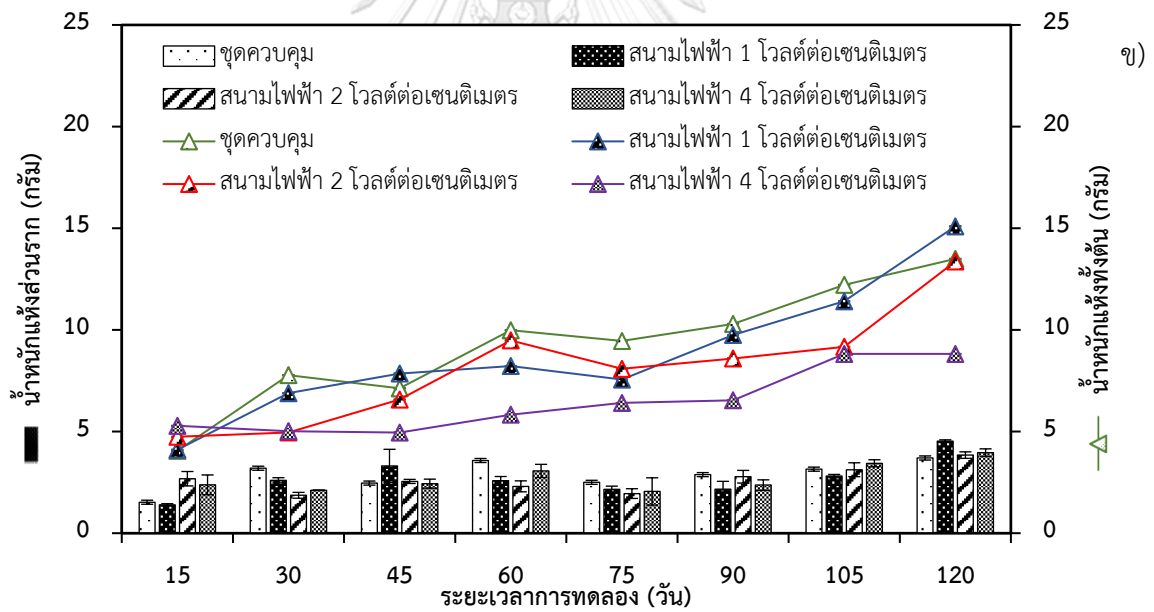
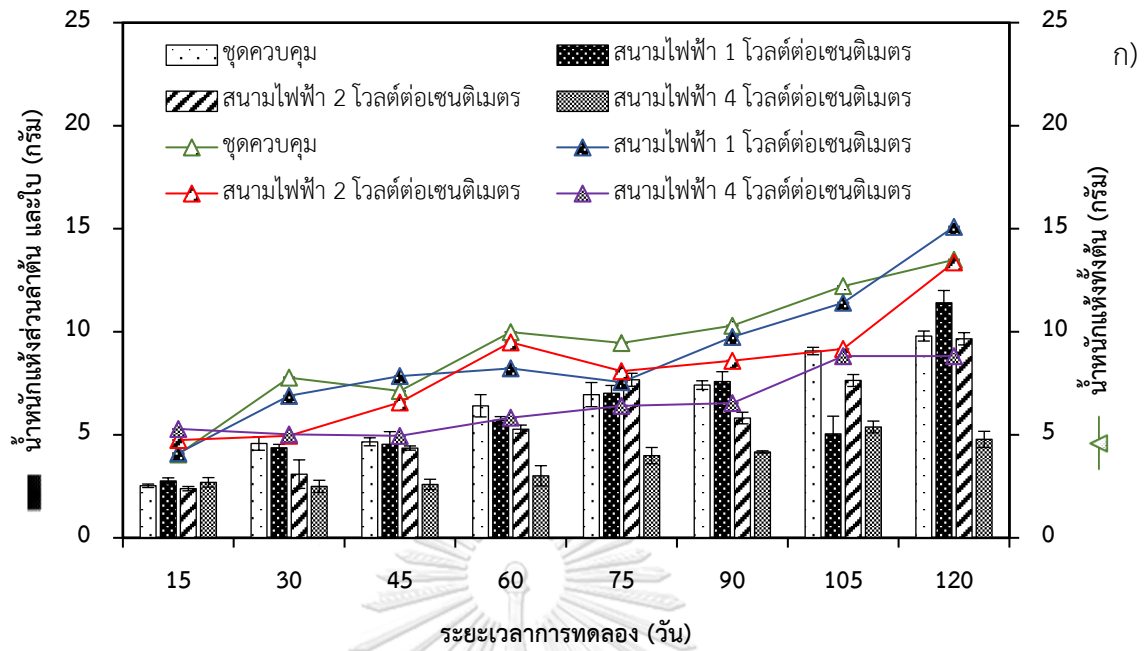
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณามวลชีวภาพของพืชทดลองโดยแบ่งออกเป็นส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (ลำต้น และใบ) และส่วนใต้รากโลหกรรม (ราก) จะเห็นได้ว่า มวลชีวภาพในส่วนของรากมีค่าต่ำกว่ามวลชีวภาพในส่วนของลำต้น และใบ (ดังรูปที่ 4.9ก) อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้มีการให้สนามไฟฟ้าเพียง 3 ชั่วโมงต่อวัน เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของพืชทดลอง และพบว่า เมื่อพิจารณามวลชีวภาพในส่วนของราก ลำต้น และใบ นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วการป้อนสนามไฟฟ้าที่นานเกินไปบริเวณรากอาจได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

มากกว่าในส่วนลำต้นและใบ (Sanchez et al., 2018) จากผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นได้ว่า หากมีการพ่นสนามไฟฟ้า 3 ชั่วโมงต่อวัน สามารถช่วยรักษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลองได้ดี โดยเฉพาะส่วนของรากพืช (ดังรูปที่ 4.9ข) แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณสนามไฟฟ้าที่สูงถึง 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่ในทางตรงกันข้าม ยังพบว่า การพ่นสนามไฟฟ้าในปริมาณที่สูงนั้นให้ผลเสียต่อการเจริญเติบโตในส่วนของลำต้น และใบ หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่สูงอาจจะส่งผลต่อการดูดตั้งธาตุ และสารอาหาร รวมถึงกลุ่มโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินให้มีประสิทธิภาพต่ำลงได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของมวลชีวภาพในส่วนของลำต้น ใบ และรากพืช ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นั้นมีความแตกต่างจากการศึกษาด้านจลนศาสตร์ร่วมกับการใช้พืชในการบำบัดสารอาหาราซิน (Atrazine) ในดินที่ปนเปื้อนของ Sánchez et al. (2019) ที่มีการให้สนามไฟฟ้าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง (สลับชั่วโมงกับแคโทด) ติดต่อกันรวม 6 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 14 วัน และพบว่า เมื่อมีการพ่นสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้มวลชีวภาพของพืชลดลงในส่วนของรากพืช ตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชทดลอง (ทั้งต้น)

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ชุดควบคุม	มวลชีวภาพ (กรัม)		
		1 โวลต์ต่อเซนติเมตร	2 โวลต์ต่อเซนติเมตร	4 โวลต์ต่อเซนติเมตร
15	4.05±0.26 <sup>n</sup>	4.11±0.11 <sup>n</sup>	4.74±0.70 <sup>mn</sup>	5.28±0.72 <sup>lmn</sup>
30	7.78±1.19 <sup>ghijkl</sup>	6.89±0.02 <sup>ijklm</sup>	4.95±0.84 <sup>lmn</sup>	5.02±0.49 <sup>lmn</sup>
45	7.13±0.13 <sup>ghijkl</sup>	7.85±0.21 <sup>ghijk</sup>	6.57±0.67 <sup>ijklm</sup>	4.95±1.10 <sup>lmn</sup>
60	9.98±0.91 <sup>def</sup>	8.22±0.01 <sup>efghij</sup>	9.49±0.72 <sup>defg</sup>	5.83±0.05 <sup>klmn</sup>
75	9.45±0.76 <sup>defg</sup>	7.56±0.32 <sup>ghijk</sup>	8.09±0.30 <sup>efghij</sup>	6.41±0.52 <sup>ijklm</sup>
90	10.29±0.24 <sup>cde</sup>	9.75±0.09 <sup>defg</sup>	8.59±0.35 <sup>defghij</sup>	6.54±0.20 <sup>ijklm</sup>
105	12.22±0.22 <sup>bc</sup>	10.65±1.18 <sup>cd</sup>	9.17±0.34 <sup>defgh</sup>	8.82±0.46 <sup>defghi</sup>
120	13.49±0.75 <sup>ab</sup>	15.09±0.65 <sup>a</sup>	13.37±0.43 <sup>ab</sup>	8.82±0.57 <sup>defghi</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.9 น้ำหนักแห้งของพืชทดลอง ก) ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้น และใบ) และ ข) ส่วนใต้ กากโลหะกรรม (ราก) ที่ระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

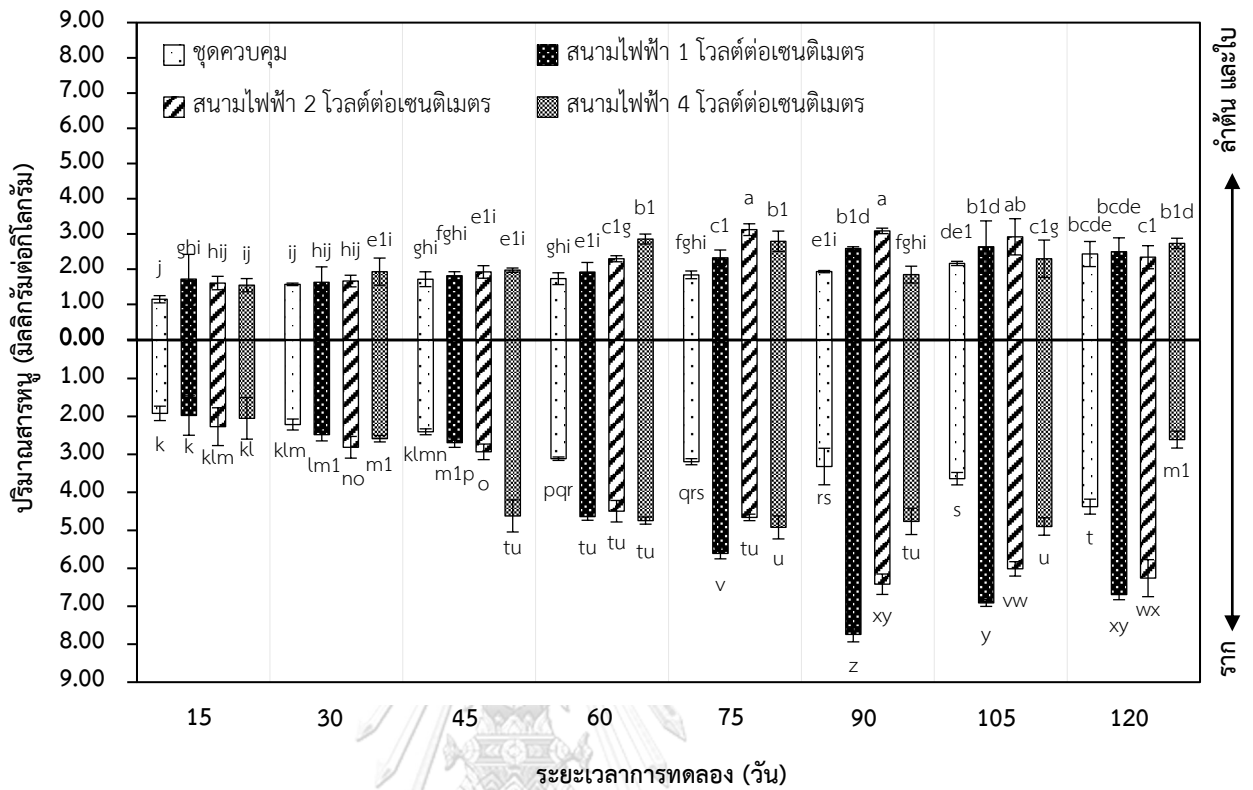
#### 4.2.3 ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วย หญ้าเนเปียร์แคระ

ผลของการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า (ดังรูปที่ 4.10) สามารถแบ่งชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยได้ทำการคัดเลือกพืชที่มีอายุ 90 วัน และมีขนาดใกล้เคียงกัน คือ มีน้ำหนักสดเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้นการทดลองอยู่ในช่วง 30 ถึง 35 กรัม (น้ำหนักสด) ทำการปลูกในภาชนะที่มีกากโลหกรรมปริมาณ 11 กิโลกรัม และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน ผลของการทดลองสามารถแบ่งการดูดดึงและสะสมสารหนูได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้น และใบ) และ 2) ส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) โดยพบว่า ปริมาณสารหนูที่สะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้น และใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) สำหรับชุดการควบคุม ( $0 \text{ V cm}^{-1}$ ), 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ), 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าแตกต่างกันทางสถิติอย่างเห็นได้ชัด ( $P \leq 0.05$ ) โดยในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ที่ระยะเวลา 30 วันนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก และเริ่มมีปริมาณสารหนูที่มีการสะสมแตกต่างกันอย่างมีนัยตั้งแต่ช่วง 60 วันของการทดลอง โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า 1 ถึง 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร และพบการสะสมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ในส่วนรากสำหรับชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 90 วันของการทดลอง อยู่ที่  $7.69 \pm 0.16$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 4.17) ส่วนชุดการทดลองที่มีการสะสมรองลงมาเป็นลำดับที่สองนั้น ได้แก่ ชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 105 วัน, 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 90 วัน เท่ากับ  $6.91 \pm 0.09$ ,  $6.69 \pm 0.13$  และ  $6.48 \pm 0.22$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับสำหรับในส่วนเหนือกากโลหกรรมหรือลำต้น และใบนั้น มีการสะสมสารหนูในปริมาณที่น้อยมากสำหรับช่วงระยะเวลา 60 วันของการทดลอง ซึ่งปริมาณการสะสมสารหนูที่วัดได้ส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ แต่เมื่อถึงช่วงระยะเวลา 75 วัน พบว่า ปริมาณการสะสมสารหนูที่ลำต้น และใบของชุดการทดลอง ได้แก่ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 75 วัน, 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 90 วัน, 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 105 วัน, 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 60 วัน, 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 75 วัน, 4 ( $4 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 วัน, 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 105 วัน และ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 90 วัน มีค่าเท่ากับ  $3.12 \pm 0.17$ ,  $3.10 \pm 0.06$ ,  $2.91 \pm 0.51$ ,  $2.85 \pm 0.14$ ,  $2.79 \pm 0.29$ ,  $2.73 \pm 0.15$ ,  $2.64 \pm 0.73$  และ  $2.60 \pm 0.04$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.18) นอกจากนี้ยังพบว่า มีปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนลำต้น และใบสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นของ

สารหนูในกากโลหกรรมทุกช่วงเวลาของการทดลอง (ตารางที่ 4.19) พบว่า แนวนอนในการบำบัดสารหนูผลเป็นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณสารหนูที่สะสมอยู่ในพืชทั้งส่วนราก ลำต้น และใบได้ โดยชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าการสะสมสารหนูเท่ากับ  $60.42 \pm 1.07$  และ  $60.42 \pm 0.48$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.19) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) นอกจากนี้ ชุดการทดลองที่ให้ผลการบำบัดได้ดีรองลงมา คือ 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลาของการทดลอง 90 วัน (ดังรูปที่ 4.11) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Mao et al. (2016) ที่ทำการทดลองการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนจากบริเวณดินนาข้าว โดยใช้พืชร่วมกับจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า พบว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าสามารถให้ผลของการดูดดึงสารหนูไปสะสมในพืชดีกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า และมีการสะสมในส่วนรากมากกว่าลำต้น นอกจากนี้ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณข้าวแอนด์กับปริมาณการสะสมสารหนูของพืช พบว่า ชุดการทดลอง 1 ( $1 \text{ V cm}^{-1}$ ) และ 2 ( $2 \text{ V cm}^{-1}$ ) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 90 ถึง 120 วัน ให้ผลในการบำบัดได้ดีที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะการทดลองที่ระยะเวลา 90 วัน มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูสูงสุดซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่อยู่ในช่วง 5.20-5.80 ให้ผลในการดูดดึงสารหนูไปสะสมในพืชได้ดีที่สุด รวมทั้งสารหนูจะมีการกระจายตัว การเคลื่อนที่ และสะสมหรือไปกักเก็บไว้ในส่วนของรากพืชเพิ่มขึ้น เมื่อสภาวะของดินหรือกากโลหกรรมมีความเป็นกรดประมาณ 5.5 (Signes-Pastor et al., 2007) โดยทั่วไปนั้น ดินที่มีสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่ำจะส่งผลให้สารหนูอยู่ในรูปสารละลายน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในดินยังมีผลต่อการกระจายตัวของสารหนูในรูปอาร์เซเนต (Arsenate; As (V)) และอาร์เซไนต์ (Arsenite; As (III)) อีกด้วย (Adra et al., 2016) เนื่องจากในกากโลหกรรมส่วนใหญ่สารหนูมักถูกล้อมรอบด้วยเหล็กออกไซด์ (FeO) และแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของอลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีสในตัวอย่างกากโลหกรรมที่ทำการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 9,292.96, 18,792.40 และ 989.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) ดังนั้นการลดค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารหนู (Han et al., 2004) นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกากโลหกรรมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สารหนูเกิดการดูดซับและตกตะกอนกับโลหะชนิดที่แตกต่างกันในดินหรือกากโลหกรรมแต่ละประเภท นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า สารหนูสามารถจับตัวและตกตะกอนกับแคลเซียมหรือซัลเฟตได้ง่ายในดินหรือกากโลหกรรมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ในขณะที่ดินหรือกากโลหกรรมที่มีสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่ำ สารหนูจะมีโอกาสสูงที่จะจับตัวกับเหล็กออกไซด์ (Iron(II) oxide) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide) (Moreno-Jimenez et al., 2013) นอกจากนี้ที่กล่าวมา



นั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงนี้ยังไม่ถึงขั้นการทำลายระบบการทำงานของจุลินทรีย์บริเวณไรโซสเฟียร์ (Rhizosphere) ของรากพืช ซึ่งกรดอินทรีย์ที่ถูกผลิตมาจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถช่วยเพิ่มการดูดซึมของโลหะหนักได้ โดยการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ และลิแกนด์อินทรีย์ (Organic ligands) (Thangavel and Subbhuraam, 2004) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Gonzaga et al. (2012) ที่พบว่า สภาวะกรดที่เกิดจากจุลินทรีย์โดยรอบรากพืช สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงสารหนูไปสะสมในพืชได้ดียิ่งขึ้น แต่การสะสมสารหนูในเนื้อเยื่อพืชดังกล่าวยังถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารหนูในกากโลหะกรรม โดยกลไกการดูดดึง สะสม และลำเลียงสารหนูในพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของสารหนู ความเข้มข้นของสารหนู ความเป็นกรดต่างของกากโลหะกรรม และชนิดของพืช โดยพืชหลายชนิดมีการดูดซึมสารหนูในรูปของอาร์เซเนต (Arsenate) โดยโปรตีนกลุ่ม Phosphate transporter บนเยื่อหุ้มเซลล์ของราก แต่ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย เช่น บริเวณที่มีน้ำท่วมขัง สารหนูจะอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (Arsenite) ซึ่งพืชสามารถดูดซึมได้ง่ายกว่ารูปของอาร์เซเนต โดยผ่านทาง Nodulin-26-like intrinsic membrane proteins (NIPs) ซึ่งเป็นโปรตีนในกลุ่ม Aquaporin (Zhao et al., 2009)



รูปที่ 4.10 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่สะสมในหญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลาการทดลองแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.17 ปริมาณสารหนูในส่วนใต้กอกโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ระยะเวลาการทดลอง (วัน)	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อเซนติเมตร	2 โวลต์ต่อเซนติเมตร	4 โวลต์ต่อเซนติเมตร
15	1.92±0.19 <sup>k</sup>	1.98±0.52 <sup>k</sup>	2.27±0.50 <sup>klm</sup>	2.05±0.55 <sup>kl</sup>
30	2.21±0.14 <sup>klm</sup>	2.48±0.17 <sup>lmno</sup>	2.81±0.29 <sup>nopq</sup>	2.59±0.09 <sup>mno</sup>
45	2.41±0.08 <sup>klmn</sup>	2.69±0.13 <sup>mnop</sup>	2.93±0.21 <sup>opq</sup>	4.62±0.42 <sup>tu</sup>
60	3.11±0.05 <sup>pqr</sup>	4.64±0.10 <sup>tu</sup>	4.50±0.28 <sup>tu</sup>	4.74±0.09 <sup>tu</sup>
75	3.19±0.08 <sup>qrs</sup>	5.61±0.14 <sup>v</sup>	4.66±0.09 <sup>tu</sup>	4.92±0.30 <sup>u</sup>
90	3.43±0.39 <sup>s</sup>	7.69±0.16 <sup>z</sup>	6.48±0.22 <sup>xy</sup>	4.85±0.28 <sup>tu</sup>
105	3.64±0.16 <sup>s</sup>	6.91±0.09 <sup>y</sup>	6.02±0.19 <sup>vw</sup>	4.90±0.23 <sup>u</sup>
120	4.38±0.20 <sup>t</sup>	6.69±0.13 <sup>xy</sup>	6.26±0.49 <sup>wx</sup>	2.61±0.22 <sup>mno</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 4.18 ปริมาณสารหนูในส่วนเนื้อกากโลหกรรม (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

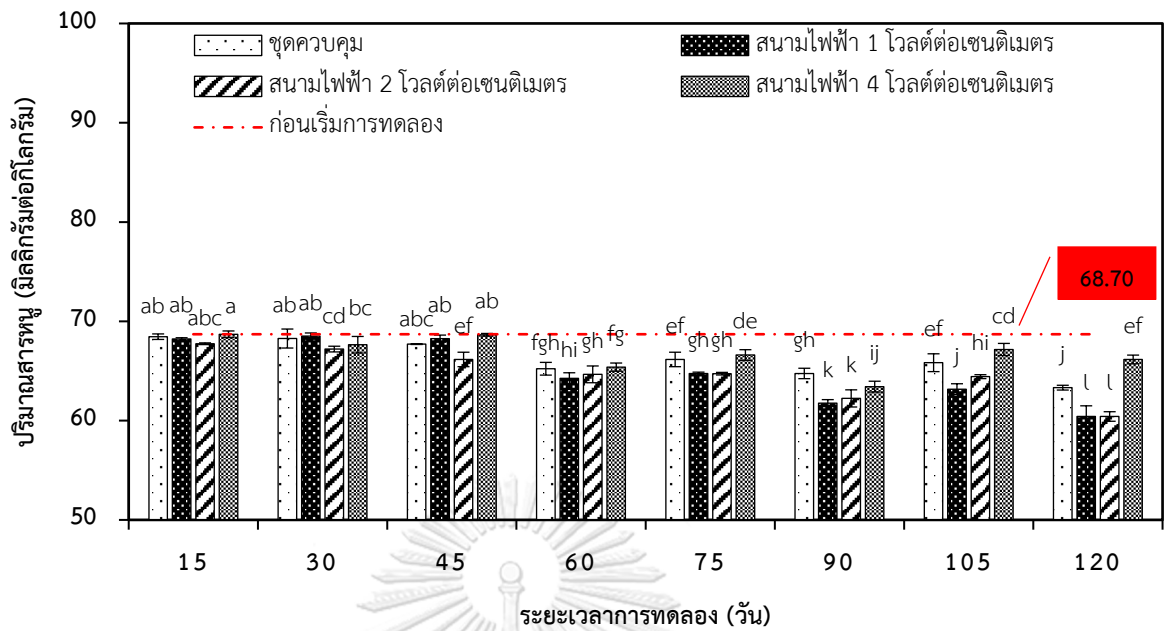
ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	2 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	4 โวลต์ต่อ เซนติเมตร
15	1.14±0.10 <sup>j</sup>	1.72±0.70 <sup>ghi</sup>	1.60±0.19 <sup>hij</sup>	1.54±0.19 <sup>ij</sup>
30	1.57±0.04 <sup>ij</sup>	1.62±0.44 <sup>hij</sup>	1.66±0.17 <sup>hij</sup>	2.02±0.31 <sup>efghi</sup>
45	1.71±0.21 <sup>ghi</sup>	1.81±0.12 <sup>fghi</sup>	1.92±0.18 <sup>efghi</sup>	1.97±0.06 <sup>efghi</sup>
60	1.73±0.17 <sup>ghi</sup>	1.92±0.27 <sup>efghi</sup>	2.29±0.09 <sup>cdefg</sup>	2.85±0.14 <sup>abc</sup>
75	1.84±0.11 <sup>fghi</sup>	2.32±0.22 <sup>cdef</sup>	3.12±0.17 <sup>a</sup>	2.79±0.29 <sup>abc</sup>
90	1.94±0.02 <sup>efghi</sup>	2.60±0.04 <sup>abcd</sup>	3.10±0.06 <sup>a</sup>	1.78±0.20 <sup>fghi</sup>
105	2.16±0.06 <sup>defgh</sup>	2.64±0.73 <sup>abcd</sup>	2.92±0.51 <sup>ab</sup>	2.29±0.53 <sup>cdefg</sup>
120	2.43±0.36 <sup>bcde</sup>	2.49±0.39 <sup>bcde</sup>	2.34±0.33 <sup>cdef</sup>	2.73±0.15 <sup>abcd</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 4.19 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในชุดการทดลองให้กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

ระยะเวลาการ ทดลอง (วัน)	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	ชุดควบคุม	1 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	2 โวลต์ต่อ เซนติเมตร	4 โวลต์ต่อ เซนติเมตร
15	68.45±0.28 <sup>ab</sup>	68.22±0.13 <sup>ab</sup>	67.74±0.09 <sup>abc</sup>	68.69±0.34 <sup>a</sup>
30	68.27±0.96 <sup>ab</sup>	68.51±0.32 <sup>ab</sup>	67.21±0.29 <sup>cd</sup>	67.64±0.83 <sup>bc</sup>
45	67.70±0.03 <sup>abc</sup>	68.34±0.29 <sup>ab</sup>	66.16±0.73 <sup>ef</sup>	68.61±0.11 <sup>ab</sup>
60	65.22±0.64 <sup>fgh</sup>	64.25±0.57 <sup>hi</sup>	64.66±0.85 <sup>gh</sup>	65.49±0.33 <sup>fg</sup>
75	66.16±0.73 <sup>ef</sup>	64.77±0.12 <sup>gh</sup>	64.73±0.13 <sup>gh</sup>	66.61±0.54 <sup>de</sup>
90	64.63±0.43 <sup>gh</sup>	61.68±0.29 <sup>k</sup>	62.24±0.86 <sup>k</sup>	63.55±0.44 <sup>ij</sup>
105	65.83±0.90 <sup>ef</sup>	63.17±0.55 <sup>j</sup>	64.38±0.16 <sup>hi</sup>	67.16±0.61 <sup>cd</sup>
120	63.26±0.20 <sup>j</sup>	60.42±1.07 <sup>l</sup>	60.42±0.48 <sup>l</sup>	66.06±0.36 <sup>ef</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์



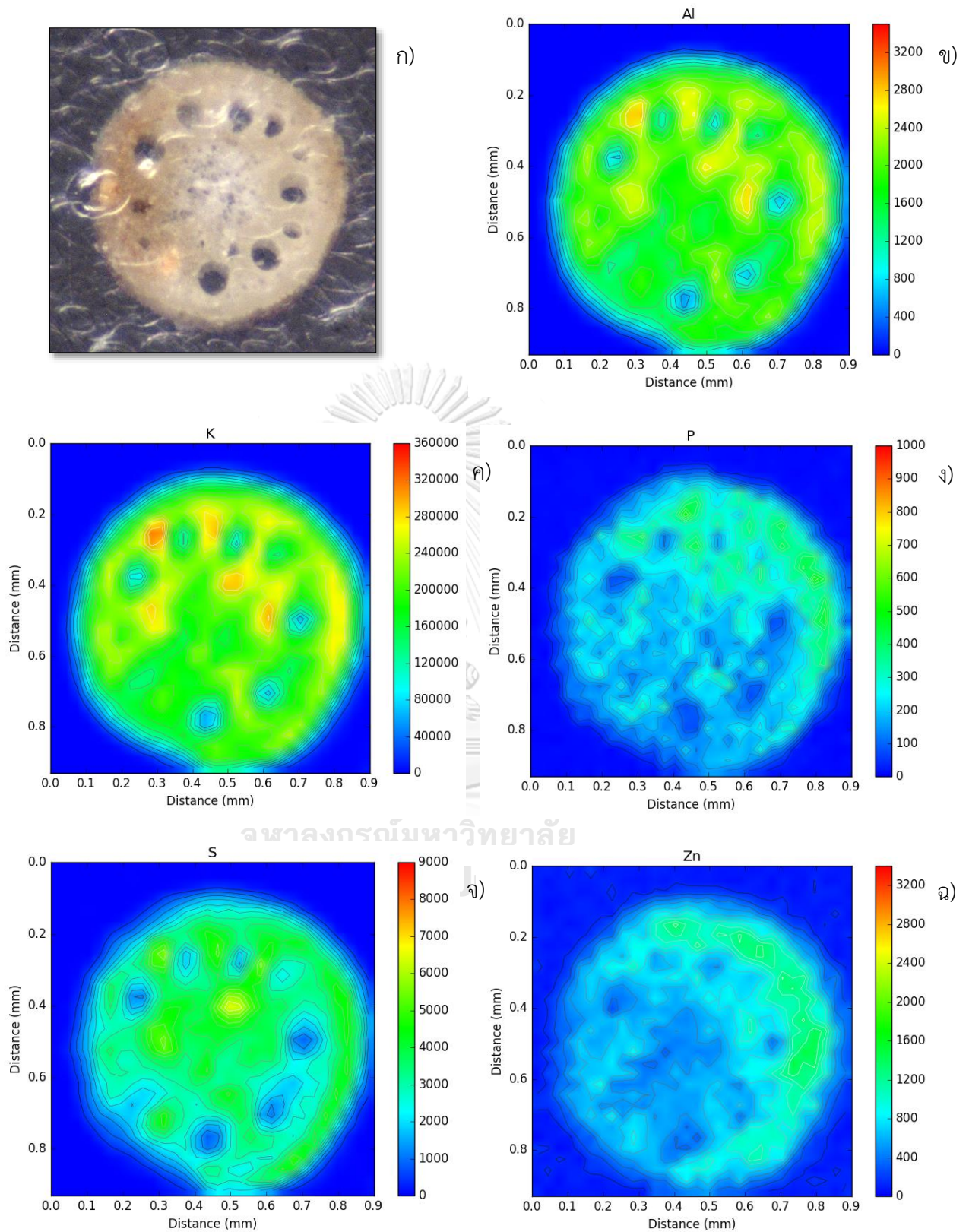
รูปที่ 4.11 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในชุดการทดลองให้กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

#### 4.3 ผลของการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสารหนูไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชทดลองด้วยระบบลำแสงซินโครตรอน (Synchrotron) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ ศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมของสารหนูในแต่ละส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยใช้ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) (สถาบันแสงวิจัยซินโครตรอน, 2561) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF) โดยใช้แสงซินโครตรอนในช่วงรังสีเอกซ์ที่ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2-12 keV จากแม่เหล็กของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารหนู และตรวจวัดการสะสมของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ ด้วยโครงสร้างการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron) มีหลักการทำงาน คือ การกระเจิงรังสีเอกซ์จะอาศัยหลักการของ Bragg เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดียวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างเป็นระเบียบจะส่งผลให้เกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก และเมื่อความแตกต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) ส่งผลให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนหรือเรียกว่า Diffraction pattern ดังนั้น เมื่อทราบความยาวคลื่น รวมทั้งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (q) จะสามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกได้ (d) โดยปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และทำให้เกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา จึงทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสี

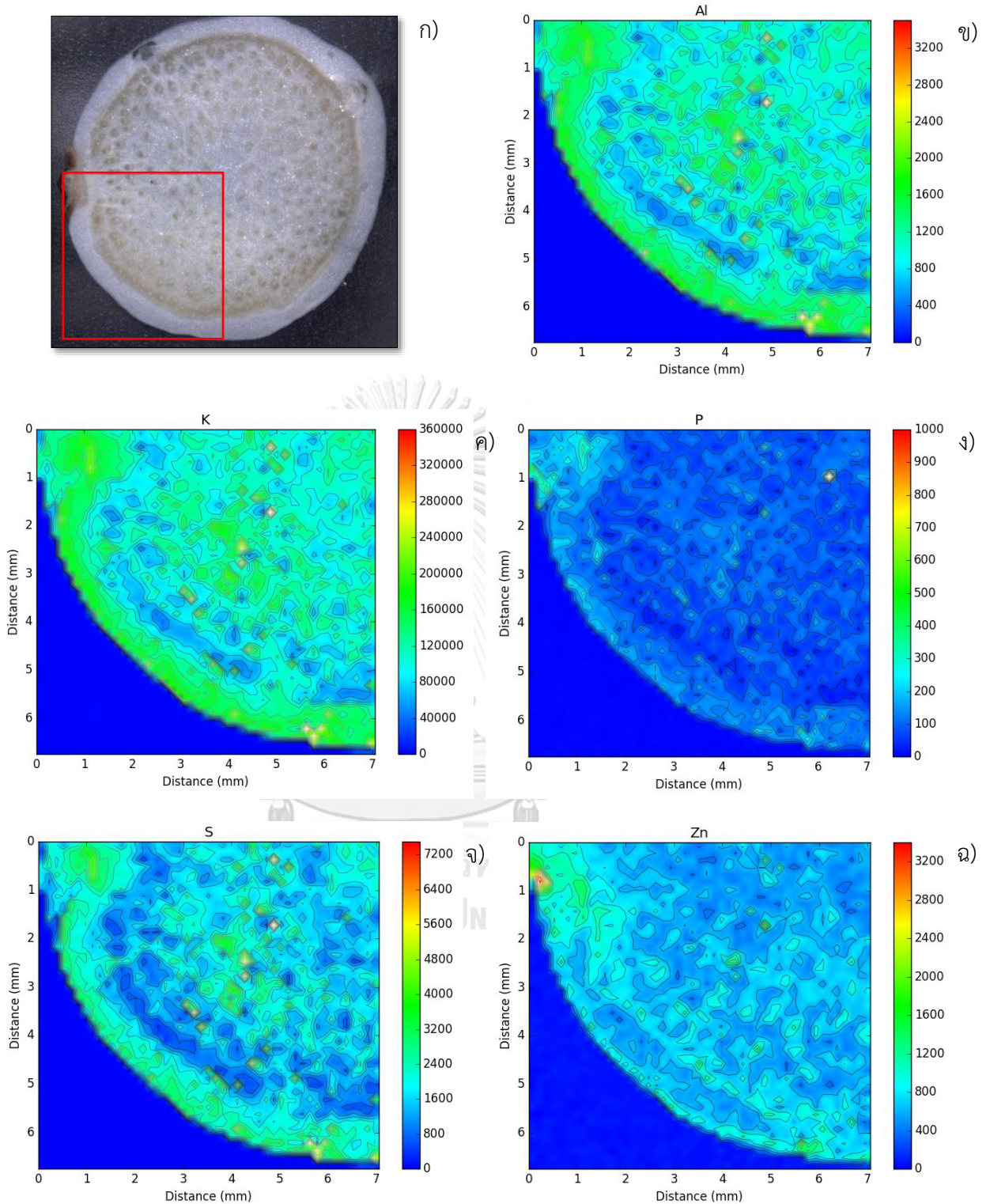
เอกซ์ โดยที่รังสีเอกซ์ที่คลายออกมานั้นมีคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างได้

ผลจากการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสารหนูในชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้า  $1 \text{ (V cm}^{-1}\text{)}$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 วัน ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีปริมาณการสะสมสารหนูสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ ผลดังกล่าวได้นำตัวอย่างพืชมาทำการวิเคราะห์ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF) ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสะสมสารหนู รวมทั้งการกระจายตัวของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ทั้งนี้การสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ทั้งในส่วนใต้กอกโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกอกโลหกรรม (ลำต้น และใบ) พบว่า ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) หรือลำแสงซินโครตรอนนั้นไม่สามารถตรวจพบการสะสมของสารหนูได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณความเข้มข้นต่ำส่งผลให้เป็นข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงพลังงาน 2-12 keV ซึ่งสารหนุนั้นมีช่วงพลังงานที่ทำให้ไอเล็กตรอนชั้นในสุดหรือเรียกว่า เค-แอลฟา ( $K\alpha_{1&2}$ ) และเค-เบตา ( $K\beta_1$ ) หลุดออกมา เท่ากับ 10.54 และ 11.72 keV และเกิดปฏิกิริยาการแทนที่โดยการคายพลังงานของไอเล็กตรอนชั้นรองลงมาหรือเรียกว่า แอล-แอลฟา ( $L\alpha_{1&2}$ ) ที่มีพลังงานเท่ากับ 12.82 keV จะเห็นได้ว่า ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้วิเคราะห์สารหนุนั้นอยู่ใกล้บริเวณขีดจำกัดของเครื่องมือที่จะผลิตได้ รวมทั้งปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่สะสมในตัวอย่างพืชมีค่าต่ำมาก หากแต่สามารถตรวจพบการเคลื่อนที่ และการสะสมของธาตุอื่น ๆ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสังกะสี (Zn) (ดังรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14) ซึ่งธาตุที่พบนั้นมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าสารหนู โดยเฉพาะความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่พบว่า มีการสะสมทั้งในส่วนราก ลำต้น และใบในปริมาณที่มากรองลงมาจากโพแทสเซียม และซัลเฟอร์ ถึงแม้ว่าค่าพลังงานที่สามารถทำให้ไอเล็กตรอนเกิดการหลุดออกแทนที่ และคายพลังงาน สำหรับชั้นในสุด ( $K\alpha_{1&2}, K\beta_1$ ) และชั้นรองลงมา ( $L\alpha_{1&2}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.48 และ 1.55 keV พบว่า ค่าพลังงานนั้นอยู่ต่ำกว่าขอบเขตพลังงานของเครื่องมือที่ 2 keV แต่ยังสามารถวิเคราะห์พบอะลูมิเนียมได้ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่สะสมในพืชสูง ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณความเข้มข้นที่สูงของอะลูมิเนียมในกอกโลหกรรมเริ่มต้นเท่ากับ 9,292.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รวมทั้งอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ส่งผลให้อะลูมิเนียมอยู่ในรูปละลายน้ำได้ และมีการเคลื่อนที่ตามท่อลำเลียงน้ำไปสะสมในพืชได้ดีกว่าสารหนู เหล็ก และแมงกานีส นอกจากนี้ยังพบว่า โพแทสเซียมมีการสะสมมากที่สุดในส่วนของราก รองลงมาได้แก่ ส่วนลำต้น และส่วนใบ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมโพแทสเซียมที่ต่ำแสดงด้วยสีน้ำเงิน และปริมาณการสะสมโพแทสเซียมที่สูงแสดงด้วยสีแดง (Limit of detection = 150-200 ppm)



รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนรากของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn)

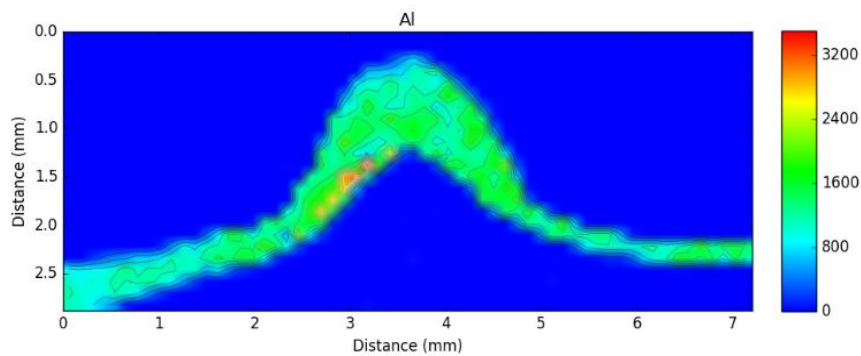




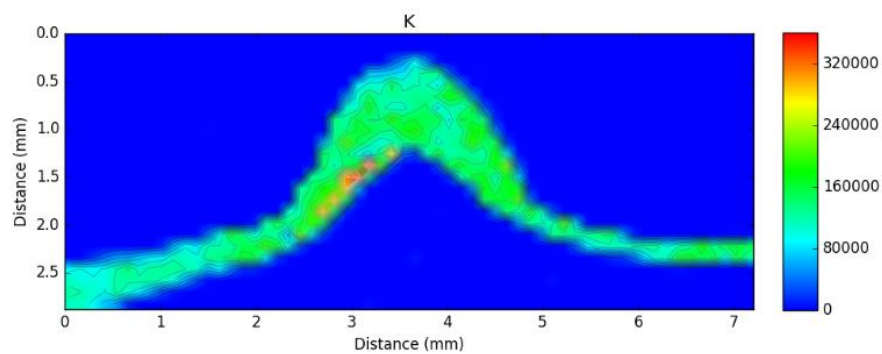
รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนลำต้นของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn)



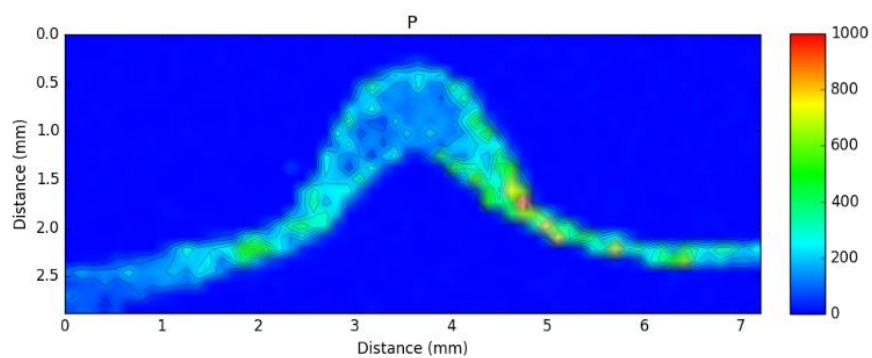
ก)



ข)



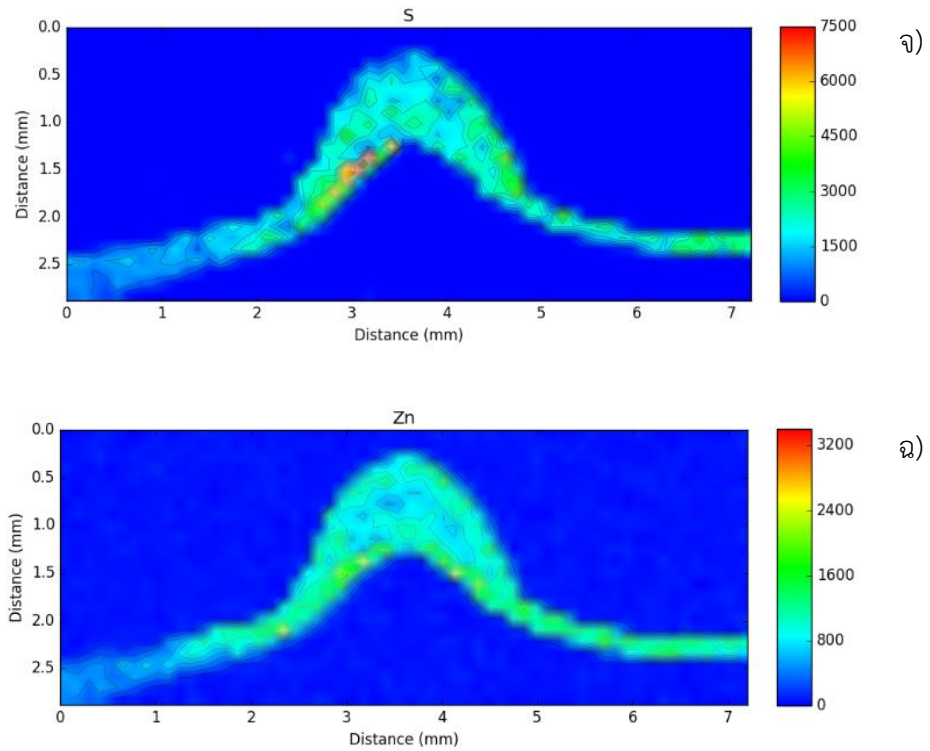
ค)



ง)

รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนใบของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซิลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn)





รูปที่ 4.14 (ต่อ) การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุ ๆ ในส่วนใบของพืชทดลอง ก) รากพืชทดลอง ข) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ค) ธาตุโพแทสเซียม (K) ง) ธาตุฟอสฟอรัส (P) จ) ธาตุซัลเฟอร์ (S) และ ฉ) ธาตุสังกะสี (Zn)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วย จลนศาสตร์ไฟฟ้า

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า ได้แก่ รูปแบบของภาชนะทรงกลม ทรงเหลี่ยม ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ขั้วสแตนเลส 316L และ ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีแนวโน้มค่าของการเคลื่อนที่ของสารหนูที่คล้ายกัน คือ ในบริเวณที่ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 และ 9 มีการสะสมสารหนูในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแคโทด สำหรับบริเวณที่ 5 มีการสะสมสารหนูในปริมาณสูงที่สุด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางขั้วแอโนด แสดงให้เห็นว่า การใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า ส่งผลให้สารหนูมีการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดในแนวราบ และแนวตั้งด้วย สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น พบว่า รูปแบบภาชนะทรงกลมและขั้วกราฟไฟต์ที่ป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของสารหนูได้ดีที่สุด ในส่วนผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางกาทะเล พบว่า ในระยะเวลาที่ 5 วัน การป้อนสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูดีที่สุด โดยเคลื่อนที่มาบริเวณระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด มีค่าเท่ากับ  $63.07 \pm 1.60$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การศึกษาในครั้งนี้ แม้ว่าชนิดขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์จะให้ผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูดีที่สุด และการสักร่อนไม่ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนสู่พื้นที่บำบัด แต่เนื่องจากกราฟไฟต์มีต้นทุนต่อแท่งที่สูงและเปราะแตกหักง่าย จึงทำให้ไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งานในพื้นที่จริง

##### 5.1.2 การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าใน การบำบัดกากโลหะหนักที่ปนเปื้อนสารหนู

การบำบัดกากโลหะหนักที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ปริมาณสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ได้แก่ 0 (C), 1 (1V), 2 (2V) และ 4 (4V) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า ชุดการทดลองที่มีการป้อนสนามไฟฟ้านั้นให้ผลการบำบัดสารหนูได้ดีกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า และหญ้าเนเปียร์มีการสะสมสารหนูในส่วนได้กากโลหะหนัก (ราก) มากกว่าส่วนเหนือ

กากโลหะกรรม (ลำต้น และใบ) ซึ่งชุดการทดลองที่พืชดูดตั้งสารหนูได้สูงที่สุดในส่วนราก คือ ชุดการทดลอง 1 (1V) โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 90 วัน มีค่าเท่ากับ  $7.69 \pm 0.16$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อพิจารณาปริมาณสารหนูที่สะสมต่อมวลชีวภาพ พบว่า ชุดการทดลอง 1 (1V) และ 2 (2V) โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่ามากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาในส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโต ค่าความนำไฟฟ้า การสีกร่อนของซีวแอโนด และค่าความเป็นกรด-ด่างแล้ว พบว่า ที่ระยะเวลาของการทดลอง 120 วัน ไม่เหมาะสมต่อสภาพของกากโลหะกรรมที่เปลี่ยนไปอย่างมาก โดยเฉพาะค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำเกินไป ดังนั้นหากนำไปประยุกต์ใช้ในดินทำการเกษตรกรรมอาจจะส่งผลต่อการทำให้ให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินขาดหายไป สำหรับปริมาณสนามไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมต่อการบำบัดสารหนู และการเจริญเติบโตของพืช คือ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ทั้งนี้ระยะเวลาในการบ่อนสนามไฟฟ้านั้นไม่ควรให้อย่างต่อเนื่องและนานเกินไปในหนึ่งวัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเลือกใช้วัสดุที่สามารถให้สนามไฟฟ้าได้ดี และมีความทนทานต่อการสีกร่อนจากสภาวะกรดบริเวณซีวแอโนดได้ด้วย เช่น กลุ่มสแตนเลส โลหะผสมนิกเกิล อลูมิเนียมผสม และแพลทินัม เป็นต้น

5.2.2 ควรเลือกพืชกลุ่มอื่นที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้งานการบำบัดร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า เช่น พืชล้มลุกในกลุ่มที่มีมวลชีวภาพที่สูง เช่น พืชที่อยู่วงศ์เดียวกับผักกาด (*Brassicaceae*) หรืออาจเป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดตั้ง และทนทานต่อสารหนูได้มาก เช่น พืชในวงศ์เดียวกับเฟิร์น เป็นต้น

5.2.3 ควรปรับเปลี่ยนเวลาในการบ่อนสนามไฟฟ้าให้น้อยลง เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืช อีกทั้งเพื่อป้องกันการทำลายเซลล์ของรากพืชด้วย



ภาคผนวก ก  
สถานที่ดำเนินการทดลอง



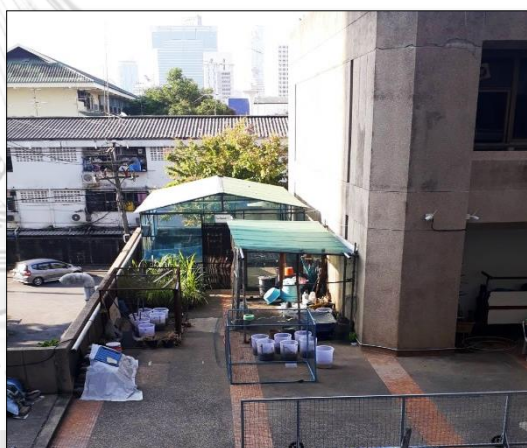
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ ก1 ก) บริเวณด้านหน้าโรงเรียน และ ข) ภายในโรงเรียนทดลอง  
บริเวณชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ก)



ข)



ค)



ง)

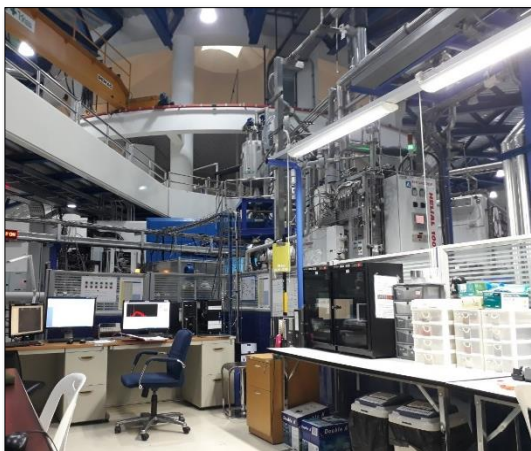


จ)

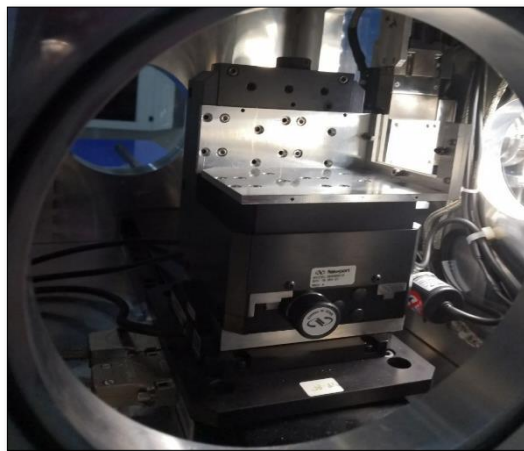


ฉ)

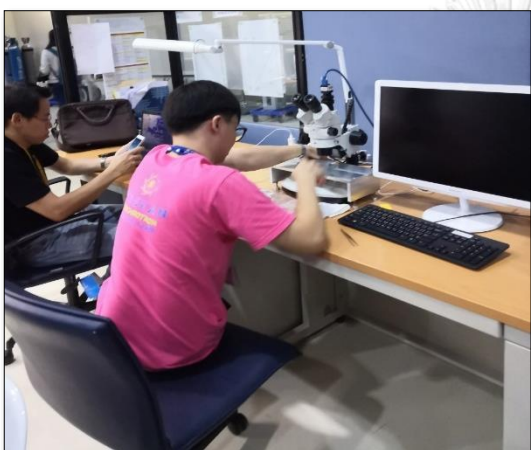
รูปที่ ก2 ก) ห้องเตรียมสารเคมี ข) ห้องปฏิบัติการสำหรับเตรียมตัวอย่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อน  
 ค) เครื่อง Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES)  
 ง) เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)  
 จ) เครื่องไมโครเวฟไดเจสชัน (Microwave digestion) และ ฉ) เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง  
 ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



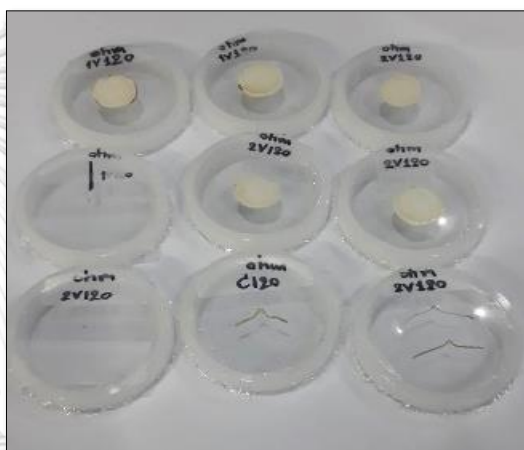
ก)



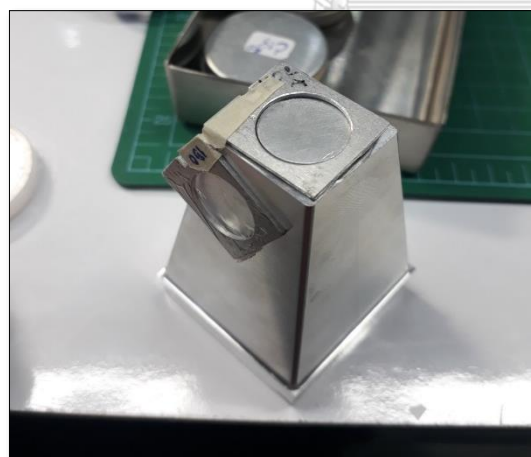
ข)



ค)



ง)



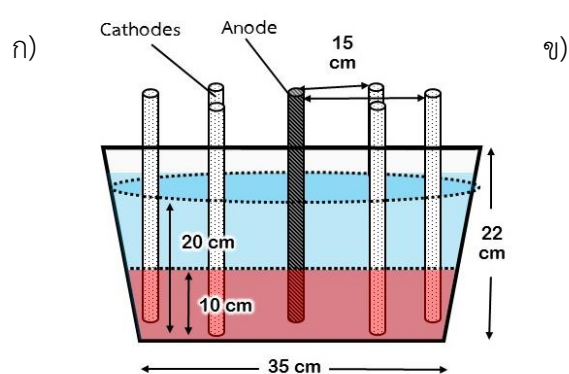
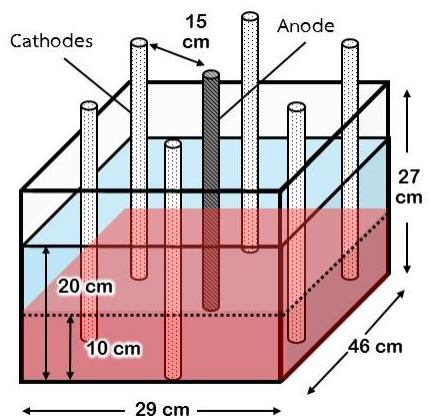
จ)



ฉ)

รูปที่ 3 ก) บริเวณปฏิบัติการระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) ข) ช่องใส่ตัวอย่าง (Chamber)  
 ค) กระบวนการคัดเลือกตัวอย่าง ง) เตรียมตัวอย่างพืช ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ  
 จ) และ ฉ) การเตรียมตัวอย่างพืชก่อนการวิเคราะห์  
 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จัหวัดนครราชสีมา





รูปที่ ก4 ก) รูปแบบการวางขั้วในภาชนะทรงเหลี่ยม และ ข) รูปแบบการวางขั้วในภาชนะทรงกลม โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ชั้นที่ไม่มีการปนเปื้อน (สีฟ้า) และชั้นที่มีการปนเปื้อนสารหนู (สีแดง)  
 ค) การเตรียมตัวอย่างวันและการวางขั้วอิเล็กโทรดในภาชนะทรงเหลี่ยม  
 ง) การเตรียมตัวอย่างวันและการวางขั้วอิเล็กโทรดในภาชนะทรงกลม จ) ภาชนะทรงเหลี่ยม และ ฉ) ภาชนะทรงกลม ติดตั้งกับแหล่งป้อนสนามไฟฟ้า (Power supply)



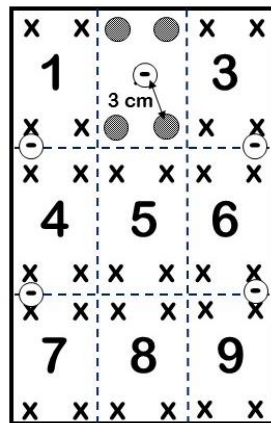


ก)

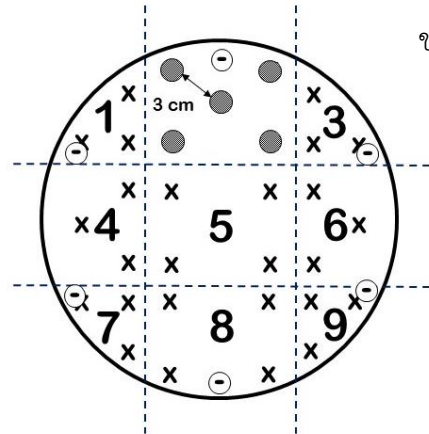


ข)

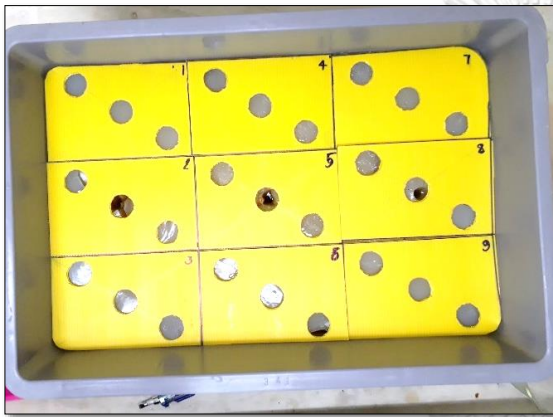
รูปที่ ก5 ก) การวางขั้วอิเล็กโทรดลงในกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู และ ข) กากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูติดตั้งกับแหล่งป้อนสนามไฟฟ้า (Power supply)



ก)



ข)



ค)



ง)



จ)



ฉ)

รูปที่ ก6 ก) รูปแบบบริเวณการเก็บตัวอย่างวุ้นในภาชนะทรงเหลี่ยม ข) รูปแบบบริเวณการเก็บตัวอย่างวุ้นในภาชนะทรงกลม ค) การเก็บตัวอย่างวุ้นในภาชนะทรงเหลี่ยม ง) การเก็บตัวอย่างวุ้นในภาชนะทรงกลม จ) ตัวอย่างวุ้น โดยแยกเป็นชั้นล่าง (ปนเปื้อนสารหนู) และชั้นบน (ไม่มีการปนเปื้อนสารหนู) และ ฉ) ขี้วุ้นเล็กโทดกราไฟต์ (Graphite)





ก)



ข)



ค)



ง)



จ)



ฉ)

รูปที่ ๓7 ก) และ ข) บริเวณพื้นที่โดยรอบเหมืองแร่ทองคำ ค) บริเวณขอบบ่อกักเก็บกากโลหะกรรม  
 ง) ภายในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหะกรรม จ) การขนย้ายตัวอย่างกากโลหะกรรม  
 และ ฉ) การจัดเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรม





ก)



ข)



ค)



ง)



จ)



ฉ)

รูปที่ 8 ก) ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัด นครราชสีมา ข) การตัด และคัดเลือกท่อนพันธุ์ ค) ท่อนพันธุ์ที่มีอายุ ขนาด และน้ำหนักใกล้เคียงกัน  
 ง) การปักชำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ จ) การคัดเลือกดูแลต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ  
 และ ฉ) ต้นหญ้าเนเปียร์แคระอายุ 3 เดือน





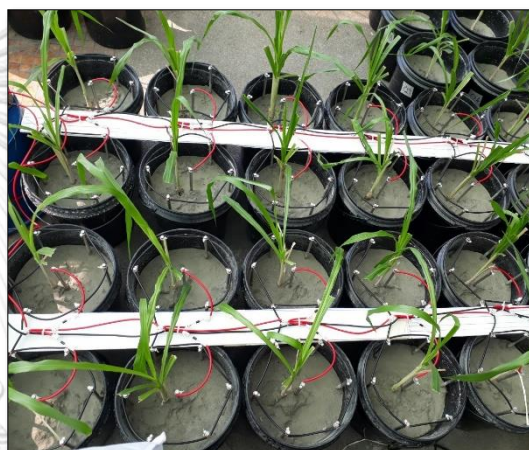
ก)



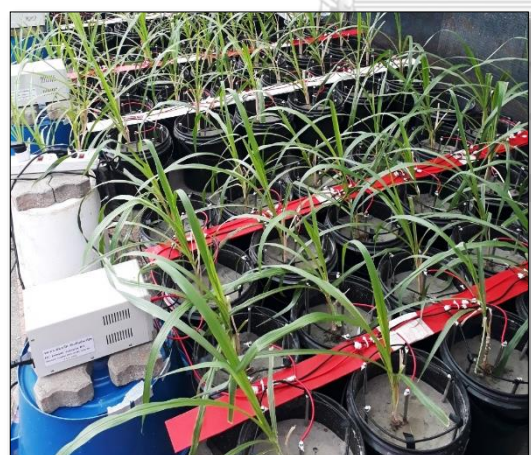
ข)



ค)



ง)

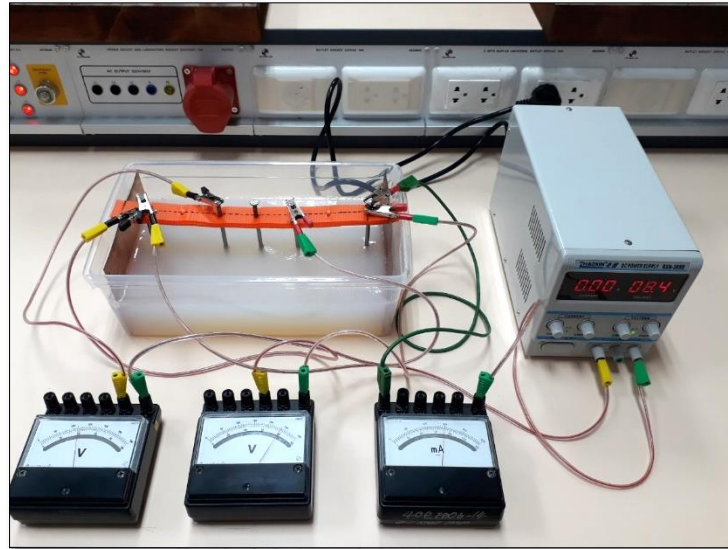


จ)

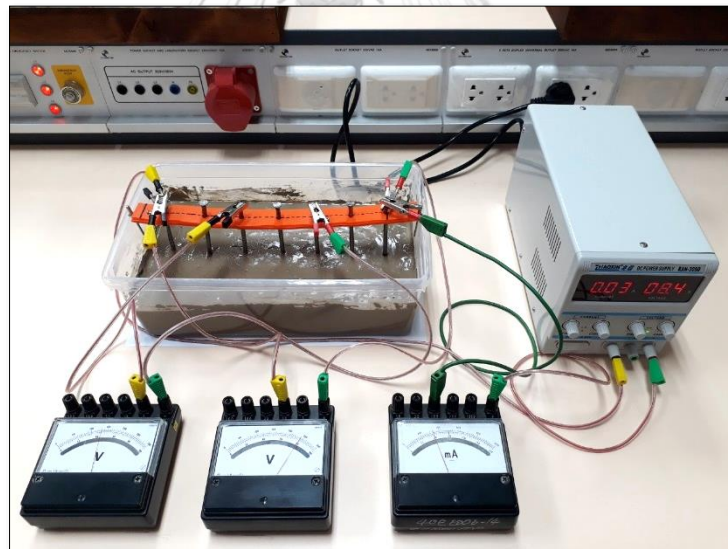


ฉ)

รูปที่ 9 ก) เตรียมกากโลหะกรรมใส่ภาชนะปลูกพืช และวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส เกรด 316L (Stainless steel 316L) ข) ปลูกพืชทดลองบริเวณขั้วแอโนด (Anode) ค) เริ่มปลูกพืชทดลองในกากโลหะกรรม ง) พืชทดลองหลังจากพักปรับสภาพ 2 สัปดาห์ จ) ติดตั้งแหล่งป้อนสนามไฟฟ้า (Power supply) และ ฉ) ติดตั้งซ็อกทักไดโอด (Schottky diode) บริเวณขั้วแอโนด (Anode)



ก)



ข)

รูปที่ ก10 ก) วัดค่าความต้านทานในตัวกลางไม้ ข) วัดค่าความต้านทานในตัวกลางกาโลทกรรม

**ภาคผนวก ข**  
**วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ**

**1) ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า**

ตารางที่ ข1 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสในภาชนะทรงเหลี่ยม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	17373.511	17	1021.971	22718.886	.000
Within Groups	1.619	36	0.045		
Total	17375.13	53			

ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนด์เลสในภาษาชนะทรงเหลี่ยม

Duncan<sup>a</sup>

		Subset for alpha = 0.05												
ส่วนที่เก็บตัวอย่าง	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3 บน	3	7.72												
9 ล่าง	3		8.75											
7 บน	3		9.09	9.09										
8 บน	3		9.1233	9.1233										
1 บน	3		9.4533	9.4533										
2 บน	3			11.8567										
2 ล่าง	3				13.86									
9 ล่าง	3					14.99								
3 ล่าง	3						16.2433							
8 ล่าง	3						16.3933							
7 ล่าง	3							19.9367						
1 ล่าง	3							19.9967						
6 บน	3								26.4367					
6 ล่าง	3								26.5733	26.5733				
4 ล่าง	3									27.2033				
4 บน	3										27.93			
5 บน	3											35.3767		
5 ล่าง	3												67.18	
Sig.		1	0.278	0.291	1	1	1	0.641	0.852	0.671	0.056	1	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ ข2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสในภาชนะทรงกลม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	17373.511	17	1021.971	22718.886	.000
Within Groups	1.619	36	0.045		
Total	17375.13	53			



ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนด์ในภาษาชงทรงกลม

Duncan<sup>a</sup>

		Subset for alpha = 0.05														
ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3 บน	3	1.2367														
3 ล่าง	3		2.82													
7 ล่าง	3			3.95												
2 บน	3				6.6133											
1 ล่าง	3					8.1										
1 บน	3					8.16										
9 ล่าง	3						8.6033									
7 บน	3							9.5333								
9 บน	3								9.5567							
2 ล่าง	3									13.6333						
8 บน	3										15.3467					
4 ล่าง	3											16.4767				
6 ล่าง	3												17.5467			
6 บน	3													22.9967		
8 ล่าง	3														23.1567	
4 บน	3															35.0167
5 ล่าง	3															58.24
5 บน	3															68.39
Sig.		1	1	1	1	0.731	1	0.894	1	1	1	1	0.362	1	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข3 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ในภาชนะทรงเหลี่ยม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7708.719	17	453.454	14643.156	.000
Within Groups	1.115	36	0.031		
Total	7709.834	53			



ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางข้ออิเล็กทรอนิกส์โทรดกราไฟต์ในภาษาทรงเหลี่ยม

Duncan<sup>a</sup>

ส่วนที่เก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4 บน	3	3,47																	
3 บน	3		6.2867																
8 ล่าง	3			7.6804															
7 บน	3				9.3785														
8 บน	3					9.9324													
9 ล่าง	3						16.3644												
9 บน	3							17.743											
3 ล่าง	3								18.8667										
1 บน	3									22.58									
2 บน	3										23.3433								
4 ล่าง	3											24.6233							
2 ล่าง	3												25.01						
6 ล่าง	3													25.6127					
1 ล่าง	3														28.1433				
6 บน	3															30.2398			
7 ล่าง	3																34.0837		
5 บน	3																	38.8392	
5 ล่าง	3																		51.0465
Sig.		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข4 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ในภาชนะทรงกลม

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	89303.602	17	5253.153	17266.33	.000
Within Groups	10.953	36	0.304		
Total	89314.555	53			

ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ในภาชนะทรงกลม

## Duncana

ส่วนที่เก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 ล่าง	3	0.9833								
7 บน	3	1.0167								
9 บน	3	1.1								
1 บน	3	1.58	1.58							
3 บน	3		2.1567							
7 ล่าง	3		2.2067							
9 ล่าง	3		2.3667							
4 บน	3			3.8567						
6 บน	3			4.07						
3 ล่าง	3			4.58						
6 บน	3				8.18					
4 ล่าง	3				8.44					
2 บน	3					10.8167				
8 ล่าง	3						13.4133			
8 บน	3							20.0733		
2 ล่าง	3							20.3633		
5 บน	3								84.1467	
5 ล่าง	3									168.78
Sig.		0.236	0.119	0.138	0.567	1	1	0.524	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข5 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสในภาชนะทรงเหลี่ยม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	17723.761	17	1042.574	5.964	.000
Within Groups	6293.538	36	174.821		
Total	24017.299	53			

ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสในภาชนะทรงเหลี่ยม

Duncan<sup>a</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1 บน	3	1.6467				
3 บน	3	5.83				
9 บน	3	6.5633				
2 บน	3	9.8333	9.8333			
7 ล่าง	3	9.9933	9.9933			
1 ล่าง	3	12.0433	12.0433			
4 ล่าง	3	12.4	12.4			
3 ล่าง	3	13.5933	13.5933			
7 บน	3	13.65	13.65			
9 ล่าง	3	17.0267	17.0267	17.0267		
8 บน	3	22.0533	22.0533	22.0533	22.0533	
6 บน	3	24.1467	24.1467	24.1467	24.1467	
2 ล่าง	3		33.9367	33.9367	33.9367	
8 ล่าง	3			40.99	40.99	
4 ล่าง	3				43.23	
5 บน	3				43.3067	
6 ล่าง	3				43.7933	
5 ล่าง	3					72.0833
Sig.		0.088	0.065	0.053	0.088	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข6 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส ในภาชนะทรงกลม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	35519.715	17	2089.395	18603.3	.000
Within Groups	4.043	36	0.112		
Total	35523.758	53			



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางข้ออิเล็กทรอนิกส์โทรดสแตนเลสในภาชนะทรงกลม

Duncan<sup>a</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
3 บน	3	1.0067																
3 ล่าง	3	1.1																
2 บน	3		2.2667															
9 บน	3			3.29														
1 ล่าง	3				4.8867													
2 ล่าง	3					5.0333												
9 ล่าง	3						6.3733											
7 ล่าง	3							6.43										
8 บน	3								6.5033									
6 ล่าง	3									7.52								
7 บน	3										7.9967							
8 ล่าง	3											7.9967						
6 บน	3												8.2767					
1 บน	3													10.27				
4 ล่าง	3														14.1933			
4 บน	3															33.4267		
5 ล่าง	3																45.0533	
5 บน	3																69.1167	
Sig.		0.735	1	1	1	0.595	0.659	0.09	0.313	1	1	1	1	1	1	1	1	96.1033

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ ข7 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ในภาชนะทรงเหลี่ยม

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	65981.95	17	3881.291	32702.4	.000
Within Groups	4.273	36	0.119		
Total	65986.223	53			



ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟท์ในภาษาธรรมชาติ

Duncan<sup>a</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	Subset for alpha = 0.05														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3 บนม	4.59														
2 ล่าง		5.5967													
2 บนม		5.8567													
7 ล่าง			7.1067												
9 ล่าง				7.6933											
3 ล่าง					9.09										
7 บนม					9.2767										
9 บนม					9.4133										
1 บนม						10.5333									
1 ล่าง							11.2067								
8 ล่าง								12.37							
8 บนม									16.1933						
4 บนม										25.7					
4 ล่าง											27.7533				
6 ล่าง												30.9433			
6 บนม													33.6833		
5 บนม														114.4967	
5 ล่าง															128.58
Sig.	1	0.361	1	1	0.286	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข8 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ในภาชนะทรงกลม

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	49390.576	17	2905.328	10208.3	.000
Within Groups	10.246	36	0.285		
Total	49400.822	53			

ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีการวางขั้วอิเล็กโทรดกราไฟต์ ในภาชนะทรงกลม

Duncan<sup>a</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9 บน	3	0.67									
8 บน	3		2.02								
7 บน	3		2.16								
9 ล่าง	3		2.1967								
1 ล่าง	3		2.2133								
1 บน	3		2.5933								
3 บน	3		2.9633								
6 บน	3			4.44							
7 ล่าง	3				5.7067						
6 ล่าง	3					6.89					
4 ล่าง	3						11.3267				
2 ล่าง	3						11.78				
4 บน	3						11.8833				
3 ล่าง	3							13.5333			
2 บน	3							14.0433			
8 ล่าง	3								17.4667		
5 ล่าง	3									87.69	
5 บน	3										114.0667
Sig.		1	0.063	1	1	1	0.236	0.249	1	1	1

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

## 2) ปริมาณการกระจายตัวของสารหนูในแต่ละส่วนที่เก็บตัวอย่างในตัวอย่างกลางกากโลหกรรม

ตารางที่ ข9 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างกลางกากโลหกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3 วัน

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.895	2	0.448	0.295	7.51
Within Groups	13.640	9	1.516		
Total	14.535	11			

วันที่ 3

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
ข้าวแคโทด	6	61.7167
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด	3	62.1733
ข้าวแอนด	3	62.33
Sig.		0.538

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.

ตารางที่ ข10 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 5 วัน

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16.919	2	8.460	5.719	7.51
Within Groups	13.313	9	1.479		
Total	30.232	11			

วันที่ 5

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha =
		0.05
		1
ข้าวแคโทด	6	60.7317
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด	3	61.7629
ข้าวแอนด	3	58.5114
Sig.		0.285

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.

ตารางที่ ข11 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณ  
สนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 7 วัน

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	141.241	2	70.621	11.233	0.51
Within Groups	56.330	9	6.259		
Total	197.571	11			

วันที่ 7

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha =
		0.05
		1
ข้าวแคโทด	6	61.33
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด	3	62.43
ข้าวแอนด	3	53.60
Sig.		0.285

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.

ตารางที่ ข12 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณ  
สนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3 วัน

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.870	2	1.935	1.799	.181
Within Groups	35.489	33	1.075		
Total	39.359	35			

วันที่ 3

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha =
		0.05
		1
ข้าวแคโทด	6	61.1583
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด	3	60.7478
ข้าวแอนด	3	61.6722
Sig.		0.57

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.

ตารางที่ ข13 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 5 วัน

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	34.764	2	17.382	20.443	.000
Within Groups	28.059	33	.850		
Total	62.823	35			

วันที่ 5

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด์	3	60.3778	
ข้าวแคโทด	6	61.0261	
ข้าวแอนด์	3		62.9956
Sig.		0.112	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.



ตารางที่ ข14 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางกากโลหกรรมในชุดการทดลอง ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 7 วัน

## ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.539	2	6.270	7.461	.002
Within Groups	27.730	33	.840		
Total	40.269	35			

วันที่ 7

Duncan<sup>a,b</sup>

ส่วนเก็บตัวอย่าง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
ข้าวแอนด์	3	59.1567	
ระหว่างข้าวแคโทดกับแอนด์	3		60.4411
ข้าวแคโทด	6		60.5528
Sig.		1.000	0.779

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.600.

3) ผลความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู

ตารางที่ ข15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนด (Anode) ที่ปริมาณสนามไฟฟ้า 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17								
Duncan <sup>a</sup>	3	2.9267																								
4V120	3		3.4533																							
4V105	3			3.9000																						
4V90	3				4.4200																					
2V120	3					4.4633																				
4V75	3						4.7133																			
2V105	3							4.9233																		
4V60	3								4.9567																	
2V90	3									5.2200																
2V75	3										5.2200															
1V120	3											5.2100														
4V45	3												5.3333													
2V60	3													5.5233												
1V105	3														5.5467											
4V30	3															5.7067										
2V45	3																5.7333									
1V90	3																	5.8267								
1V75	3																		6.0733							
2V30	3																			6.1533						
1V45	3																				6.2100					
1V30	3																					6.4067				
4V15	3																						6.7267			
2V15	3																							7.1567		
1V15	3																								7.3500	
C90	3																									7.5567
C60	3																									7.6500
C75	3																									7.6633
C30	3																									7.6700
C120	3																									7.6733
C105	3																									7.6733
C45	3																									7.6800
C15	3																									7.6833
Sig.		1.000	1.000	1.000	.251	1.000	.600	.875	.056	.714	.077	.211	.374	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.094							

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.











ตารางที่ ข21 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองที่ปริมาณสนามไฟฟ้า 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Duncan <sup>a</sup>	3	-.000133																	
4V120	3	.000287																	
4V105	3	.000287	.000287																
4V90	3	.000333	.000333	.000333															
4V75	3	.000567	.000567	.000567	.000567														
4V60	3	.000967	.000967	.000967	.000967	.000967													
2V120	3	.001567	.001567	.001567	.001567	.001567	.001567												
2V105	3	.001633	.001633	.001633	.001633	.001633	.001633	.001633											
4V45	3	.001800	.001800	.001800	.001800	.001800	.001800	.001800	.001800										
2V90	3	.001867	.001867	.001867	.001867	.001867	.001867	.001867	.001867										
2V75	3	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967										
4V30	3	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967	.002967									
2V60	3	.003067	.003067	.003067	.003067	.003067	.003067	.003067	.003067	.003067									
2V45	3	.004033	.004033	.004033	.004033	.004033	.004033	.004033	.004033	.004033									
4V15	3	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567	.004567								
1V120	3	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133	.005133								
1V90	3	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167	.005167								
2V30	3	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200	.005200								
1V105	3	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233	.005233								
1V75	3	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733	.005733								
1V60	3	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033	.006033								
1V45	3	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567	.006567								
C120	3	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633	.006633								
C105	3	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133	.007133							
1V30	3	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433	.007433							
C90	3	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600	.007600							
2V15	3	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667	.007667							
C75	3	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267	.008267							
C60	3	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533	.008533							
C45	3	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500	.009500							
1V15	3	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333	.010333							
C30	3	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167	.011167							
C15	3	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833	.012833							
Sig.		.143	.073	.054	.088	.051	.131	.116	.087	.054	.081	.066	.150	.081	.211	.081	.211	.081	.211

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.















## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. (2545). กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. กรุงเทพมหานคร:

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2554). การระงับภัยจากสารเคมีอันตราย.

กรมควบคุมมลพิษ. (2559). เทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (*Phytoremediation*). กรุงเทพมหานคร:

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมอนามัย. (2557). รายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประเทศไทย. แหล่งที่มา:

[http://hia.anamai.moph.go.th/download/hia/kpi/2558/12/moph/repoet57\\_ref\\_4](http://hia.anamai.moph.go.th/download/hia/kpi/2558/12/moph/repoet57_ref_4)

เกศ สัตยพงศ์. (2555). Arsenic. แหล่งที่มา:

[http://www.summacheeva.org/index\\_thaitox\\_arsenic.html](http://www.summacheeva.org/index_thaitox_arsenic.html)

ดรรรัตน์ โจนพิทยากร. (2558). การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชร่วมกับจุลณศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดิน

ที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้าขี้ฉี่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์

สิ่งแวดล้อม), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

ชัยชาญ สุรภักดิ์. (2553). ผลกระทบกรณีเหมืองแร่กับมาตรา 67: โอกาสทองของการเรียนรู้.

แหล่งที่มา: <http://www.publicconsultation.opm.go.th/rubfung67/doc37.pdf>

พันธวัช สัมพันธ์พานิช. (2558). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. กรุงเทพมหานคร:

สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรัช สุขสราน, ชิต ยุทธวรวิทย์ และพุลศรี ศุภระรุจิ. (2539). อิทธิพลของระยะปลูกที่มีต่อผลผลิตและ

ส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี. กรุงเทพมหานคร:

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

วีระศักดิ์ จิโนแสง, ประเสริฐศักดิ์ นันทขมชื่น และวิรัช สุขสราน. (2542). ผลผลิตและส่วนประกอบ

ทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่ที่ต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ ในพื้นที่จังหวัด

เพชรบูรณ์. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

วิวัฒน์ เอกบูรระวัฒน์. (2555). Manganese. แหล่งที่มา:

[http://www.summacheeva.org/index\\_thaitox\\_manganese.ht](http://www.summacheeva.org/index_thaitox_manganese.ht)

สายัณห์ ทัดศรี. (2548). หญ้าอาหารสัตว์และหญ้าพื้นเมืองในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร:

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. (2561). แสงซินโครตรอน BL6b: Micro-XRF. แหล่งที่มา:

<http://www.sri.or.th>.

สมพล ไวกัญญา, เสน่ห์ กุลนะ, อิศระ สุริยะชัยวัฒน์ และเฉลียว ศรีชู. (2546). อิทธิพลของระยะปลูกที่มีต่อผลผลิตและส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ในพื้นที่จังหวัดนครพนม. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตร และสหกรณ์.

### ภาษาอังกฤษ

Abad-Valle, P. Alvarez-Ayuso, E. Murciego, A. Munoz-Centeno, L. M. Alonso-Rajo, P. and Villar-Alonso, P. (2018). Arsenic distribution in a pasture area impacted by past mining activities. *Ecotoxicol Environ Saf*, 147, 228-237.

doi:10.1016/j.ecoenv.2017.08.031

Aboughalma, H., Bi, R., and Schlaak, M. (2008). Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 43(8), 926-933. doi: 10.1080/10934520801974459.

Acar, Y.B., and Alshawabkeh, A.N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. *Environmental Science and Technology* 27, 2638-2647.

<http://doi.org/10.1021/es00049a002>

Adra, A. Morin, G. Ona-Nguema, G. and Brest, J. (2016). Arsenate and arsenite adsorption onto Al-containing ferrihydrites. Implications for arsenic immobilization after neutralization of acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 64, 2-9.

doi:10.1016/j.apgeochem.2015.09.015

Ahmed, S.F.R., Killham, K., and Alexander, I. (2006). Influences of arbuscular fungus *Glomus mosseae* on growth and nutrition of lentil irrigated with arsenic contaminated water. *Plant and Soil*. 283, 33-41. doi: 10.1007/s11104-005-0415-8

Baek, K. Kim, D. H. Park, S. W. Ryu, B. G. Bajargal, T. and Yang, J. S. (2009). Electrolyte conditioning-enhanced electrokinetic remediation of arsenic-contaminated mine tailing. *J Hazard Mater*, 161(1), 457-462. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.127

Bais, H. P. Weir, T. L. Perry, L. G. Gilroy, S. and Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annu Rev Plant Biol*, 57, 233-266. doi:10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159



- Batty, L.C, and Anslow, M. (2008). Effect of a polycyclic aromatic hydrocarbon on the phytoremediation of zinc by two plant species (*Brassica juncea* and *Festuca arundinacea*). *International Journal of Phytoremediation*, 10, 236-251. doi: 10.1080/15226510801997549
- Bi, R. Schlaak, M. Siefert, E. Lord, R. and Connolly, H. (2010). Alternating current electrical field effects on lettuce (*Lactuca sativa*) growing in hydroponic culture with and without cadmium contamination. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(6), 1217-1223. doi:10.1007/s10800-010-0094-x
- Bibi, I., Icenhower, J., Niazi, N. K., Naz, T., Shahid, M., and Bashir, S. (2016). Clay Minerals. *Environmental Materials and Waste* (pp. 543-567).  
[https://epubs.scu.edu.au/geoscience\\_pubs/427/](https://epubs.scu.edu.au/geoscience_pubs/427/)
- Bowell, R. J. Alpers, C. N. Jamieson, H. E. Nordstrom, D. K. and Majzlan, J. (2014). The Environmental Geochemistry of Arsenic -- An Overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79(1), 1-16. doi:10.2138/rmg.2014.79.1
- Brown, S. L. Angle, J. S. Chaney, R. L. and Baker, A. J. M. (1995). Zinc and Cadmium Uptake by Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* Grown in Nutrient Solution. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1).  
doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900010020x
- Brunken, J.N. (1997). A systematic study of *Pennisetum* Sect. *Pennisetu* (Gramineae). *American Journal of Botany*, 64, 161-176. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb15715.x>
- Cameselle, C. Chirakkara, R. A. and Reddy, K. R. (2013). Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: status and opportunities. *Chemosphere*, 93(4), 626-636. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.06.029
- Cameselle, C. Gouveia, S. Eddine, D. and Belhadj, B. (2013). Advances in Electrokinetic Remediation for the Removal of Organic Contaminants in Soils. *Organic Pollutants - Monitoring, Risk and Treatment*. doi:10.5772/54334
- Cameselle, C. Gouveia, S. and Urrejola, S. (2019). Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, 229, 481-488. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.04.222

- Cang, L. Wang, Q. Y. Zhou, D. M. and Xu, H. (2011). Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard. *Separation and Purification Technology*, 79(2), 246-253. doi:10.1016/j.seppur.2011.02.016
- Cang, L. Zhou, D.-M. Wang, Q.-Y. and Fan, G.-P. (2012). Impact of electrokinetic-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil on its physicochemical properties, enzymatic and microbial activities. *Electrochimica Acta*, 86, 41-48. doi:10.1016/j.electacta.2012.04.112
- Carvalhais, L. C. Dennis, P. G. Fedoseyenko, D. Hajirezaei, M.-R. Borriss, R. and von Wirén, N. (2011). Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(1), 3-11. doi:10.1002/jpln.201000085
- Casagrande, L. (1952). Electro-osmotic stabilization of soils. *Journal of Boston Society of Civil Engineers* 39, 51-83. [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80037-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80037-0)
- Changul, C. Sutthirat, C. Padmanahban, G. and Tongcumpou, C. (2009). Chemical characteristics and acid drainage assessment of mine tailings from Akara Gold mine in Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 60(8), 1583-1595. doi:10.1007/s12665-009-0293-0
- Cheema, S. A. Imran Khan, M. Shen, C. Tang, X. Farooq, M. Chen, L., et al. (2010). Degradation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by single and combined plants cultivation. *J Hazard Mater*, 177(1-3), 384-389. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.12.044
- Chirakkara, R. A. Reddy, K. R. and Cameselle, C. (2015). Electrokinetic Amendment in Phytoremediation of Mixed Contaminated Soil. *Electrochimica Acta*, 181, 179-191. doi:10.1016/j.electacta.2015.01.025
- Foucault, Y. Leveque, T. Xiong, T. Schreck, E. Austruy, A. Shahid, M., et al. (2013). Green manure plants for remediation of soils polluted by metals and metalloids: ecotoxicity and human bioavailability assessment. *Chemosphere*, 93(7), 1430-1435. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.07.040

- Gerhardt, K. E. Huang, X.-D. Glick, B. R. and Greenberg, B. M. (2009). Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant Science*, 176(1), 20-30. doi:10.1016/j.plantsci.2008.09.014
- Gonzaga, M. I. Ma, L. Q. Pacheco, E. P. and dos Santos, W. M. (2012). Predicting arsenic bioavailability to hyperaccumulator *Pteris vittata* in arsenic-contaminated soils. *Int J Phytoremediation*, 14(10), 939-949. doi:10.1080/15226514.2011.636404
- Han, F.X., Kingery, W.L., Selim, H.M., Gerard, P.D., Cox, M.S., & Oldham, J.L. (2004) Arsenic solubility and distribution in poultry waste and long-term amended soil. *Sci. Total Environ.* 320:51–61. doi: 10.1016/S0048-9697(03)00441-8
- Hoffmann, W.A., Poorter, H. (2002). Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate. *Annals of Botany*. 90(1), 37- 42. doi: 10.1093/aob/mcf140
- Isosaari, P. and Sillanpää, M. (2012). Effects of oxalate and phosphate on electrokinetic removal of arsenic from mine tailings. *Separation and Purification Technology*, 86, 26-34. doi:10.1016/j.seppur.2011.10.016
- Jeon, E.-K. Ryu, S.-R. and Baek, K. (2015). Application of solar-cells in the electrokinetic remediation of As-contaminated soil. *Electrochimica Acta*, 181, 160-166. doi:10.1016/j.electacta.2015.03.065
- Jeon, E. K. Jung, J. M. Kim, W. S. Ko, S. H. and Baek, K. (2015). In situ electrokinetic remediation of As-, Cu-, and Pb-contaminated paddy soil using hexagonal electrode configuration: a full scale study. *Environ Sci Pollut Res Int*, 22(1), 711-720. doi:10.1007/s11356-014-3363-0
- Joao, P. Pratas, J. Varun, M. Dsouza, R. and S, M. (2014). Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora. In *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*.
- Khalid, S., et al. (2016). Arsenic Behaviour in Soil-Plant System: Biogeochemical Reactions and Chemical Speciation Influences. In N.A. Anjum; S.S. Gill; and N. Tuteja (eds.), *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants*, pp.97-140. Cham : Springer. doi: 10.1007/978-3-319-55423-5\_4
- Kim, D.-H. Jo, S.-U. Choi, J.-H. Yang, J.-S. and Baek, K. (2012). Hexagonal two dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study. *Chemical Engineering Journal*, 198-199, 110-121. doi:10.1016/j.cej.2012.05.076

- Kim, W. S. Jeon, E. K. Jung, J. M. Jung, H. B. Ko, S. H. Seo, C. I., et al. (2014). Field application of electrokinetic remediation for multi-metal contaminated paddy soil using two-dimensional electrode configuration. *Environ Sci Pollut Res Int*, 21(6), 4482-4491. doi:10.1007/s11356-013-2424-0
- Kumarathilaka, P. Seneweera, S. Meharg, A. and Bundschuh, J. (2018). Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: sources, physico-chemical, and biological factors - A review. *Water Res*, 140, 403-414. doi:10.1016/j.watres.2018.04.034
- Lageman, R. Clarke, R. L. and Pool, W. (2005). Electro-reclamation, a versatile soil remediation solution. *Engineering Geology*, 77(3-4), 191-201. doi:10.1016/j.enggeo.2004.07.010
- LeBlanc, M. S. McKinney, E. C.
- Meagher, R. B. and Smith, A. P. (2013). Hijacking membrane transporters for arsenic phytoextraction. *J Biotechnol*, 163(1), 1-9. doi:10.1016/j.jbiotec.2012.10.013
- Lee, S. H. Lee, W. S. Lee, C. H. and Kim, J. G. (2008). Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. *J Hazard Mater*, 153(1-2), 892-898. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.041
- LeFevre, G. H. Hozalski, R. M. and Novak, P. J. (2013). Root exudate enhanced contaminant desorption: an abiotic contribution to the rhizosphere effect. *Environ Sci Technol*, 47(20), 11545-11553. doi:10.1021/es402446v
- Lopez-Vizcaino, R. Risco, C. Isidro, J. Rodrigo, S. Saez, C. Canizares, P., et al. (2017). Scale-up of the electrokinetic fence technology for the removal of pesticides. Part I: Some notes about the transport of inorganic species. *Chemosphere*, 166, 540-548. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.09.113
- Mandal, B.K., and Suzuki, K.T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta* 58 : 201-235. doi: 10.1016/S0039-9140(02)00268-0
- Mannetje, L. (1992). *Pennisetum purpureum* Schumach. *Plant Resources of South-East Asia No. 4. Forages*. pp. 191-192. Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, the Netherlands.  
[https://www.researchgate.net/publication/277666950\\_Elephantgrass](https://www.researchgate.net/publication/277666950_Elephantgrass)

- Mao, X. Han, F. X. Shao, X. Guo, K. McComb, J. Arslan, Z., et al. (2016). Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil. *Ecotoxicol Environ Saf*, 125, 16-24. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.11.021
- Merkel, N. Schultze-Kraft, R. and Arias, M. (2005). Influence of fertilizer levels on phytoremediation of crude oil-contaminated soils with the tropical pasture grass *Brachiaria brizantha* (hochst. ex a. rich.) stapf. *Int J Phytoremediation*, 7(3), 217-230. doi:10.1080/16226510500215662
- Mitani-Ueno, N. Yamaji, N. Zhao, F. J. and Ma, J. F. (2011). The aromatic/arginine selectivity filter of NIP aquaporins plays a critical role in substrate selectivity for silicon, boron, and arsenic. *J Exp Bot*, 62(12), 4391-4398. doi:10.1093/jxb/err158
- Moreno-Jimenez, E. Clemente, R. Mestrot, A. and Meharg, A. A. (2013). Arsenic and selenium mobilisation from organic matter treated mine spoil with and without inorganic fertilisation. *Environ Pollut*, 173, 238-244. doi:10.1016/j.envpol.2012.10.017
- Morikawa, H., and Erkin, O.C. (2003). Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. *Chemosphere*, 52, 1553-1558. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00495-8
- Newman, L.A., and Reynolds, C.M. (2004). Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*, 15, 225-230. doi: 10.1016/j.copbio.2004.04.006
- Paktunc, D. (2013). Mobilization of arsenic from mine tailings through reductive dissolution of goethite influenced by organic cover. *Applied Geochemistry*, 36, 49-56. doi:10.1016/j.apgeochem.2013.05.012
- Pamukcu, S., and Huang, C.P. (2001). In situ remediation of contaminated soils by electrokinetic processes. In 'Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook'. CRC Press: Florida. doi: 10.1016/S0048-9697(01)01027-0
- Paz-Garcia, J. M. Baek, K. Alshawabkeh, I. D. and Alshawabkeh, A. N. (2012). A generalized model for transport of contaminants in soil by electric fields. *J*

- Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 47(2), 308-318.  
doi:10.1080/10934529.2012.640911
- Peng, C. Almeida, J. O. and Gu, Q. (2012). Effect of electrode configuration on pH distribution and heavy metal ions migration during soil electrokinetic remediation. *Environmental Earth Sciences*, 69(1), 257-265. doi:10.1007/s12665-012-1953-z
- Perelo, L. W. (2010). Review: In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *J Hazard Mater*, 177(1-3), 81-89. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.12.090
- Putra, R. S. Ohkawa, Y. and Tanaka, S. (2013). Application of EAPR system on the removal of lead from sandy soil and uptake by Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.). *Separation and Purification Technology*, 102, 34-42.  
doi:10.1016/j.seppur.2012.09.025
- Rafiq, M., Shahid, M., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Niazi, N. K., and Dumat, C. (2017). Comparative effect of calcium and EDTA on arsenic uptake and physiological attributes of *Pisum sativum*. *Int J Phytoremediation*, 19(7), 662-669.  
doi: 10.1080/15226514.2016.1278426
- Reddy, K. R. Darko-Kagya, K. and Al-Hamdan, A. Z. (2011). Electrokinetic Remediation of Chlorinated Aromatic and Nitroaromatic Organic Contaminants in Clay Soil. *Environmental Engineering Science*, 28(6), 405-413. doi:10.1089/ees.2010.0235
- Risco, C. Rodrigo, S. López-Vizcaíno, R. Yustres, A. Sáez, C. Cañizares, P., et al. (2015). Electrochemically assisted fences for the electroremediation of soils polluted with 2,4-D: A case study in a pilot plant. *Separation and Purification Technology*, 156, 234-241. doi:10.1016/j.seppur.2015.10.006
- Risco, C. Rodrigo, S. López Vizcaíno, R. Yustres, A. Saez, C. Cañizares, P., et al. (2016). Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic soil flushing with linear rows of electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 294, 65-72.  
doi:10.1016/j.cej.2016.02.112
- Rosas-Castor, J. M. Guzman-Mar, J. L. Hernandez-Ramirez, A. Garza-Gonzalez, M. T. and Hinojosa-Reyes, L. (2014). Arsenic accumulation in maize crop (*Zea mays*): a review. *Sci Total Environ*, 488-489, 176-187. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.04.075

- Ryu, B.-G. Yang, J.-S. Kim, D.-H. and Baek, K. (2009). Pulsed electrokinetic removal of Cd and Zn from fine-grained soil. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(6), 1039-1047. doi:10.1007/s10800-009-0046-5
- Sakakibara, M., Watanabe, A., Inoue, M., Sano, S., and Kaise, T. (2010). Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from arsenic-contaminated soils By *Pteris vittata*. In Proceedings of the annual International conference on soils, sediments, water and energy, 12(26), 267-272.  
<https://www.researchgate.net/publication/267220249>
- Sampanpanish, P. and Suwattiga, P. (2017). Removal of arsenic and manganese from the tailing storage facility of a gold mine using *Vetiveria zizanioides*, *Bambusa bambos* and *Pennisetum purpureum*. *Soil & Environment*, 36(2), 114-119. doi:10.25252/se/17/51183
- Sanchez, V. Lopez-Bellido, F. J. Canizares, P. and Rodriguez, L. (2018). Can electrochemistry enhance the removal of organic pollutants by phytoremediation? *J Environ Manage*, 225, 280-287. doi:10.1016/j.jenvman.2018.07.086
- Sánchez, V. López-Bellido, F. J. Rodrigo, M. A. and Rodríguez, L. (2019). Electrokinetic-assisted phytoremediation of atrazine: Differences between electrode and interelectrode soil sections. *Separation and Purification Technology*, 211, 19-27. doi:10.1016/j.seppur.2018.09.064
- Senneset, K.G., and Strout, J.M. (1998). Applicability of electrokinetic remediation to Norwegian soils: a model study. In 'Contaminated and derelict land: the proceedings of GREEN 2: the second international symposium on geotechnics related to the environment held in Krakow, Poland. Thomas Telford: London  
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/g2cadl.26339.0045>
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., and Dumat, C. (2015). Heavy Metal Stress and Crop Productivity. In *Crop Production and Global Environmental Issues* (pp. 1-25).  
[https://www.researchgate.net/publication/286922829\\_Heavy\\_metal\\_stress\\_and\\_crop\\_productivity](https://www.researchgate.net/publication/286922829_Heavy_metal_stress_and_crop_productivity)

- Shakoor, M. B. Niazi, N. K. Bibi, I. Murtaza, G. Kunhikrishnan, A. Seshadri, B., et al. (2015). Remediation of arsenic-contaminated water using agricultural wastes as biosorbents. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(5), 467-499. doi:10.1080/10643389.2015.1109910
- Sharma, H. D., and Reddy, K. R. (2004). Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies. Wiley, Hoboken, N.J.  
<https://www.researchgate.net/publication/265686654>
- Sharma, V. K. and Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environ Int*, 35(4), 743-759. doi:10.1016/j.envint.2009.01.005
- Sheng-wang, P., Shi-qiang, W., Xin, Y., and Sheng-xian, C. (2008). The removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by mixed cropping of alfalfa and rape. *Agricultural sciences in china*, 7(11), 1355-1364.  
doi: 10.1016/S1671-2927(08)60185-6
- Sheng-Yu, X. Ying-Xu, C., Kuang-Fei, L., Xin-Cai, C., Qi, L., Feng, L., and Zhao-Wei, W. (2005). Removal of pyrene from contaminated soils by white clover. *Pedosphere*, 19(2), 265-272. doi: 10.1016/S1002-0160(09)60117-X
- Shin, S.-Y. Park, S.-M. and Baek, K. (2016). Electrokinetic Removal of As from Soil Washing Residue. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(7). doi:10.1007/s11270-016-2918-8
- Signes-Pastor, A. Burló, F. Mitra, K. and Carbonell-Barrachina, A. A. (2007). Arsenic biogeochemistry as affected by phosphorus fertilizer addition, redox potential and pH in a west Bengal (India) soil. *Geoderma*, 137(3-4), 504-510.  
doi:10.1016/j.geoderma.2006.10.012
- Smedley, P.L., and Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17 : 517-568.  
doi: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5
- Sollenberger, L.E., Prine, G.M., Ocumpaugh, W.R., Hanna, W.W., Jones, C.S., Schank JR., S. C., and Kalmbacher, R.S. (1989). Registration of Mott Dwarf Elephant Grass. *Crop Science*, 29, 827-828. doi: 10.14334/wartazoa.v27i4.1569



- Susarla, S. Medina, V. F. and McCutcheon, S. C. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, 18(5), 647-658. doi:10.1016/s0925-8574(02)00026-5
- Tahmasbian, I., and Safari Sinegani, A.A. (2015). Improving the efficiency of phytoremediation using electrically charged plant and chelating agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 2479-2486. doi: 10.1007/s11356-015-5467-6
- Tang, X., Li, Q., Wang, Z., Hu, Y., Hu, Y., and Li, R. (2018). In situ electrokinetic isolation of cadmium from paddy soil through pore water drainage: Effects of voltage gradient and soil moisture. *Chemical Engineering Journal*, 337, 210- 219. doi: 10.1016/j.cej.2017.12.111
- Thangavel, P., & Subbhuraam C.V. (2004). Phytoextraction: role of hyperaccumulators in metal contaminated soils. *Sci Acad*, 70(1), 109-130.  
<https://www.researchgate.net/publication/284396760>
- USEPA. (1996). *Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. Method. 3052*. Washington D. C., USA.  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf>
- USEPA. (2007a). *Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils. method. 3051A*. Washington D. C., USA.  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf>
- USEPA. (2007b). *Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extract. Method. 3015A*. Washington D. C., USA.  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3015a.pdf>
- Vassilev, A. Schwitzguebel, J. P. Thewys, T. Van Der Lelie, D. and Vangronsveld, J. (2004). The use of plants for remediation of metal-contaminated soils. *ScientificWorldJournal*, 4, 9-34. doi:10.1100/tsw.2004.2
- Virkutyte, J., Sillanpaa, M., Latostenmaa, P. (2002). Electrokinetic soil remediation-critical overview. *The Science of the Total Environment*, 289, 97-121.

- Wang, A. S. Angle, J. S. Chaney, R. L. Delorme, T. A. and Reeves, R. D. (2006). Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 281(1-2), 325-337. doi:10.1007/s11104-005-4642-9
- Wang, S. and Mulligan, C. N. (2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: sources, behavior and distribution. *Sci Total Environ*, 366(2-3), 701-721. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.005
- Xu, J. Y. Han, Y. H. Chen, Y. Zhu, L. J. and Ma, L. Q. (2016). Arsenic transformation and plant growth promotion characteristics of As-resistant endophytic bacteria from As-hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Chemosphere*, 144, 1233-1240. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.09.102
- Xu, S. Y. Chen, Y. X. Wu, W. X. Wang, K. X. Lin, Q. and Liang, X. Q. (2006). Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. *Sci Total Environ*, 363(1-3), 206-215. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.05.030
- Yang, J. S. Lee, J. Y. Baek, K. Kwon, T. S. and Choi, J. (2009). Extraction behavior of As, Pb, and Zn from mine tailings with acid and base solutions. *J Hazard Mater*, 171(1-3), 443-451. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.021
- Zhao, F. J. Ma, J. F. Meharg, A. A. and McGrath, S. P. (2009). Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytol*, 181(4), 777-794. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02716.x



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย
วัน เดือน ปี เกิด	2 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
วุฒิการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์ทางทะเล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	332 ถ.พหลโยธิน ต.ตาคลี อ.ตาคลี จ.นครสวรรค์ 60140
ผลงานตีพิมพ์	<p>1) ผลงานตีพิมพ์ในวารสารสิ่งแวดล้อม</p> <p>1.1) กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย, พันธวิศ สัมพันธ์. 2562. การประยุกต์ใช้ จลนศาสตร์ไฟฟ้าบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก. วารสาร สิ่งแวดล้อม, ปีที่ 23 (ฉบับที่ 4).</p> <p>2) การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ</p> <p>2.1) กฤษฎี วานิชสวัสดิ์วิชัย และพันธวิศ สัมพันธ์พานิช. 2562. ปัจจัยที่มีผล ต่อการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูจากการทำเหมืองแร่ทองคำ ด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติครั้งที่ 18 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์, กรุงเทพมหานคร.</p> <p>3) การฝึกอบรม</p> <p>3.1) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม The ASEAN Workshop on X-ray Fluorescence (AWXRF2018): Application on plants and Agriculture ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์การมหาชน จังหวัด นครราชสีมา ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 19 ถึง 21 พฤศจิกายน 2561</p> <p>3.2) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม The 7th ASEAN Synchrotron Science Camp ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่ 27 ถึง 30 พฤศจิกายน 2561</p> <p>3.3) ฝึกอบรมหลักสูตรความปลอดภัยการทำงานกับสารเคมี สำหรับนิสิตที่ ทำวิจัย และนักวิจัย ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างวันที่ 30 สิงหาคม ถึง 1 กันยายน 2560</p>
รางวัลที่ได้รับ	ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช