

กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ
ด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE TRANSLOCATION AND DISTRIBUTION MECHANISMS OF ARSENIC
IN MOTT DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)
WITH ELECTROKINETICS AND ENHANCING AGENT



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูใน
	หน้าเนเปียร์แคระ ด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่ง
โดย	นายอุดมศักดิ์ บุญมีรติ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฉัพพรรณรัตน์)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมย์ม)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมชาย ตันชรากรณ์)	

อุดมศักดิ์ บุญมีรติ : กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า และสารช่วยเร่ง. (THE TRANSLOCATION AND DISTRIBUTION MECHANISMS OF ARSENIC IN MOTT DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) WITH ELECTROKINETICS AND ENHANCING AGENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. พันธวีร์ สัมพันธ์พานิช

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาปริมาณการดูดตั้งและสะสม และกลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในภาคโลหกรรมจากเหมืองแร่ทองคำที่ปนเปื้อนสารหนู ร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน และการเติมสารช่วยเร่ง 2 ชนิด คือ สารฟอสเฟต และสารอีทีเอ โดยทำการศึกษากลของระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตที่ 0.7, 1.4 และ 2.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีทีเอที่ 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ต่อปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนู และการเจริญเติบโตของพืช โดยทำการเก็บตัวอย่างภาคโลหกรรมและพืช (ส่วนใต้ภาคโลหกรรม-ราก และส่วนเหนือภาคโลหกรรม-ลำต้นและใบ) ทุก 15 วัน เป็นระยะเวลา 60 วัน จากผลการศึกษาพบว่า การเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือภาคโลหกรรมเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.62 และ 2.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารช่วยเร่งคิดเป็น 2 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่การเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีทีเอที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ไม่ส่งผลให้ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระแสดงความเป็นพิษเพิ่มขึ้น โดยจากผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในภาคโลหกรรมบริเวณข้อแอนโดนซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation Based Bulk-XANES (SR-Bulk-XANES) พบว่า การเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ทำให้สารหนูเกิดการออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซนเนตได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น โดยมีค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (E_0) และค่าพลังงานที่ White Line สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 11,866.10 และ 11,873.55 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระด้วยเทคนิค Synchrotron Based Micro-XRF Imaging (SR- μ -XRF Imaging) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้สารหนูและเหล็กเกิดการสะสมและการกระจายตัวส่วนใหญ่ที่บริเวณขรอกและเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส ในขณะที่ธาตุอื่นๆ จะเกิดการกระจายตัวเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นในได้มากกว่า และพบการสะสมและการกระจายตัวของสารหนูที่บริเวณบันเดิลชีทที่เรียงตัวอยู่โดยรอบมัดท่อท่อลำเลียงในส่วนของลำต้นและบริเวณเส้นกลางใบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนย้ายของสารหนูจากส่วนรากขึ้นสู่ลำต้นและใบของหญ้าเนเปียร์แคระผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ นอกจากนี้สารหนูยังเกิดการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิสที่ผิวใบด้านล่างได้มากกว่าที่ผิวใบด้านบน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการสะสมของโพแทสเซียม จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์แคระสามารถเคลื่อนย้ายสารหนูจากรากขึ้นสู่ใบผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ และมีความเป็นไปได้ที่หญ้าเนเปียร์แคระจะใช้โพแทสเซียมไอออนในการสร้างสมดุลไอออนที่เกิดจากการสะสมสารหนูที่บริเวณใบ และอาจจะเกิดการขับสารหนูออกทางต่อมคายน้ำที่อยู่บริเวณปลายของเส้นใบด้วยการคายน้ำในรูปของหยดน้ำ

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2564	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6087811720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: ARSENIC, MINE TAILING, MOTT DWARF NAPIER GRASS, ELECTROKINETICS, PHOSPHATE, EDTA

Udomsak Boonmeerati : THE TRANSLOCATION AND DISTRIBUTION MECHANISMS OF ARSENIC IN MOTT DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) WITH ELECTROKINETICS AND ENHANCING AGENT. Advisor: Assoc. Prof. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D.

The main objective of this study is to evaluate arsenic (As) uptake, as well as As translocation and distribution mechanisms of dwarf Napier grass that has grown in As-contaminated gold mine tailings, with a constant direct current (DC) electric field of 1 V/cm applied for 3 hours per day and enhancing agents added (phosphate and EDTA). The effects of phosphate (PO_4^{3-}) levels of 0.7, 1.4, and 2.8 mmol/kg, and EDTA levels of 2.5, 5, and 10 mmol/kg, on As uptake and plant growth of dwarf Napier grass, were evaluated. For a 60-day experiment, samples of tailings and plants (underground part - root and aboveground part - stem and leaf) were collected every 15 days. At the end of the experiment, the addition of PO_4^{3-} at a level of 1.4 mmol/kg and EDTA at a level of 2.5 mmol/kg resulted in the highest As concentration in the aboveground part of dwarf Napier grass, with 2.62 and 2.27 mg/kg, respectively. There were 2- and 1.7- fold higher, respectively, than the control treatment, which was conducted without the application of electric field and the addition of enhancing agent. While adding the optimal level of PO_4^{3-} and EDTA mixtures at a 1:1 volume ratio did not result in an increase in As uptake, it actually showed increased phytotoxicity. The chemical speciation of As in the tailing sample at the anode region, where dwarf Napier grass was planted, was analyzed by synchrotron radiation-based bulk-XANES (SR-Bulk-XANES). In comparison to the other treatments, the addition of PO_4^{3-} at 1.4 mmol/kg tended to promote As oxidation the most, resulting in a higher increase in arsenate, which had the highest energy of the absorption edge (E_0) and white line at 11,866.10 and 11,873.55 eV, respectively. Synchrotron radiation-based micro-XRF imaging (SR-XRF Imaging) was used to examine the accumulation and distribution of As in dwarf Napier grass treated with PO_4^{3-} at 1.4 mmol/kg. According to the results, As and Fe accumulated mainly in the root hairs and epidermis, whereas other elements were able to translocate and accumulate in the inner tissue. In addition, As was also detected in the bundle sheet, which is located surrounding the vascular bundle of the stem and midrib. This indicated that As was translocated from roots to stems and leaves via the xylem. Furthermore, it was shown that As accumulated more in the abaxial epidermis of the midrib than in the adaxial epidermis, which corresponded to K accumulation. Therefore, it can be concluded that the application of a constant DC electric field of 1 V/cm with the addition of phosphate at 1.4 mmol/kg caused dwarf Napier grass to translocate As from roots to leaves via xylem. Furthermore, dwarf Napier grass is likely to use K^+ as a counterbalancing cation to As accumulation in the leaves, with As possibly being extruded by guttation through the hydathodes at the vein tips.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา แก้ไขปรับปรุง ข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ รวมทั้งมอบโอกาสในการทำงานหลากหลายด้าน ผู้เขียนตระหนักถึงคุณค่าของ ประสบการณ์ที่ได้รับต่อการดำรงตนในอาชีพการงานอย่างมั่นคง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายังเป็นในการเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สมชาย ต้นชรากรณ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นการให้คำแนะนำและ ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ตลอดจนการติดต่อประสานงานในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ณ ประเทศไต้หวัน

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ก่อนพันธุ์ หนูแอเนเปียร์แคระ ขอขอบพระคุณ ดร.ชาตรี ไสยสมบัติ และทีมงานที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ ตัวอย่าง ณ ระบบลำแสง 1.1W สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา และ ขอขอบพระคุณ Dr. Mau-Tsu Tang และทีมงานที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ณ ระบบ ลำแสง 23A, National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับดุษฎีบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช ทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยด้านการจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ สำนักงานคณะกรรมการการ อุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) ทุนสนับสนุน หน่วยปฏิบัติการวิจัยด้านการจัดการเหมืองสีเขียว กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน วิจัยภายใต้โครงการ Lightsources for Africa, the Americas, Asia and Middle East Project (LAAAMP) และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง

อนึ่ง ผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบคุณค่าทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ให้แก่ เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบ ความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดามารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อุดมศักดิ์ บุญมีรติ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 สารหนู.....	7
2.1.1 สมบัติทั่วไปของสารหนู.....	7
2.1.2 รูปทางเคมีของสารหนู	8
2.1.3 ความเป็นพิษของสารหนูต่อสิ่งมีชีวิต	12
2.1.4 แหล่งกำเนิดของสารหนู.....	18
2.1.5 กากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนู.....	22

2.2 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช.....	25
2.2.1 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช.....	27
2.2.2 คุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช.....	31
2.2.3 ข้อจำกัดของการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช	32
2.2.4 กลไกการดูดซับโลหะหนักของพืช.....	32
2.2.5 การดูดซับและสะสม และการเคลื่อนย้ายสารหนูในพืช	34
2.3 การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า.....	38
2.3.1 กลไกการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า.....	38
2.3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า.....	41
2.4 แสงซินโครตรอน	42
2.4.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงสยาม.....	43
2.4.2 การใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของโลหะหนัก	44
2.4.3 การใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืช	46
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	49
2.5.1 การแพร่กระจายและการปนเปื้อนของสารหนูจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ... ..	49
2.5.2 การบำบัดกากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยพืช	51
2.5.3 การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชร่วมกับจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า.....	55
2.5.4 การเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในเนื้อเยื่อพืช.....	60
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	64
3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย	64
3.2 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย.....	64
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	64
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	65

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่าง	65
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	66
3.3.1 การเตรียมกากโลหะกรรม.....	66
3.3.2 การเตรียมต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ.....	67
3.3.3 การศึกษาการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นปนเปื้อนสารหนู.....	68
3.3.4 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรม.....	70
3.3.5 การศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงต่อการกร่อนและการปลดปล่อยเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L.....	71
3.3.6 การทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	71
3.3.7 การทดลองการเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า	73
3.3.8 การศึกษาการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกระตุ้นด้วยจุลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง.....	73
3.3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	73
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	75
4.1 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น.....	75
4.1.1 ผลของขนาดสนามไฟฟ้า ชนิดของขั้วแอโนด และรูปแบบของภาชนะทดลองต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น	75
4.1.2 ผลของระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น ..	81
4.2 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรม.....	87
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากโลหะกรรม.....	87
4.2.2 ผลของสารช่วยเร่งต่อสมบัติของกากโลหะกรรมภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า	89
4.2.3 ผลของสารช่วยเร่งต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูของกากโลหะกรรมภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	99

4.3 ผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสและการ ปลดปล่อยเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล.....	104
4.4 ผลของการเติมสารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วย หญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	106
4.4.1 สมบัติของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง.....	107
4.4.2 ผลของสารช่วยเร่งต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าและปริมาณความชื้นของ กากโลหะกรรม.....	109
4.4.3 ผลของสารช่วยเร่งต่อสมบัติของกากโลหะกรรม	111
4.4.4 ผลของสารช่วยเร่งต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรม	122
4.4.5 ผลของสารช่วยเร่งต่อมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ.....	124
4.4.6 ผลของสารช่วยเร่งต่อการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะ.....	127
4.4.7 ผลของสารช่วยเร่งต่อปัจจัยการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะ	134
4.4.8 ผลของสารช่วยเร่งต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate, RGR) ของหญ้าเนเปียร์แคะ	137
4.4.9 ผลของสารช่วยเร่งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคะ.....	139
4.5 ผลของการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนใน กากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า.....	141
4.5.1 ผลของสารผสมต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าและปริมาณความชื้นของ กากโลหะกรรม.....	141
4.5.2 ผลของสารผสมต่อสมบัติของกากโลหะกรรม.....	143
4.5.3 ผลของสารผสมต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรม	150
4.5.4 ผลของสารผสมต่อมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ	152
4.5.5 ผลของสารผสมต่อการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะ	154
4.5.6 ผลของสารผสมต่อปัจจัยการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะ	158
4.5.7 ผลของสารผสมต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate, RGR) ของ หญ้าเนเปียร์แคะ.....	160

4.5.8 ผลของสารผสมต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระ	162
4.6 ผลการวิเคราะห์หลักไคการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ .	164
4.6.1 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในกากโลหกรรม	164
4.6.2 การเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ	168
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	178
5.1 สรุปผลการทดลอง	178
5.1.1 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวัน	178
5.1.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรม	179
5.1.3 การทดลองการเติมสารช่วยเร่งในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมด้วย หญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลนาศาสตร์ไฟฟ้า	180
5.1.4 การศึกษาการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกระตุ้น ด้วยจุลนาศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง	181
5.2 ข้อเสนอแนะ	182
บรรณานุกรม	183
ภาคผนวก	203
ภาคผนวก ก สถานที่ดำเนินการทดลอง	204
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางสถิติ	205
ภาคผนวก ค รูปถ่ายหญ้าเนเปียร์แคระ	283
ประวัติผู้เขียน	287

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักและค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน.....	16
ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะหนักและค่ามาตรฐานคุณภาพดิน	17
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ	20
ตารางที่ 2.4 สัดส่วนรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรมจากเหมืองแร่โลหะมี ค่าที่ตั้งอยู่ในแต่ละประเทศ.....	25
ตารางที่ 2.5 ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักและชนิดของพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและ สะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก	30
ตารางที่ 3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากโลหกรรม	67
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสงที่ใช้ในการทดลอง	74
ตารางที่ 4.1 ความเข้มของกระแสไฟฟ้า ระดับความเข้มข้นสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนด (S5) และ สัดส่วนปริมาณสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนด (S5) ในแต่ละชุดการทดลองของตัวกลางวันเมื่อสิ้นสุดการ ทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง	79
ตารางที่ 4.2 ระดับความเข้มข้นสารหนูบริเวณขั้วแอโนด (S5) และสัดส่วนปริมาณสารหนูบริเวณ ขั้วแอโนด (S5) ในแต่ละชุดการทดลองของตัวกลางวันที่ทำการเติมสารฟอสเฟต สารอีดีทีเอ และสาร ผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง	83
ตารางที่ 4.3 สมบัติของกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนู.....	88
ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่าง ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด).....	91
ตารางที่ 4.5 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่าง ขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด)	92
ตารางที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด).....	97

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสและการปลดปล่อยเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร..... 105

ตารางที่ 4.8 สมบัติของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีทีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์และร่วมกับบัจลอนศาสตร์ไฟฟ้า..... 108

ตารางที่ 4.9 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน 112

ตารางที่ 4.10 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน..... 113

ตารางที่ 4.11 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน 119

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน 144

ตารางที่ 4.13 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน..... 145

ตารางที่ 4.14 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน 149

ตารางที่ 4.15 ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (E_0) และค่าพลังงานที่ยอดสูง (White Line) ของสารอ้างอิงและตัวอย่างกากโลหะกรรม 166

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตวิจัย	6
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลต่อการเปลี่ยนแปลง รูปทางเคมีของสารหนูที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ	9
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสารหนูอนินทรีย์และสารหนูอินทรีย์	11
รูปที่ 2.3 อาการเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic Effect) ที่เกิดจากการได้รับสารหนูอย่างต่อเนื่องเป็น เวลานาน; (ก) ภาวะสีผิวดำ (Melanosis) (ข) ภาวะ Hyperpigmentation (ค) ภาวะ Hypopigmentation (Leukoderma หรือ Leukomelanosis) (ง) ภาวะ Hyperkeratosis ระดับต่ำ (จ) ภาวะ Hyperkeratosis ระดับรุนแรง และ (ฉ) ภาวะ Bowen's Disease	13
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลึกแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ	21
รูปที่ 2.5 การปนเปื้อนสารหนูในแหล่งน้ำใต้ดิน (Arsenic-affected aquifers) ที่เกี่ยวข้องกับ กิจกรรมการทำเหมืองแร่ (Arsenic related to mining operations) และแหล่งน้ำร้อนใต้พิภพ (Geothermal waters) โดยพื้นที่สีฟ้าแสดงถึงแหล่งน้ำผิวดิน	22
รูปที่ 2.6 การฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองโดย (ก) การพัฒนาสภาพพื้นที่ให้เหมือนเดิม (ข) การ ปรับปรุงสภาพพื้นที่ให้ดีขึ้น และ (ค) การเปลี่ยนสภาพพื้นที่เพื่อการใช้ประโยชน์แบบใหม่	26
รูปที่ 2.7 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช; (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกรองสารมลพิษด้วย รากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสาร มลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช	29
รูปที่ 2.8 กลไกการดูดตังน้ำและธาตุอาหารของพืช; (ก) อะโพลลาสติก (ข) ซิมพลาสติก (ค) Coupled Trans-Cellular Pathway (ง) การควบคุมการเคลื่อนที่เข้า-ออกของสารประกอบใน เนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส และ (จ) การขนส่งในท่อลำเลียงน้ำ	34
รูปที่ 2.9 การดูดตัง (Uptake) การขนส่ง (Transport) การเคลื่อนย้าย (Translocation) และการลด ความเป็นพิษ (Detoxification) ของสารหนูผ่านทางท่อลำเลียงน้ำของพืช	37
รูปที่ 2.10 กลไกการเคลื่อนที่แบบอเล็กโทรออสโมซิสและอเล็กโทรไมเกรชัน	40

รูปที่ 2.11 ลักษณะของการสะสมและการจัดเรียงตัวของไอออนแบบ 2 ชั้น (Electric Double Layer) ที่เกิดขึ้นในดิน.....	40
รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยาม; (ก) ปืนอิเล็กตรอน (ข) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (ค) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (ง) วงกักเก็บอิเล็กตรอน และ (จ) ระบบลำเลียงแสง	44
รูปที่ 2.13 การตอบสนองของอะตอมต่อรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ.....	47
รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอะตอมที่แสดงถึงบริเวณใกล้ขอบการดูดกลืนรังสี (Pre-edge) ขอบการดูดกลืนรังสี (Absorption Edge) และโครงสร้าง XANES และ EXAFS.....	47
รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของสารหนู (As) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ในใบย่อยของกูดหมาก (<i>Pteris vittata</i> L.) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging.....	48
รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของสารหนูที่ระยะต่างๆ จากปลายรากของกูดหมาก (<i>Pteris vittata</i> L.) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging	48
รูปที่ 3.1 การเตรียมกากโลหะกรรม; (ก) บ่อกักเก็บกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก และ (ข) การคลุกผสมตัวอย่างกากโลหะกรรม	68
รูปที่ 3.2 การเตรียมพืชทดลอง; (ก) ท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ (ข) ต้นกล้าหญ้าเนเปียร์แคระอายุ 3 สัปดาห์ และ (ค) ต้นกล้าหญ้าเนเปียร์แคระอายุ 6 สัปดาห์.....	68
รูปที่ 3.3 ภาพด้านข้างของภาชนะทดลองพลาสติก การแบ่งชั้นของวุ้น และการติดตั้งขั้วไฟฟ้า แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร แบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม; (ก) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ค) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม และภาพด้านบนแสดงการแบ่งพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างตัวกลางวุ้นออกเป็น 9 ส่วน (S1 - S9) ใน (ข) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ง) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม.....	70
รูปที่ 3.4 ขนาดของกระถางทดลองพลาสติก ตำแหน่งการปลูกต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ และ การติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ด้วยขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร	72
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูที่ทำการทดลองใน (ก) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ข) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม	76

รูปที่ 4.2 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวันในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ทำการเติม (ก) สารฟอสเฟต และ (ข) สารอิตีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	82
รูปที่ 4.3 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวันในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ทำการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สารอิตีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอิตีทีเอ.....	86
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ข) ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล และ (ค) ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทดของ 1) ชุดการทดลองควบคุม 2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต 3) ชุดการทดลองสารอิตีทีเอ และ 4) ชุดการทดลองสารผสม ที่ระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	90
รูปที่ 4.5 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมเริ่มต้น บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทดของ 1) ชุดการทดลองควบคุม 2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต 3) ชุดการทดลองสารอิตีทีเอ และ 4) ชุดการทดลองสารผสม ที่ระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน ...	100
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) การกร่อนของขั้วแอโนด และ (ข) ปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	110
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง C1, C2, P1, P2, P3 และ E1 ตามระยะเวลาของการทดลองที่เปลี่ยนไป.....	115
รูปที่ 4.8 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	123
รูปที่ 4.9 มวลชีวภาพส่วนได้กากโลหะกรรม (ราก) และส่วนเนื้อกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	125
รูปที่ 4.10 ปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนูส่วนได้กากโลหะกรรมและส่วนเนื้อกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	128
รูปที่ 4.11 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนได้กากโลหะกรรมและส่วนเนื้อกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	129
รูปที่ 4.12 สัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนได้กากโลหะกรรมและส่วนเนื้อกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	132

รูปที่ 4.13 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (TF) ของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	136
รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	138
รูปที่ 4.15 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน.....	140
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) การกร่อนของชีวแอโนด และ (ข) ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	142
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C2, P2, E1 และ P2-E1 ตามระยะเวลาของการทดลองที่เปลี่ยนไป	147
รูปที่ 4.18 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	151
รูปที่ 4.19 มวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	153
รูปที่ 4.20 ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	155
รูปที่ 4.21 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	156
รูปที่ 4.22 สัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน	157
รูปที่ 4.23 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (TF) ของหลุ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	159

รูปที่ 4.24 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน	161
รูปที่ 4.25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน.....	163
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ใกล้ขอบพลังงานในชั้น K ของสารหนู (As K-Edge XANES Spectra); (ก) สเปกตรัม First Derivative Absorbance และ (ข) สเปกตรัม Normalized Absorbance ของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) อาร์เซเนต (As^{5+}) กากโลหะกรรมเริ่มต้น กากโลหะกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดการทดลอง C1 และกากโลหะกรรมที่บริเวณช่วงแอนโนดเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดการทดลอง C2, P2, E1 และ P2-E1.....	165
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 45 เท่า (45x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสี่ขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging	170
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 45 เท่า (45x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสี่ขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging	171
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 12 เท่า (12x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสี่ขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging	173
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 12 เท่า (12x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนลำต้น (Stem) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสี่ขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging	174

รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (40x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนใบ (Leaf) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging 175

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (40x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนใบ (Leaf) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging 176



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำเหมืองแร่ทองคำเป็นกิจกรรมต้นน้ำที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย อย่างไรก็ตามการทำเหมืองแร่ทุกประเภทมักก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีเคมีของพื้นที่ประกอบการเป็นบริเวณกว้างและนำไปสู่การปนเปื้อนสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การทำเหมืองแร่ยังก่อให้เกิดกากโลหกรรม (Mine Tailing) ที่ปนเปื้อนโลหะหนักและมีการสะสมอยู่เป็นปริมาณมากในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม (Tailing Storage Facility, TSF) ซึ่งมีโอกาสถูกพัดพาโดยลมในรูปของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็ก หรือถูกชะล้างเกิดเป็นน้ำเหมืองที่เป็นกรด (Acid Mine Drainage, AMD) และรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักทั่วบริเวณโดยรอบเหมืองแร่ (Changul et al., 2010; Paktunc, 2013; Yang et al., 2009) โดยเฉพาะสารหนู (Arsenic, As) ซึ่งมักพบปะปนอยู่ในแหล่งแร่ทองคำ นอกจากนี้ยังพบปะปนอยู่ในแร่ทองแดง สังกะสี เงิน และดีบุก (Abad-Valle et al., 2018; Paktunc, 2013) ทั้งนี้มีรายงานว่า การทำเหมืองแร่ทองคำขนาดใหญ่ในประเทศไทยก่อให้เกิดกากโลหกรรมปริมาณมากกว่า 19 ล้านตัน (Changul et al., 2010) โดยมีความเข้มข้นของสารหนูสูงถึง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sampanpanish & Suwattiga, 2017) โดยกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูปริมาณมากเหล่านี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งจำเป็นต้องมีแนวทางในการจัดการ การป้องกัน และการแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

โดยส่วนใหญ่ในธรรมชาติจะพบสารประกอบสารหนูซัลไฟด์ในรูปของอาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) (Khalid et al., 2017; Mandal & Suzuki, 2002) และเมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้สารหนูอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ดี ซึ่งจะถูกดูดซับ (Adsorption) และตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) กับแร่เหล็ก แร่ดินเหนียว และอินทรีย์วัตถุ (Bowell et al., 2014) ทั้งนี้สารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ที่พบได้โดยทั่วไปในดินและกากโลหกรรมถือเป็นแหล่งเก็บกักสารหนูที่สำคัญ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก (Khalid et al., 2017) จึงทำให้สารประกอบเหล่านี้มีความเข้มข้นของสารหนูสูง (Bowell et al., 2014) ซึ่งสอดคล้องกับสารหนูในกากโลหกรรมที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่คงค้างกับของแข็ง (Residual) และรูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn Oxide Bound) (Gabarrón et al., 2018; Isosaari & Sillanpää, 2012; Ko et al., 2008; Wang et al.,

2016; Yang et al., 2009) ซึ่งทำให้สารหนูในกากโลหกรรมมีความสามารถในการละลายได้ (Solubility) และมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ต่ำ

สำหรับวิธีการหรือแนวทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการปัญหาการปนเปื้อนสารหนูได้อย่างยั่งยืน คือ การบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการบำบัดที่มักถูกนำมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนอยู่เป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถดำเนินการได้ในพื้นที่ปนเปื้อน โดยไม่ส่งผลทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง (Ali et al., 2013; Cameselle et al., 2013; Sampanpanish & Suwattiga, 2017; Sarwar et al., 2017) ทั้งนี้พืชที่นำมาใช้จะต้องมีความสามารถในการดูดซับและสะสมโลหะหนักได้ดี เจริญเติบโตเร็ว มีวงจรชีวิตสั้น มีมวลชีวภาพสูง มีระบบรากที่กว้าง ขยายพันธุ์ได้ดี และบำรุงรักษาได้ง่าย (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558a) โดยในปัจจุบันมีรายงานความสามารถของพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูในปริมาณสูง (Arsenic Hyperaccumulator Plants) หลายชนิด เช่น กูดหมาก (*Pteris vittata*) และ เพ็ชรเงิน (*Pityrogramma calomelanos*) (Visoottiviset et al., 2002) รวมทั้งพืชที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มของพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูในปริมาณสูงแต่มีมวลชีวภาพสูง ได้แก่ ผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) (Ko et al., 2008) และ แอลแฟลฟา (*Medicago sativa* L.) (Chen et al., 2015) ปัจจุบันมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ของพืชพลังงานที่เจริญเติบโตได้รวดเร็ว และมีมวลชีวภาพสูงหลายชนิด โดยมีความคาดหวังว่าพืชเหล่านั้นจะสามารถดูดซับและสะสมโลหะหนักแล้วยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของวัสดุชีวภาพในการผลิตพลังงานต่อไปได้ เช่น หญ้าเนเปียร์ยักษ์ลูกผสม (*Pennisetum sinense* Roxb) (Ma et al., 2016) หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.) หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott.) และ ไม้ป่า (*Bambusa bambos* L.) (Sampanpanish & Suwattiga, 2017) อย่างไรก็ตามสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioavailability) ของสารหนูในกากโลหกรรมถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยพืช

นอกจากนี้ยังมีแนวทางเลือกอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้ร่วมเพื่อกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่และมีการดูดซับโลหะหนักไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชได้เพิ่มขึ้น คือ การฟื้นฟูด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetics Remediation, EKR) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการบำบัดสารปนเปื้อนที่ถูกนำมาใช้กับตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Fine-grained Particle) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นวิธีการบำบัดและฟื้นฟูการปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า จัดเป็นวิธีการที่สามารถช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการดูดซับสารหนูในกากโลหกรรมไปใช้ประโยชน์ของพืชได้ด้วยกรให้กระแสไฟฟ้าในระดับที่ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ จึงเป็นการศึกษากลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระโดยการกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับและสะสมสารหนู เพื่อนำไปสู่การป้องกันและแก้ไขปัญหาคากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหาปัจจัยในเรื่องขนาดสนามไฟฟ้า ชนิดขั้วไฟฟ้า และรูปแบบภาชนะทดลองที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น และกากโลหะกรรมด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่ง

1.2.2 เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เหมาะสมต่อการดูดซับและสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับและสะสม การเคลื่อนย้าย และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งในสภาวะที่เหมาะสม

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับสารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอจะทำให้ปริมาณการดูดซับและสะสม การเคลื่อนย้าย และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระเพิ่มขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระในการบำบัดกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำร่วมกับการกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่ง โดยทำการทดลองในโรงเรือนทดลอง ชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถสรุปขอบเขตการศึกษาได้ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยมีรายละเอียดของขอบเขตการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.4.1 หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ได้มาจากการตัดทอนพันธุ์อายุ 90 - 110 วัน ของศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และนำมาขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำแบบท่อนเดียวโดยให้ท่อนพันธุ์มีตาที่ปล้องจำนวนสองตา

1.4.2 กากโลหะกรรมได้มาจากพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก โดยการสุมเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตรจากผิวดิน จาก บ่อกักเก็บกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำ

1.4.3 สารประกอบสารหนูที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนตเฮปตะ ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) และสารช่วยเร่งที่ใช้ในการศึกษา 2 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต (KH_2PO_4) และเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติกแอสิดไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรต ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

1.4.4 การศึกษาในตัวกลางวุ้นที่ปนเปื้อนสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในภาชนะพลาสติก 2 แบบ ได้แก่ ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และแบบทรงสี่เหลี่ยม และให้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) ที่มีขนาดสนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ขั้วแอโนดหรือขั้วบวก 2 ชนิด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (Graphite Electrode) และขั้วไฟฟ้า สแตนเลสเกรด 316L (316L Stainless Steel Electrode)

1.4.5 การศึกษาระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอที่ระดับ 25, 50 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวกลางวุ้นที่ปนเปื้อนสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สภาวะในการทดลองที่ เหมาะสมในข้อที่ 1.4.4 จากนั้นทำการศึกษามลของสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอที่ อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ในสภาวะการทดลองเดียวกัน

1.4.6 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมด้วยการเติมสารช่วยเร่ง ได้แก่ สารฟอสเฟต สารอีดีทีเอ และสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม จากการทดลองในข้อที่ 1.4.5 เป็นเวลา 168 ชั่วโมง

1.4.7 การทดลองความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เหมาะสม โดยทำการทดลองในกระถาง ทดลอง (Pot Experiment) ที่มีการเติมสารฟอสเฟต 3 ระดับ ได้แก่ 0.7, 1.4 และ 2.8 มิลลิโมลต่อ กิโลกรัม และสารอีดีทีเอ 3 ระดับ ได้แก่ 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และให้ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง 60 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรม และหญ้าเนเปียร์แคะ (ส่วนใต้กากโลหะกรรม-ราก และส่วนเหนือกากโลหะกรรม-ลำต้นและใบ) ใน วันที่ 15, 30, 45 และ 60 ของการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมด (Total As) ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ (Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) และวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate, RGR) และความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity) ของหญ้าเนเปียร์แคะใน ทุกระยะของการเก็บตัวอย่าง

1.4.8 การทดลองระดับความเข้มข้นของสารผสมที่เหมาะสม โดยทำการทดลองในกระถาง ทดลองที่มีการเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ที่ได้จากการทดลองที่

1.4.7 และให้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง 60 วัน และทำการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรม และหลุ้าเนเปียร์แคะ (ส่วนใต้กากโลหกรรม-ราก และส่วนเหนือกากโลหกรรม-ลำต้นและใบ) ในวันที่ 15, 30, 45 และ 60 วันของการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมดด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคิปเปลพลาสมาอิมิสชันสเปกโตรมิเตอร์ และวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์และความเป็นพิษต่อพืชของหลุ้าเนเปียร์แคะในทุกระยะของการเก็บตัวอย่าง

1.4.9 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหลุ้าเนเปียร์แคะในส่วนราก ลำต้น และใบ ที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับสารช่วยเร่ง โดยคัดเลือกตัวอย่างพืชจากชุดการทดลองที่มีปริมาณการสะสมสารหนูสูงสุดที่ได้จากข้อ 1.4.7 และ 1.4.8 ไปวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืช ร่วมกับการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมี (Chemical Speciation) ของสารหนูในกากโลหกรรมด้วยแสงซินโครตรอน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนต่างๆ ของหลุ้าเนเปียร์แคะ และระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในกากโลหกรรมที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

1.5.2 สามารถอธิบายกลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหลุ้าเนเปียร์แคะเชิงคุณภาพได้อย่างถูกต้อง

1.5.3 ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในกากโลหกรรม ดิน และน้ำ ด้วยหลุ้าเนเปียร์แคะในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารหนู

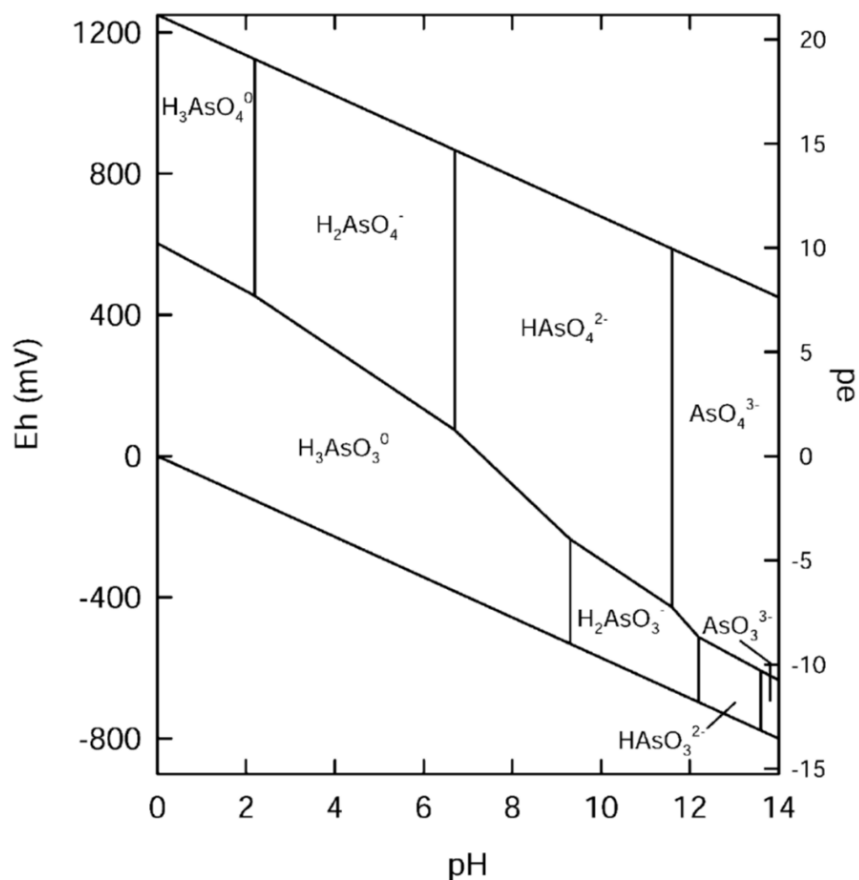
สารหนู (Arsenic, As) ถูกนำมาใช้ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ โดยในยุคสำริดสารหนูถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มความเงางามในการผลิตเครื่องมือเครื่องใช้ (Matschullat, 2000) ต่อมาชาวกรีกและชาวโรมันได้นำแร่ออร์พิเมนต์ (Orpiment) หรืออาร์เซนิกไตรซัลไฟด์ (As_2S_3) ที่มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองมาใช้ในการผลิตสีเหลืองและสีแดง โดยเรียกแร่ดังกล่าวว่า Arsenikon ซึ่งดัดแปลงมาจากคำว่า Zarnik ในภาษาเปอร์เซียที่แปลว่า หาดาลกิลิบทอง ส่วนคำว่า “สารหนู” ในภาษาไทยมาจากความนิยมของมนุษย์ที่นำสารหนูมาใช้เป็นยาเบื่อหนู เนื่องจากเป็นธาตุที่มีความเป็นพิษสูง เมื่อกินและหายใจเข้าไปจะเข้าไปทำลายระบบทางเดินอาหาร และส่วนอื่นๆ ของร่างกาย และตายในที่สุด (Bowell et al., 2014; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554) ในปี ค.ศ. 1250 Albertus Magnus นักบวชและนักปรัชญาชาวเยอรมันได้สังเคราะห์สารหนูได้สำเร็จเป็นครั้งแรกด้วยการให้ความร้อนกับสบู่วางกับแร่ออร์พิเมนต์ และจากความเป็นพิษที่รุนแรงของสารหนู จึงทำให้ถูกนำมาใช้เป็นยาพิษในการฆาตกรรมและการฆ่าตัวตาย อย่างไรก็ตามมีรายงานการนำสารหนูมาใช้ในการรักษาโรคตั้งแต่ในอดีต (Bowell et al., 2014; Khalid et al., 2017; Mandal & Suzuki, 2002; Matschullat, 2000) โดยในปี ค.ศ. 1910 Paul Ehrlich นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้นำสารประกอบสารหนูอินทรีย์ที่มีชื่อเรียกว่า Arsphenamine มาใช้ในการรักษาโรคซิฟิลิส และถูกเลิกใช้ไปเมื่อมีการค้นพบยาเพนนิซิลิน (Williams, 2009; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554)

2.1.1 สมบัติทั่วไปของสารหนู

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloids) มีสมบัติก้ำกึ่งระหว่างโลหะกับอโลหะ (Bowell et al., 2014; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554) มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 74.92 จัดอยู่ในธาตุหมู่ 15 ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) สารหนู (As) แอนติโมนี หรือพลวง (Sb) และบิสมัท (Bi) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5.727 ความหนาแน่น 5.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 814 องศาเซลเซียส และระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยการระเหยจะเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สามารถระเหิดได้ที่อุณหภูมิ 613 องศาเซลเซียส และมีความแข็งเท่ากับ 3.5 ตามสเกลของโมห์ส โดยสารหนูมีไอโซโทปที่เสถียรเพียงไอโซโทปเดียว คือ ^{75}As (Flora, 2015; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554; สายสวาท สีลอ, 2554)

2.1.2 รูปทางเคมีของสารหนู

สารหนูมีเลขออกซิเดชัน (Oxidation Number) หรือสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) หลายค่า คือ -3, 0, +3 และ +5 โดยในสิ่งแวดล้อมสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารหนูอนินทรีย์ซึ่งมีความเป็นพิษ (Toxicity) สูงกว่าสารหนูอินทรีย์ (Huang et al., 2011; Khalid et al., 2017; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554) โดยสารหนูที่มีสถานะออกซิเดชัน -3 เรียกว่า อาร์เซไนด์ (Arsenide, As^{3-}) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอาร์ซีน (Arsine, AsH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่เกิดภายใต้สภาวะรีดิวซ์ ไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม มีความเสถียรต่ำ และถูกออกซิไดส์ได้ง่ายในชั้นบรรยากาศ ทำให้พบได้ยากในธรรมชาติ (Panagiotaras et al., 2016; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554) เช่นเดียวกับกับสารหนูในรูปธาตุบริสุทธิ์ (Elemental Arsenic) ที่มีสถานะออกซิเดชันเท่ากับ 0 ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวในแหล่งแร่แบบน้ำร้อน (Hydrothermal Deposit) ที่อุณหภูมิ 50 - 200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของซัลเฟอร์ต่ำ (Chen et al., 2013) สารหนูในรูปธาตุบริสุทธิ์จะอยู่ในสถานะของแข็ง ในธรรมชาติจะพบในรูปของสารหนูสีเทาที่ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) มีลักษณะคล้ายโลหะ แข็งแต่เปราะ และมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังพบสารหนูในรูปธาตุบริสุทธิ์ที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของสารหนูสีดำที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และสารหนูสีเหลืองที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย (Henke & Hutchison, 2009) ทั้งนี้สารหนูที่พบในดินและในน้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีสถานะออกซิเดชัน +5 เรียกว่า อาร์เซเนต (Arsenate, As^{5+}) ซึ่งพบได้มากในสภาวะที่มีออกซิเจน ในขณะที่สารหนูที่มีสถานะออกซิเดชัน +3 เรียกว่า อาร์เซไนด์ (Arsenite, As^{3+}) จะพบได้มากในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Chen et al., 2013; Huang et al., 2011; Khalid et al., 2017; Mandal & Suzuki, 2002) ทั้งนี้สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารหนูในน้ำและในดินได้จากค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential, Eh) โดยเมื่อค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในสิ่งแวดล้อมมากกว่า 100 มิลลิโวลต์ สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซเนตที่ถูก ดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส โดยจะถูกชะละลายเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนตไอออนได้เมื่อมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 0 - 100 มิลลิโวลต์ และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซไนด์เมื่อค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลลดลงต่ำกว่า 0 มิลลิโวลต์ (Khalid et al., 2017) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ยังทำให้รูปทางเคมีของสารหนูเปลี่ยนไปได้ โดยความสัมพันธ์ของค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลและค่าความเป็นกรด-ด่างต่อรูปทางเคมีของสารหนูสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลต่อการเปลี่ยนแปลง
รูปทางเคมีของสารหนูที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

ที่มา: Smedley and Kinniburgh (2002)

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปไดไฮโดรเจนอาร์เซนเตอไอออน (H_2AsO_4^-) ไฮโดรเจนอาร์เซนเตอไอออน (HAsO_4^{2-}) และอาร์เซนเตอไอออน (AsO_4^{3-}) ตามลำดับ ในขณะที่กรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) จะเกิดการแตกตัวอยู่ในรูปไดไฮโดรเจนอาร์เซนไต์ไอออน (H_2AsO_3^-) ไฮโดรเจนอาร์เซนไต์ไอออน (HAsO_3^{2-}) และอาร์เซนไต์ไอออน (AsO_3^{3-}) ตามลำดับ (Khalid et al., 2017; Panagiotaras et al., 2016; Smedley & Kinniburgh, 2002) โดย Flora (2015) ได้แสดงสมการการแตกตัวและค่าคงที่การแตกตัวของกรด (pKa) ของอาร์เซนไต์และอาร์เซนเตอ ดังแสดงในสมการที่ 2-1 ถึง 2-6

อาร์เซไนต์

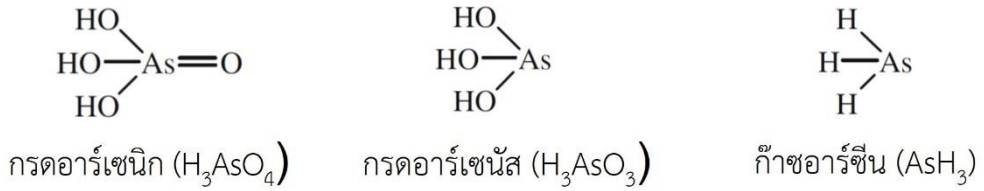


อาร์เซเนต

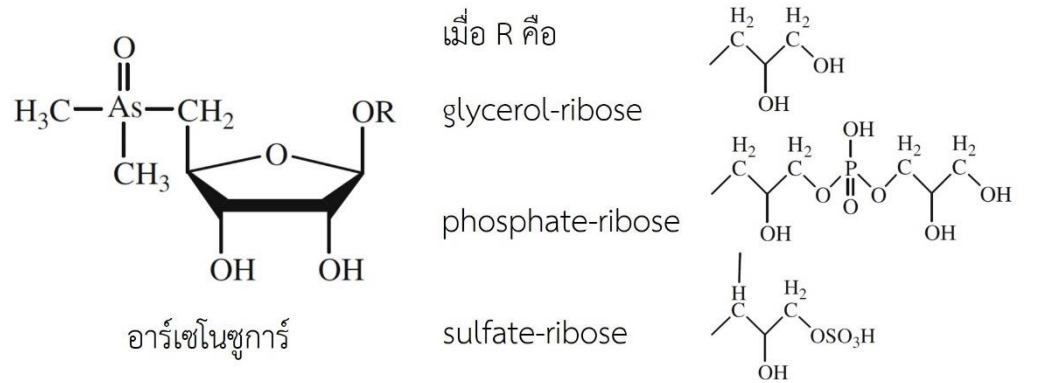
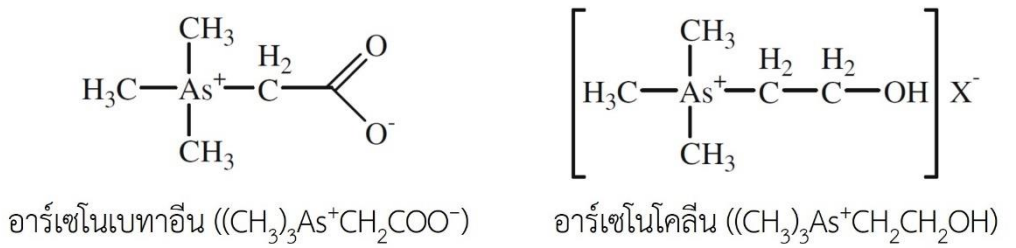
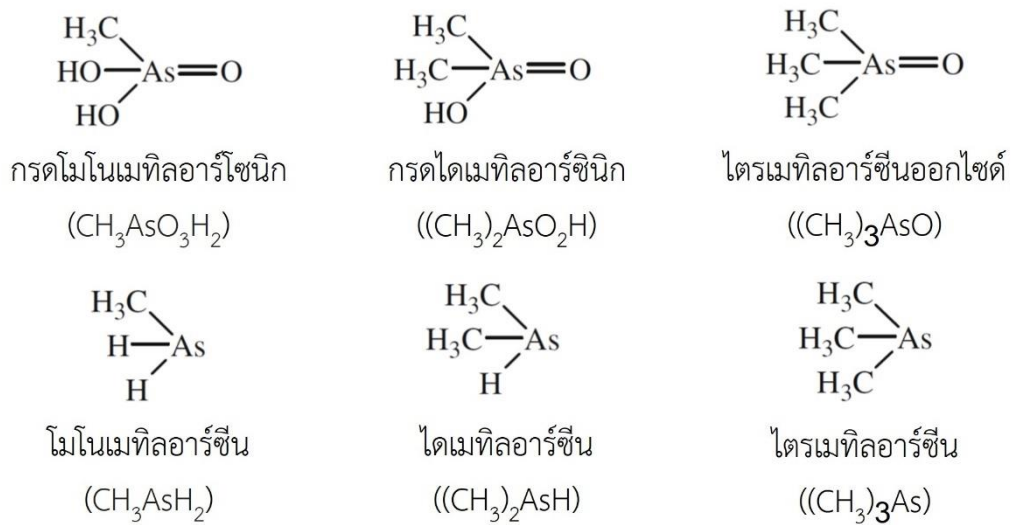


สิ่งมีชีวิตสามารถดูดซึมและสะสมสารหนูอนินทรีย์ภายในเซลล์ โดยสารหนูอนินทรีย์จะรวมตัวกับคาร์บอนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเกิดเป็นสารหนูอินทรีย์ที่มีพันธะระหว่างสารหนูและคาร์บอน (As-C Bonds) จำนวน 1 หรือมากกว่า 1 พันธะ การเปลี่ยนสารหนูอนินทรีย์เป็นสารหนูอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะจุลินทรีย์ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมทิลเลชัน (Methylation) ซึ่งเป็นกลไกการต้านทานพิษของสารหนูด้วยการเติมหมู่เมทิล (Methyl Group, $-\text{CH}_3$) ทำให้สารหนูมีความเป็นพิษลดลง เนื่องจากสารหนูอินทรีย์ไม่สามารถแตกตัวเป็นเกลืออนินทรีย์ได้เหมือนกับสารหนูอนินทรีย์ โดยภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสารหนูอินทรีย์จะอยู่ในรูปของกรดโมโนเมทิลอาร์โซนิค (Monomethylarsonic Acid, MMAA) กรดไดเมทิลอาร์ซีนิก (Dimethylarsinic Acid, DMAA) และไตรเมทิลอาร์ซีนออกไซด์ (Trimethylarsine Oxide, TMAO) และสามารถถูกรีดิวซ์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมโนเมทิลอาร์ซีน (Monomethylarsine, MMA) ไดเมทิลอาร์ซีน (Dimethylarsine, DMA) และไตรเมทิลอาร์ซีน (Trimethylarsine, TMA) นอกจากนี้ยังพบสารหนูอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนในสิ่งมีชีวิตในทะเลในรูปของอาร์เซโนเบทาอีน (Arsenobetaine, AsB) อาร์เซโนโคลีน (Arsenocholine, AsC) และอาร์เซโนซูการ์ (Arsenosugars) (Flora, 2015; Huang et al., 2011; เพชรลดา เจริญมิตร, 2554) โดยโครงสร้างทางเคมีของสารหนูอนินทรีย์และสารหนูอินทรีย์ดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

สารหนูอินทรีย์



สารหนูอินทรีย์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสารหนูอินทรีย์และสารหนูอินทรีย์

ที่มา: Huang et al. (2011)

2.1.3 ความเป็นพิษของสารหนูต่อสิ่งมีชีวิต

สารหนูเป็นธาตุที่มีความเป็นพิษรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิต โดย Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) ซึ่งเป็นหน่วยงานของกระทรวงสาธารณสุข ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดอันดับให้สารหนูเป็นสารอันตรายอันดับที่ 1 มาอย่างต่อเนื่อง (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2019) อย่างไรก็ตามระดับความเป็นพิษของสารหนูต่อสิ่งมีชีวิตนั้นขึ้นอยู่กับรูปทางเคมีของสารหนู โดยที่ สารหนูอนินทรีย์จะมีความพิษสูงกว่าสารหนูอินทรีย์ (Ramasamy & Lee, 2015) และอาร์เซนไนด์จะมีความเป็นพิษสูงกว่าอาร์เซเนต (Khalid et al., 2017; Ventura-Lima et al., 2011) ความเป็นพิษของสารหนูต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช มีรายละเอียด ดังนี้

1) ความเป็นพิษของสารหนูต่อมนุษย์: โดยทั่วไปสารหนูจะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านการกิน (Ingestion) อย่างไรก็ตามพบว่า สารหนูสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านการหายใจ (Inhalation) และการสัมผัสทางผิวหนัง (Dermal Exposure) ได้เช่นเดียวกัน (IARC, 2012; Ramasamy & Lee, 2015) โดยความเป็นพิษของสารหนูขึ้นอยู่กับปริมาณสารหนูและระยะเวลาในการสัมผัส โดยหากร่างกายได้รับสารหนูอนินทรีย์ในระดับหลายมิลลิกรัมต่อวัน ผ่านทางการกินอาหารและน้ำ จะทำให้ร่างกายแสดงอาการเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute Effects) โดยจะก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้ปวดท้อง ท้องร่วง (Diarrhea) เกิดภาวะเลือดออกในทางเดินอาหาร (Hemorrhagic Gastroenteritis) และอาจนำไปสู่ภาวะการหมดสติ (Ramasamy & Lee, 2015) ในขณะที่การได้รับสารหนูอนินทรีย์ในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ผ่านทางการกินอาหารและน้ำจะทำให้ร่างกายแสดงอาการเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic Effects) โดยอาการที่พบเห็นได้ทั่วไป คือ การเกิดรอยโรคที่ผิวหนัง (Skin Lesions) ในหลายระดับ (Guha Mazumder, 2015; Ramasamy & Lee, 2015) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 รวมทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกหลายประการ ได้แก่ โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน ผลกระทบต่อปอด ความบกพร่องทางระบบประสาท (Neurological Impairment) ความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ และการพัฒนาการ และผลกระทบทางภูมิคุ้มกัน ทางโลหิตวิทยา ตับ และไต (Ramasamy & Lee, 2015) นอกจากนี้ยังมีหลักฐานบ่งชี้ว่าสารหนูก่อให้เกิดมะเร็งในเนื้อเยื่อมนุษย์หลายชนิด ได้แก่ ปอด กระเพาะปัสสาวะ ผิวหนัง ไต ตับ และต่อมลูกหมาก (Guha Mazumder, 2015; IARC, 2012; Ramasamy & Lee, 2015) ทั้งนี้ International Agency for Research on Cancer (IARC) ซึ่งเป็นองค์กรที่ประเมินและจัดกลุ่มสารก่อมะเร็งที่ได้รับความเชื่อถือสูงที่สุดในโลก ได้กำหนดให้สารหนูและสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ (Arsenic and Inorganic Arsenic Compounds) จัดอยู่ใน Group 1 ซึ่งมีคำนิยามยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (Carcinogenic to Humans) (IARC, 2012)



รูปที่ 2.3 อาการเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic Effect) ที่เกิดจากการได้รับสารหนูอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน; (ก) ภาวะสีผิวดำ (Melanosis) (ข) ภาวะ Hyperpigmentation (ค) ภาวะ Hypopigmentation (Leukoderma หรือ Leukomelanosis) (ง) ภาวะ Hyperkeratosis ระดับต่ำ (จ) ภาวะ Hyperkeratosis ระดับรุนแรง และ (ฉ) ภาวะ Bowen's Disease

ที่มา: ดัดแปลงจาก Guha Mazumder (2015)

2) ความเป็นพิษของสารหนูต่อสัตว์: ผลกระทบจากการได้รับสารหนูในสัตว์เกิดขึ้น เช่นเดียวกันกับการได้รับสารหนูในมนุษย์โดยเฉพาะในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในขณะที่ความเป็นพิษของสารหนูในสัตว์น้ำทั้งที่อาศัยอยู่ในน้ำแหล่งน้ำจืดและแหล่งน้ำเค็มได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสารประกอบสารหนูส่วนใหญ่สามารถละลายในน้ำได้ดี (Kumari et al., 2017) อีกทั้งยังมีรายงานการปนเปื้อนสารหนูที่มีแหล่งกำเนิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ในแหล่งน้ำหลายแห่งทั่วโลก โดย Kumari et al. (2017) รายงานว่า ปลาที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนสารหนูสามารถได้รับสารหนูผ่านทางเหงือก ผิวหนัง และการกินอาหาร ทั้งนี้ปลาจะแสดงอาการเป็นพิษแบบเฉียบพลันโดยมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น การเคลื่อนไหวผิดปกติ การเคลื่อนไหวของแผ่นปิดเหงือกอย่างรวดเร็ว การว่ายน้ำด้านข้าง การสูญเสียสมดุลของร่างกาย โดยอาการเหล่านี้เกิดจากการที่สารหนูทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบประสาท นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความผิดปกติทางโลหิตวิทยา (Hematological Changes) เกิดผลกระทบต่ออวัยวะต่างๆ และตายลงในท้ายที่สุด ในขณะที่อาการเป็นพิษแบบเรื้อรังจากการสะสมสารหนูในร่างกายเป็นเวลานานยังจะก่อให้เกิดผลกระทบทางชีวเคมี และผลกระทบต่อโครโมโซม (Cyto-Genetic Effects)

3) ความเป็นพิษของสารหนูต่อพืช: สารหนูไม่ใช่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตามในสภาวะปกติรากพืชสามารถดูดซับสารหนูทั้งในรูปของอาร์เซนไนต์และอาร์เซนเตตด้วยการลำเลียงแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive Transport) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (Kabata-Pendias, 2010; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007) ทั้งนี้พืชแต่ละชนิดจะตอบสนองและแสดงความเป็นพิษจากการได้รับสารหนูแตกต่างกันออกไป โดยพืชส่วนใหญ่จะดูดซับและสะสมสารหนูไว้ที่บริเวณรากและเคลื่อนย้ายสารหนูเพียงเล็กน้อยขึ้นสู่ยอดและใบ โดย Kabata-Pendias (2010) รายงานว่า ความเข้มข้นของสารหนูในใบพืชทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1 - 1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยที่พืชสามารถแสดงความเป็นพิษจากสารหนูจะมีความเข้มข้นของสารหนูในใบพืชอยู่ในช่วง 5 - 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแตกต่างจากพืชที่มีความสามารถในการสะสมสารหนูในปริมาณมากที่มีกลไกลดความเป็นพิษของสารหนูด้วยการลำเลียงขึ้นไปสะสมในแวคิวโอล (Vacuole) ที่บริเวณใบ (Souri et al., 2017) เช่น เพ็ชรเงิน (*Pityrogramma calomelanos*) และกูดหมาก (*Pteris vittata*) ทำให้ใบของพืชทั้งสองชนิดมีความเข้มข้นของสารหนูสูงสุด 887 และ 674 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Niazi et al., 2012) โดยความเป็นพิษของสารหนูจะส่งผลให้พืชมีจำนวนใบลดลง เกิดอาการใบเหลือง (Chlorosis) การตายของเนื้อเยื่อ (Necrosis) และการผลัดใบ (Defoliation) การเจริญเติบโตของยอดและรากลดลง การเปิด-ปิดของปากใบ (Stomatal Conductance) และการดูดซับธาตุอาหารถูกจำกัด คลอโรฟิลล์เสื่อมสลาย ทำให้ชีวมวลและผลผลิตลดลง นอกจากนี้ยังเกิดการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROS) ที่มากเกินไป ส่งผลให้

คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และดีเอ็นเอในเซลล์พืชเสียหาย (Abbas et al., 2018; Moreno-Jiménez et al., 2012; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558a)

ความเป็นพิษของสารหนูที่เกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตมีความเกี่ยวข้องกับการสะสมทางชีววิทยา (Bioaccumulation) และการถ่ายทอดตามลำดับทางห่วงโซ่อาหาร (Biomagnification) ของสิ่งมีชีวิตในลำดับที่ต่ำกว่าไปยังสิ่งมีชีวิตในลำดับที่สูงกว่า ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันการรับสัมผัสและสะสมสารหนูในมนุษย์ จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มและอาหารโดยหน่วยงานต่างๆ เช่น องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้กำหนดให้น้ำดื่มควรมีความเข้มข้นของสารหนูไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (WHO, 2017) ในขณะที่คณะกรรมการโครงการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ (Codex Alimentarius Commission, CAC) กำหนดให้ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำมันและไขมัน (Edible Fats and Oils) และผลิตภัณฑ์เนยเทียมและผลิตภัณฑ์เนยผสม ต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวสาร (Rice, Polished) ต้องมีค่าไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวเปลือก (Rice, Husked) ต้องมีค่าไม่เกิน 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเกลือบริโภค (Salt, Food Grade) ต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, 2019) สำหรับมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเทศ จะมีความแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิประเทศและสภาพสังคม โดยประเทศไทยได้กำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมของสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.2

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักและค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ชนิดของโลหะหนัก ¹	ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน				
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
สารหนู (As)	ธ		ไม่เกิน 0.01		-
ทองแดง (Cu)	ธ		ไม่เกิน 0.1		-
นิกเกิล (Ni)	ธ		ไม่เกิน 0.1		-
แมงกานีส (Mn)	ธ		ไม่เกิน 1.0		-
สังกะสี (Zn)	ธ		ไม่เกิน 1.0		-
แคดเมียม (Cd)	ธ		ไม่เกิน 0.005* / ไม่เกิน 0.05**		-
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr ⁶⁺)	ธ		ไม่เกิน 0.05		-
ตะกั่ว (Pb)	ธ		ไม่เกิน 0.05		-
ปรอททั้งหมด (Total Hg)	ธ		ไม่เกิน 0.002		-

หมายเหตุ: ¹กำหนดค่ามาตรฐานเฉพาะในแหล่งน้ำประเภทที่ 2 - 4 สำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 1 ให้เป็นไปตามธรรมชาติ (ธ) และแหล่งน้ำประเภทที่ 5 ไม่กำหนดค่า (-)

* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO₃ ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

** น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO₃ เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ("ราชกิจจานุเบกษา," 2537, 24 กุมภาพันธ์)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโลหะหนักและค่ามาตรฐานคุณภาพดิน

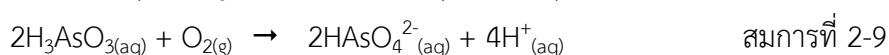
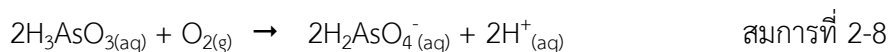
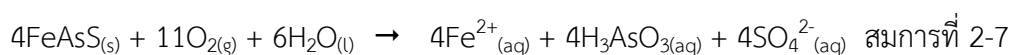
ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานคุณภาพดินตามการใช้ประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	เพื่อการอยู่อาศัย	เพื่อการค้าขาย เกษตรกรรม และกิจการอื่นๆ
สารหนู (As)	ไม่เกิน 6	ไม่เกิน 25
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 67	ไม่เกิน 762
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+})	ไม่เกิน 17.5	ไม่เกิน 212
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2,920	ไม่เกิน 35,040
ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 800
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 1,710	ไม่เกิน 19,640
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 22	ไม่เกิน 263
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 436.5	ไม่เกิน 5,205
ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 365	ไม่เกิน 4,380

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ("ราชกิจจานุเบกษา," 2564, 11 มีนาคม)

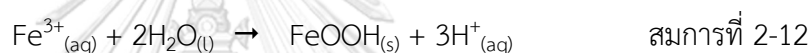
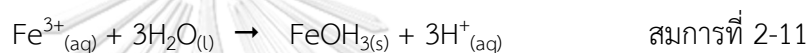
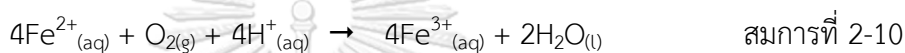
2.1.4 แหล่งกำเนิดของสารหนู

สารหนูเป็นธาตุที่พบได้มากบนเปลือกโลกเป็นลำดับที่ 20 (Flora, 2015; Mandal & Suzuki, 2002) โดยการปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อมมีสาเหตุสำคัญมาจากการผุพังอยู่กับที่ (Weathering) การปะทุของภูเขาไฟ (Volcanic Eruption) กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ และกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Activities) ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารหนูในเปลือกโลกมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของหินและแร่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1 - 2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Bowell et al., 2014; Flora, 2015; Panagiotaras et al., 2016) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารหนูในดิน น้ำ และตะกอนท้องน้ำในแต่ละพื้นที่มีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้สารหนูยังเป็นธาตุองค์ประกอบของแร่ในธรรมชาติมากกว่า 320 ชนิด (Chen et al., 2013; Flora, 2015) โดยพบความเข้มข้นของสารหนูสูงในแร่ซัลไฟด์ (Sulfide Mineral) และแร่ออกไซด์ (Oxide Mineral) หลายชนิด

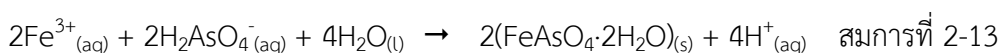
แร่ซัลไฟด์เป็นแร่ปฐมภูมิ (Primary Mineral) ที่เกิดขึ้นภายใต้พื้นผิวโลกและมีความเกี่ยวข้องกับแหล่งแร่ (Ore Deposit) หลายชนิด โดยเฉพาะไพไรต์ (Pyrite, FeS_2) ซึ่งเป็นแร่ซัลไฟด์ที่พบได้มากที่สุดเปลือกโลกส่วนบน (Upper Crust) และมักพบธาตุอื่นๆ รวมถึงสารหนูปะปนอยู่ด้วยเสมอ (Tomkins & Morgan, 2018) นอกจากนี้ยังพบสารหนูในรูปของแร่อาร์เซนิกซัลไฟด์ (Arsenic Sulfide Mineral) ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกในรูปของหธาตลกลีบทองหรือออร์พิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) และหธาตแดงหรือรีอัลการ์ (Realgar, As_4S_4) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งพบได้ทั่วไปในแหล่งแร่แบบหินหนืด (Magmatic Deposit) และแหล่งแร่แบบน้ำร้อน โดยสารหนูที่พบในแร่ซัลไฟด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของซัลโฟซอลต์ (Sulfosalts) โดยเฉพาะอาร์เซนไพไรต์ (รูปที่ 2.4) (Flora, 2015; Henke & Hutchison, 2009; O'Day, 2006; Panagiotaras et al., 2016; Smedley & Kinniburgh, 2002) ซึ่งเป็นแร่ซัลไฟด์ที่มีบทบาทสำคัญในการปลดปล่อยสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการผุพังอยู่กับที่ของหินและแร่ เนื่องจากอาร์เซนไพไรต์ไม่เสถียรภายใต้สภาวะบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อสารหนูที่มีสถานะออกซิเดชัน -1 หรือ อาร์เซไนด์ (Arsenide, As^{-1}) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ อาร์เซนไพไรต์สัมผัสกับอากาศและน้ำ สารหนูจะถูกออกซิไดส์ทำให้มีสถานะออกซิเดชันเพิ่มขึ้น โดยจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซไนด์และอาร์เซเนตได้ในที่สุด (Henke & Hutchison, 2009) ดังแสดงในสมการที่ 2-7 ถึง 2-8 (Battistel et al., 2021; Corkhill & Vaughan, 2009; Kumarathilaka et al., 2018; Morin & Calas, 2006)



สารหนูที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับอินทรีย์วัตถุ แร่ดินเหนียว และแร่ออกไซด์ (Bowell et al., 2014; Khalid et al., 2017; Kumarathilaka et al., 2018; Ravenscroft et al., 2009) ในขณะที่เฟอร์รัสไอออน (Ferrous Ion, Fe^{2+}) ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปเฟอร์ริกไอออน (Ferric Ion, Fe^{3+}) อย่างรวดเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน ซึ่งส่วนใหญ่จะตกตะกอนอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide, $\text{Fe}(\text{OH})_3$) และเฟอร์ริกออกซิไฮดรอกไซด์ (Ferric Oxyhydroxide, FeOOH) ทั้งในรูปของเฟอร์ริไฮไดรต์ (Ferrihydrite, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous Structure) และเกอไทต์ (Goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$) ที่มีโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline Structure) ดังแสดงในสมการที่ 2-10 ถึง 2-12 (Battistel et al., 2021; Lottermoser, 2010; Paikaray, 2015)



สารประกอบเหล็กออกไซด์เหล่านี้มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงและมีความจำเพาะกับสารหนู ดังนั้น การกักเก็บสารหนูในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับการดูดซับโดยสารประกอบเหล็กออกไซด์ นอกจากนี้ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารหนูสูง พบว่า มีแนวโน้มที่สารหนูจะเกิดการตกตะกอนร่วมกับเฟอร์ริกไอออนได้เพิ่มขึ้น (Drahota & Filippi, 2009) โดยในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 3 อาร์เซนเตสามารถตกตะกอนร่วมกับเฟอร์ริกไอออนและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสกอโรไต์ (Scorodite, $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นสารประกอบเฟอร์ริกอาร์เซนเตที่มีโครงสร้างแบบผลึก ที่มีความเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจนและมีความสามารถในการละลายได้ต่ำ (Battistel et al., 2021; Corkhill & Vaughan, 2009; Craw & Bowell, 2014; Day et al., 2004; Paikaray, 2015) ดังแสดงในสมการที่ 2-13 นอกจากนี้สารหนูยังเป็นองค์ประกอบในแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิอีกหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 รวมทั้งตัวอย่างผลึกแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Drahota & Filippi, 2009)



ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ

แร่ปฐมภูมิ	สูตรเคมี	แร่ทุติยภูมิ	สูตรเคมี
Allemontite	AsSb	Adamite	$Zn_2(AsO_4)(OH)$
Arsenargentite	Ag_3As	Adelite	$Ca,Mg(AsO_4)(OH)$
Arsenopyrite	FeAsS	Annabergite	$Ni_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Cobaltite	CoAsS	Arsenolite	As_2O_3
Domeykite	Cu_3As	Conichalcite	$CaCu(AsO_4)(OH)$
Enargite	Cu_3AsS_4	Duftite	$PbCu(AsO_4)(OH)$
Gersdorffite	NiAsS	Haematolite	$(Mn,Mg)_4Al(AsO_4)(OH)_8$
Loellingite	$FeAs_2$	Hoernesite	$Mg_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Niccolite	NiAs	Mansfieldite	$Al(AsO_4) \cdot 2H_2O$
Orpiment	As_2S_3	Mimetite	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$
Proustite	Ag_3AsS_3	Olivenite	$Cu_2(AsO_4)OH$
Realgar	As_4S_4	Pharmacolite	$Ca(HAsO_4) \cdot 2H_2O$
Skutterudite	$(Co,Ni)As_3$	Scorodite	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$
Tennantite	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$	Weilite	$CaAsO_3OH$

ที่มา: Craw and Bowell (2014); Smedley and Kinniburgh (2002); เพชรลดา เจริญมิตร (2554)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลึกแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Chen et al. (2013)

แม้ว่าปรากฏการณ์ทางธรรมชาติทั้งการปะทุของภูเขาไฟ การผุพังอยู่กับที่ รวมทั้งการกัดกร่อน (Erosion) ของหินและแร่ธาตุต่างๆ ในเปลือกโลกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยและการแพร่กระจายของสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อม (Khalid et al., 2017) อย่างไรก็ตามยังพบว่า การปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ในหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ 1) การทำเหมืองแร่ 2) การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล 3) การใช้น้ำยารักษาเนื้อไม้ 4) การใช้สารเคมีทางการเกษตร เช่น สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง และสารกำจัดรา และ 5) อาหารและยารักษาโรคที่ใช้ในปศุสัตว์ (Bowell et al., 2014; Khalid et al., 2017; Mandal & Suzuki, 2002) ทั้งนี้การทำเหมืองแร่เป็นกิจกรรมที่มีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับสูง เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีเคมีของพื้นที่ประกอบการเป็นบริเวณกว้าง โดยการปลดปล่อยสารหนูจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์อาจทำให้เกิดผลกระทบอย่างต่อเนื่องจากการรั่วไหลของน้ำเหมืองที่เป็นกรด (Acid Mine Drainage) ออกสู่สิ่งแวดล้อม (Changul et al., 2010; Paktunc, 2013; Yang et al., 2009) ทั้งนี้ยังมีรายงานปัญหาการปนเปื้อนสารหนูในระดับความเข้มข้นสูงในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่ประกอบการเหมืองแร่หลายแห่งทั่วโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การปนเปื้อนสารหนูในแหล่งน้ำใต้ดิน (Arsenic-affected aquifers) ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการทำเหมืองแร่ (Arsenic related to mining operations) และแหล่งน้ำร้อนใต้พิภพ (Geothermal waters) โดยพื้นที่สีฟ้าแสดงถึงแหล่งน้ำผิวดิน

ที่มา: Smedley and Kinniburgh (2002)

2.1.5 กากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนู

การทำเหมืองแร่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิประเทศและก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมทั้งจากขั้นตอนการขุดขน การแต่งแร่ และการจัดการของเสีย โดยสินแร่ (Ore) ที่ได้จากกระบวนการแต่งแร่ (Mineral Processing) มีปริมาณเพียงร้อยละ 1 - 3 ในขณะที่ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 97 เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการในรูปของกากโลหะกรรมซึ่งประกอบไปด้วยส่วนผสมของทราย อนุภาคขนาดเล็ก น้ำ สารเคมี โลหะหนัก และแร่มีค่าที่ปะปนอยู่เล็กน้อย โดยทั่วไปกากโลหะกรรมจะมีลักษณะคล้ายโคลนซึ่งจะถูกลำเลียงไปกักเก็บไว้ภายในบ่อกักเก็บ โดยส่วนที่เป็นของแข็งจะตกตะกอนสะสมอยู่ในบ่อกักเก็บ ในขณะที่น้ำจะถูกวนกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป (Adiansyah et al., 2015; Kossoff et al., 2014; Wang et al., 2017) ทั้งนี้มีรายงานว่าในปี ค.ศ. 2010 เหมืองแร่ทั่วโลกก่อให้เกิดกากโลหะกรรม 1.4 หมื่นล้านตัน ซึ่งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการกักเก็บกากโลหะกรรมเหล่านี้ (Adiansyah et al., 2015; Kossoff et al., 2014; Wang et al., 2017) สำหรับกรณีของพื้นที่การทำเหมืองแร่ทองคำในประเทศไทยมีการคาดการณ์ในเบื้องต้นว่าจะก่อให้เกิดกากโลหะกรรมปริมาณ 9.75 ล้านตัน ซึ่งจะถูกกักเก็บอยู่ในบ่อกักเก็บที่มีขนาดพื้นที่กว่า

2,000 ไร่ และจากการขยายสัมปทานการทำเหมืองแร่ทำให้มีการคาดการณ์ว่าปริมาณกากโลหะกรรมจะสูงถึง 19 ล้านตัน (Changul et al., 2010)

กากโลหะกรรมปริมาณมากเหล่านี้ปนเปื้อนโลหะหนักโดยเฉพาะสารหนูที่มักพบปะปนอยู่ในแหล่งแร่มีค่าและเป็นธาตุชี้้นำ (Pathfinder Element) ของแร่โลหะหลายชนิดโดยเฉพาะทองคำ (Au) ดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และทังสแตน (W) รวมทั้งยังพบในแหล่งแร่ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) (Abad-Valle et al., 2018; Howell et al., 2014; Paktunc, 2013; Smedley & Kinniburgh, 2002) โดยกากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนูเหล่านี้มีโอกาสสูงที่จะเกิดการแพร่กระจายจากการพัดพาโดยลม (Wind Erosion) และการถูกชะล้างโดยน้ำ (Water Erosion) ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของฝุ่น อนุภาคขนาดเล็ก และน้ำกรดจากเหมือง (Abad-Valle et al., 2018; Favas et al., 2018; Ngole-Jeme & Fantke, 2017; Paktunc, 2013) แม้ว่ากิจกรรมเหมืองแร่โลหะจะมีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ยังคงเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ โดยเฉพาะทองคำซึ่งเป็นแร่โลหะที่มีมูลค่าสูงและมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตามพบว่า แหล่งแร่ทองคำมีระดับความเข้มข้นของสารหนูสูง (Howell et al., 2014; Dos Santos et al., 2013; Jamieson et al., 2015; Keshavarzi et al., 2012) ซึ่งทำให้กากโลหะกรรมจากเหมืองแร่ทองคำมักมีระดับความเข้มข้นของสารหนูสูงตามไปด้วย

ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำในแต่ละแห่งจะมีความแตกต่างกันตามประเภทของแหล่งแร่และวัตถุดิบกำเนิด ยกตัวอย่างเช่น กากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำในประเทศฟิลิปปินส์ มีค่าเฉลี่ยของสารหนูเท่ากับ 683 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Ko et al., 2008) ในประเทศแอฟริกาใต้ มีค่าเฉลี่ย 40.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Melato et al., 2016) และในประเทศเคนยา มีค่าอยู่ในช่วง 2.1 - 5,830 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Odumo et al., 2018) สำหรับประเทศไทย Sampanpanish and Suwattiga (2017) รายงานว่า กากโลหะกรรมจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ Yang et al. (2009) รายงานว่า กากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำและเงินในประเทศเกาหลีใต้มีความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 1,941 - 37,145 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่คงค้างกับของแข็ง และรูปของสารประกอบเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ สอดคล้องกับ Loredó-Portales et al. (2017) ที่รายงานว่า กากโลหะกรรมของเหมืองแร่โลหะมีค่า (ทองคำ เงิน ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง) มีความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 3,139 - 12,672 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยอยู่ในรูปที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioaccessible) ในช่วง 266 - 689 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้ (Phytoaccessible) ในช่วง 363 - 677 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ Ono et al. (2016) รายงานว่า

กากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำในประเทศบราซิลมีระดับความเข้มข้นของสารหนู 2,666 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยอยู่ในรูปที่พืชดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้คิดเป็นร้อยละ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารหนูในกากโลหะกรรมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้สารหนูมีความสามารถในการละลายได้และความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ต่ำ

ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าในกากโลหะกรรมไม่ได้แสดงถึงพฤติกรรมทางชีวธรณีเคมี (Biogeochemical Behaviour) ของสารหนูในสิ่งแวดล้อม โดยในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของสารหนูขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มทางเคมีมากกว่าระดับความเข้มข้นทั้งหมด (Craw & Bowell, 2014; Khalid et al., 2017) โดยจากผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในกากโลหะกรรมจากเหมืองแร่โลหะจากโครงสร้าง XANES สามารถตรวจพบสารหนูทั้งในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{1-}) อาร์เซไนต์ (As^{3+}) และอาร์เซเนต (As^{5+}) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยมีสัดส่วนของอาร์เซเนตสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทั้งนี้พบว่า อาร์เซเนตส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ถูกดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์ เช่น เฟอริไฮไดรต์ (Ferrihydrite, $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$) เกอไทต์ (Goethite, $\alpha-FeOOH$) จาโรไซต์ (Jarosite, $(K,Na,NH_4,H_2O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$) และชแวร์ทมานไนต์ (Schwertmannite, $Fe_8O_8(OH)_6SO_4$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบการตกตะกอนร่วมของอาร์เซเนตและเฟอร์ริกไอออนในรูปของสกอร์โดไตต์ (Scorodite, $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) ในส่วนของอาร์เซไนต์พบทั้งในรูปของแร่ซัลไฟด์และแร่ออกไซด์ และพบอาร์เซไนต์ในรูปของอาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite, $FeAsS$) (Loredo-Portales et al., 2017; Nieva et al., 2019; Paktunc, 2013; Root et al., 2015)

กากโลหะกรรมปนเปื้อนสารหนูปริมาณมากที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสม ถึงแม้ว่าสารหนูเหล่านี้จะมีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพต่ำ แต่ภายใต้สภาพทางธรณีวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปในพื้นที่การทำเหมืองจากกระบวนการการขุดและแต่งแร่ ตลอดจนการกักเก็บกากโลหะกรรมในบ่อกักเก็บ ทำให้สารหนูในกากโลหะกรรมมีโอกาสสูงที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพได้มากขึ้น และเกิดการแพร่กระจายของสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมในท้ายที่สุด

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะหนักจากเหมืองแร่โลหะมีค่าที่ตั้งอยู่ในแต่ละประเทศ

เหมืองแร่	ประเทศ	สินแร่	รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู (ร้อยละ)		
			As ¹⁻	As ³⁺	As ⁵⁺
La Aurora ¹	เม็กซิโก	ทองคำ เงิน ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี	0	0	100
Delnita ²	แคนาดา	ทองคำ	0	0 - 17	83 - 100
Concordia ³	อาร์เจนตินา	เงิน ตะกั่ว สังกะสี	0 - 12.5	0 - 34.6	52.9 - 100
Iron King ⁴	สหรัฐอเมริกา	ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี	9 - 100	0	37 - 100

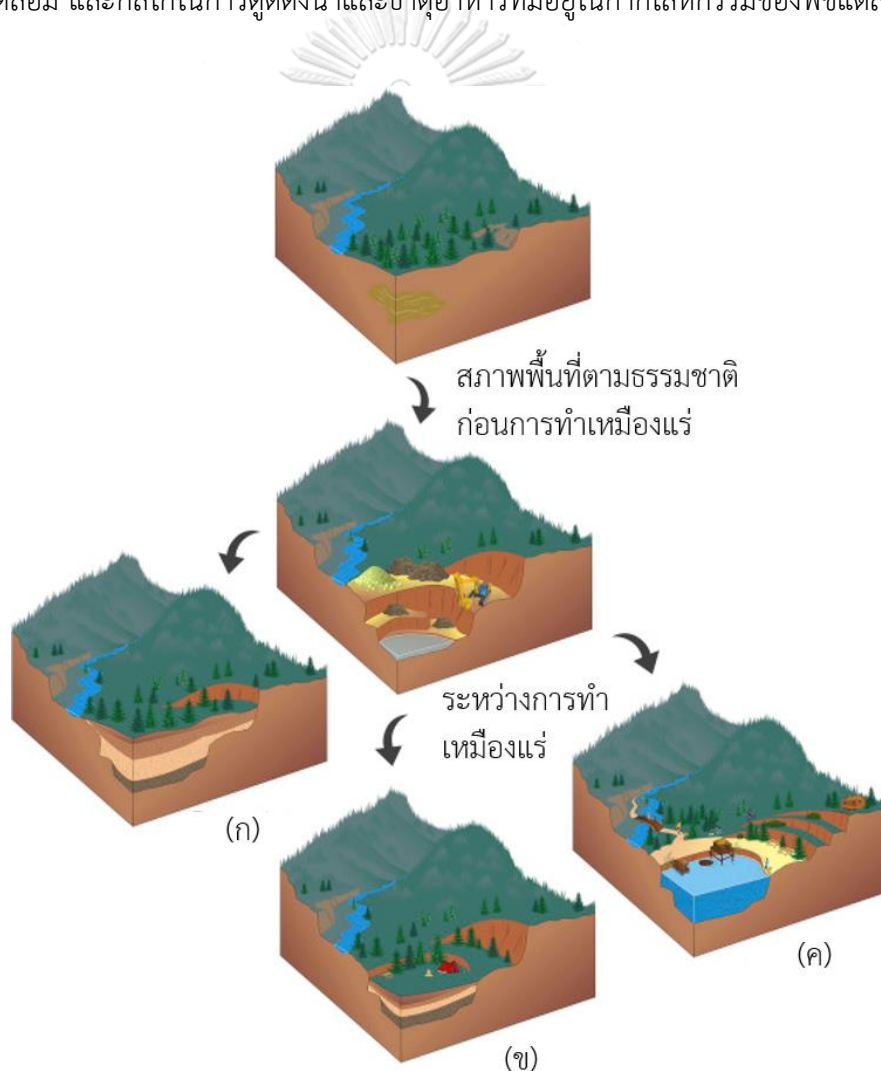
ที่มา: ¹ Loreda-Portales et al. (2017), ² Paktunc (2013), ³ Nieva et al. (2019) และ ⁴ Root et al. (2015)

2.2 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช

การปลูกพืชในพื้นที่การทำเหมืองแร่เป็นมาตรการทางสิ่งแวดล้อมที่ถูกนำมาใช้ในการป้องกันมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ และเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง (Mine Reclamation) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสภาพพื้นที่บนผิวดินและสภาพภูมิทัศน์ให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่โดยรอบ รวมทั้งจะต้องทำการกำหนดรูปแบบการใช้ประโยชน์พื้นที่ให้สามารถใช้ประโยชน์ได้ใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่เดิม และจะต้องจัดหามาตรการที่จำเป็นและเพียงพอในการดำเนินการปรับสภาพพื้นที่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชนในระยะยาว ทั้งนี้สามารถดำเนินการควบคู่ไปกับการทำเหมืองหรือเมื่อสิ้นสุดระยะการทำเหมือง (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558b) โดยแบ่งรูปแบบของการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1) การพัฒนาสภาพพื้นที่ให้เหมือนเดิม (Restoration) 2) การปรับปรุงสภาพพื้นที่ให้ดีขึ้น (Rehabilitation) และ 3) การเปลี่ยนสภาพพื้นที่เพื่อการใช้ประโยชน์แบบใหม่ (Replacement) (Favas et al., 2018) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

การฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองซึ่งรวมถึงพื้นที่ของบ่อกักเก็บกากโลหะหนักด้วยการปลูกพืชสามารถป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากพืชที่ปลูกปกคลุมอยู่บนกากโลหะหนักจะช่วยป้องกันการพัดพาโดยลม และการชะล้างโดยน้ำของอนุภาคกากโลหะหนักโดยเฉพาะที่ระดับผิวดิน อย่างไรก็ตามสภาพความแห้งแล้ง การขาดแคลนธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุ และความเป็นพิษของโลหะหนักถือเป็นอุปสรรคหลักในการปลูกพืชในบ่อกัก

เก็บกากโลหกรรม (Borišev et al., 2018; Xie & Van Zyl, 2020; อุดมศักดิ์ บุญมีรติ & พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2563) ในกรณีของเหมืองแร่ทองคำพบว่า พืชหลายชนิดมีความสามารถในการปรับสภาพและเจริญเติบโตในกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูจากได้ดี อีกทั้งยังมีรายงานถึงความสามารถในการดูดซับและสะสม สารหนูอีกด้วย เช่น ปอปลาร์ (*Populus davidiana*) (Chang et al., 2005) ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus* species) (King et al., 2008) หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ไม้ (*Bamboo* species) กระถินเทพา (*Acacia mangium*) และกระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis*) (Sampanpanish, 2018) อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนุยังคงมีความแตกต่างกันไปตามความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม และกลไกในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารที่มีอยู่ในกากโลหกรรมของพืชแต่ละชนิด



รูปที่ 2.6 การฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองโดย (ก) การพัฒนาสภาพพื้นที่ให้เหมือนเดิม (ข) การปรับปรุงสภาพพื้นที่ให้ดีขึ้น และ (ค) การเปลี่ยนสภาพพื้นที่เพื่อการใช้ประโยชน์แบบใหม่

ที่มา: Favas et al. (2018)

ความสามารถในการดูดซับและสะสมธาตุต่างๆ ของพืชถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า การบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประโยชน์จากกระบวนการดูดซับน้ำและธาตุอาหารของพืชจากตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเคลื่อนย้าย กักเก็บ บำบัด และลดความเป็นอันตรายของสารมลพิษ หรือทำให้สารมลพิษในพื้นที่ปนเปื้อนมีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมลดลง หดลง หรือให้เหลือน้อยที่สุด (พันธวัค สัมพันธ์พานิช, 2558b) โดยการบำบัดด้วยพืชมักถูกนำมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถดำเนินการได้ในพื้นที่ปนเปื้อนโดยไม่ทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง (Ali et al., 2013; Sampanpanish & Suwattiga, 2017; Sarwar et al., 2017)

2.2.1 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช

พืชแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อสารมลพิษแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน โดยการบำบัดด้วยพืชสามารถแบ่งประเภทตามกลไกการบำบัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีรายละเอียดของการบำบัดด้วยพืชแต่ละประเภท (Ali et al., 2013; พันธวัค สัมพันธ์พานิช, 2558a) ดังนี้

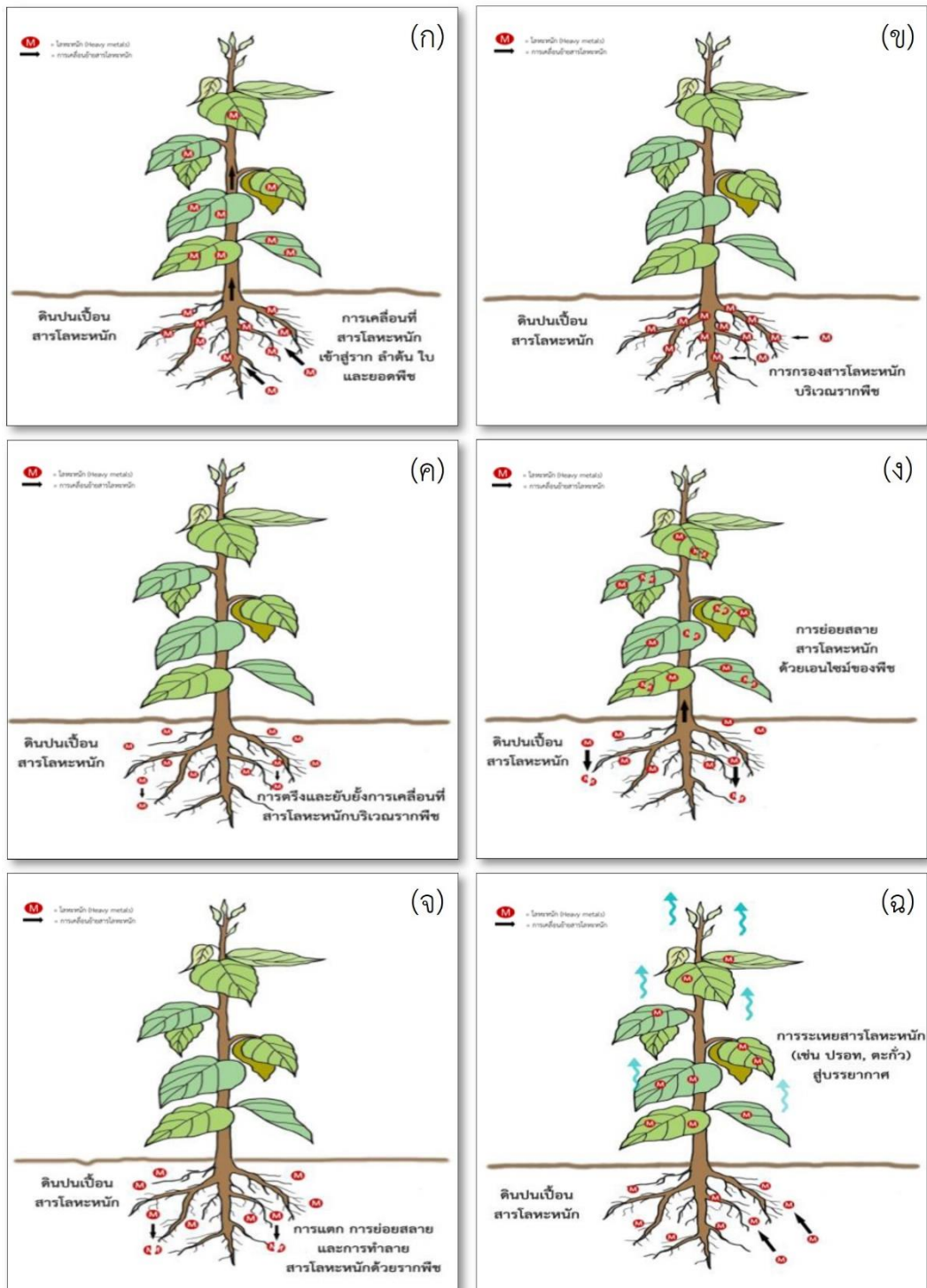
- 1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) หรือการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation) เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารมลพิษได้ในปริมาณมาก (Hyperaccumulator) ในการดูดซับสารมลพิษให้เคลื่อนย้ายออกจากตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) โดยเริ่มจากรากพืชดูดซับสารมลพิษจากตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมเข้าไปสะสมไว้ในเซลล์ของรากพืชในอัตราที่สูง จากนั้นจะมีกลไกในการเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ขนส่งได้ง่ายเพื่อที่จะเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืช กลไกดังกล่าวทำให้พืชกลุ่มนี้มีความทนทานต่อความเข้มข้นของสารมลพิษในระดับที่สูงกว่าระดับปกติของพืชทั่วไป และสามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีในสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารมลพิษ โดยพืชกลุ่มนี้จะสามารถสะสมสารมลพิษได้สูงกว่าพืชทั่วไปในระดับความเข้มข้นของสารมลพิษในช่วง 100 - 1,000 เท่า นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับสารมลพิษเข้าสู่ส่วนใต้ดิน หรือปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration Factor, BCF) และความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากส่วนใต้ดินขึ้นสู่ส่วนเหนือดินของพืช หรือปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษ (Translocation Factor, TF) ของพืชกลุ่มนี้ถูกรายงานว่ามีค่า >1 (Souri et al., 2017) โดยส่วนใหญ่พืชจะมีความทนทานและสามารถดูดซับและสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ทั้งนี้ในปัจจุบันมีพืช 721 ชนิด ที่ถูกจัดให้เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก โดยมีพืชเพียง

บางชนิดเท่านั้นที่สามารถสะสมโลหะหนักในปริมาณมากได้มากกว่า 1 ชนิด (Reeves et al., 2018) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

2) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration) เป็นการนำพืชที่มีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำผิวดิน น้ำเสีย และดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำสูง รวมทั้งการบำบัดสารมลพิษด้วยการใช้พืชที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ (Hydroponics) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข) โดยพืชจะกรอง ดูดซับ และดูดซับสารมลพิษที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบบริเวณโดยรอบให้เข้าไปในรากของพืช ดังนั้น สารมลพิษจึงสะสมอยู่เฉพาะในส่วนของรากพืช โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืช ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวลำต้น ใบ และดอกของพืช ไปใช้ประโยชน์อื่นได้ตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้การกรองสารมลพิษด้วยรากพืชในพื้นที่ปนเปื้อนจริงยังช่วยยับยั้งหรือชะลอการเคลื่อนที่ของสารมลพิษไปยังชั้นน้ำบาดาลได้อีกด้วย

3) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) เป็นการนำพืชที่มีความสามารถในการควบคุมหรือลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินหรือน้ำใต้ดินด้วยการตรึงหรือการยึดสารมลพิษไว้ที่รากพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ค) โดยพืชจะทำให้สารมลพิษเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรด้วยการดูดซับ การตกตะกอน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) หรือการรีดิวซ์วาเลนซ์ของโลหะ (Metal Valence Reduction) ยกตัวอย่างเช่น การที่พืชหลั่งเอนไซม์เพื่อเปลี่ยนโครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ให้อยู่ในรูปของโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Cr^{3+}) ซึ่งเป็นรูปที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้และมีความเป็นพิษน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการตรึงสารมลพิษด้วยพืชสามารถใช้ได้ผลเพียงชั่วคราว เนื่องจากการควบคุมสารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ไม่เคลื่อนที่และไม่เป็นพิษนั้นทำได้ยาก และเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ หลายประการ อีกทั้งวิธีการนี้ยังไม่ใช่การกำจัดสารมลพิษออกจากพื้นที่ปนเปื้อน แต่เป็นเพียงการควบคุมหรือลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษเท่านั้น ทำให้วิธีการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อนเพื่อทำให้สารมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงมีระดับความเป็นพิษลดลง รวมทั้งยังช่วยลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากการพัดพาโดยลม การเคลื่อนย้ายผิวดิน และการชะล้างสารมลพิษลงสู่ดิน

4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation) หรือการเปลี่ยนรูปสารมลพิษด้วยพืช (Phytotransformation) เป็นการนำพืชที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษที่ปนเปื้อนด้วยการดูดซับสารมลพิษเข้าไปแล้วย่อยสลายด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ง) โดยพืชจะหลั่งเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารมลพิษ หรือเปลี่ยนสารมลพิษให้อยู่ในรูปที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อไปได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถใช้ได้ผลเฉพาะสารมลพิษอินทรีย์ เช่น สารกำจัดวัชพืช ยาฆ่าแมลง เนื่องจากโลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



รูปที่ 2.7 ประเภทของการบำบัดด้วยพืช; (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกักเก็บสารมลพิษด้วยรากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558a)

ตารางที่ 2.5 ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักและชนิดของพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก

ชนิดของโลหะหนัก	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	จำนวนชนิดของพืช ที่มีการรายงาน	ชนิดของพืชที่มีปริมาณการ สะสมสูงที่สุดที่มีการรายงาน
แมงกานีส (Mn)	> 10,000	42	<i>Virotia neurophylla</i>
สังกะสี (Zn)	> 3,000	20	<i>Noccaea caerulescens</i>
สารหนู (As)	> 1,000	5	<i>Pteris vittata</i>
นิกเกิล (Ni)	> 1,000	532	<i>Berkheya coddii</i>
ตะกั่ว (Pb)	> 1,000	8	<i>Noccaea rotundifolia</i> <i>subsp. cepaeifolia</i>
แลนทานัม (La) และ ซีเลียม (Ce)	> 1,000	2	<i>Dicranopteris linearis</i>
ทองแดง (Cu)	> 300	53	<i>Aeolanthus biformifolius</i>
โคบอลต์ (Co)	> 300	42	<i>Haumaniastrum robertii</i>
โครเมียม (Cr)	> 300	1	-
แคดเมียม (Cd)	> 100	7	<i>Arabidopsis halleri</i>
ซีลีเนียม (Se)	> 100	41	<i>Astragalus bisulcatus</i>
เทลลูเรียม (Tl)	> 100	2	<i>Biscutella laevigata</i>

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reeves et al. (2018)

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation) เป็นการใชพืชที่มีความสามารถในการกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช (Rhizosphere) เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารมลพิษ ดังแสดงในรูปที่ 2.7(จ) โดยรากพืชที่ยังมีชีวิตจะหลั่งสารประกอบต่างๆ เช่น กรดอินทรีย์ น้ำตาล แอลกอฮอล์ และกรดอะมิโน ทำให้ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนบริเวณรอบรากพืชเพิ่มขึ้น เกิดการเพิ่มจำนวนประชากรจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช และเกิดการกระตุ้นให้จุลินทรีย์เหล่านี้ใช้สารมลพิษเป็นแหล่งอาหารทำให้สารมลพิษมีความเข้มข้น หรือความเป็นพิษลดลง

6) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization) เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินหรือในน้ำออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ฉ) โดยพืชจะดูดซับน้ำปนเปื้อนสารมลพิษไปยังใบพืชและระเหยกลายเป็นไอออกสู่

บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษในระดับต่ำ หรือการทำให้สารมลพิษที่มีความสามารถในการระเหยได้เคลื่อนย้ายจากดินโดยอาศัยแรงดึงดูดจากการคายน้ำแล้วปล่อยออกทางใบ วิธีนี้ใช้ได้ผลกับสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนักบางชนิดที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ เช่น โปรท และซีลีเนียม เป็นต้น

2.2.2 คุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช

พืชแต่ละชนิดมีความทนทานและตอบสนองต่อสารมลพิษที่แตกต่างกันออกไป โดยในกรณีของโลหะหนักที่มีรูปทางเคมีและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และปริมาณโลหะหนักอื่นๆ เป็นต้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักของพืชแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมที่เจริญเติบโต อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของพืชแต่ละชนิดที่ต่างกันจึงทำให้ชนิดของพืชถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับและสะสมโลหะหนัก โดย พันธวัช สัมพันธ์พานิช (2558a) ได้เสนอว่า พืชที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดโลหะหนักควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- 1) พืชมีความสามารถในการดูดซับ สะสม และทำลายโลหะหนักจากดิน และน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ในระดับความเข้มข้นที่สูง
- 2) พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี หรือมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และมีความทนทานต่อปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ได้ดี รวมทั้งทนทานต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้สูง
- 3) พืชที่ไม่แสดงอาการความเป็นพิษเมื่อเจริญเติบโตในดินและน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก
- 4) พืชต้องมีความง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา
- 5) พืชมีวงจรชีวิตสั้น ขยายพันธุ์ได้ดี และมีปริมาณมวลชีวภาพมาก
- 6) พืชที่คนและสัตว์กินไม่ได้ เช่น วัชพืช เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักเข้าไปในห่วงโซ่อาหาร จนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้
- 7) พืชมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ และทำการเคลื่อนย้ายเข้าสู่เซลล์ของพืชได้

คุณสมบัติของพืชที่กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับ Ali et al. (2013) ที่ระบุถึงคุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการสกัดโลหะหนักด้วยพืช และได้ระบุคุณสมบัติเพิ่มเติม คือ ระบบรากของพืชควรมีการกระจายตัวและแตกแขนงได้ดี และพืชจะต้องมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากส่วนใต้ดินขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน

2.2.3 ข้อจำกัดของการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช

การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชเป็นกระบวนการที่มักถูกเลือกใช้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อย่างไรก็ตามพบว่า การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชมีข้อจำกัดที่จะต้องพิจารณาก่อนนำไปใช้ในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ (Ali et al., 2013; Gomes, 2012; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558a) ดังนี้

- 1) พืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารมลพิษได้ในปริมาณมากส่วนใหญ่จะมีอัตราการเจริญเติบโตและมีมวลชีวภาพต่ำ
- 2) การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดโลหะหนักที่สะสมอยู่ลึกลงไปเกินกว่าบริเวณรากพืชได้
- 3) การบำบัดโลหะหนักด้วยพืช สามารถบำบัดโลหะหนักได้เฉพาะที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้ (Phytoavailable) เท่านั้น
- 4) การบำบัดโลหะหนักด้วยพืช มีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะหนักในระดับต่ำถึงระดับปานกลาง เนื่องจากพืชส่วนใหญ่ไม่สามารถเจริญเติบโตในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักรุนแรงได้
- 5) การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของพืชแต่ละชนิด ทำให้ใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่ยาวนานกว่ากระบวนการบำบัดทางเคมีกายภาพ และไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในระยะเวลาจำกัดได้
- 6) การบำบัดโลหะหนักด้วยพืช มีความเสี่ยงที่จะเกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร หากไม่มีการจัดการและการดูแลที่เหมาะสม

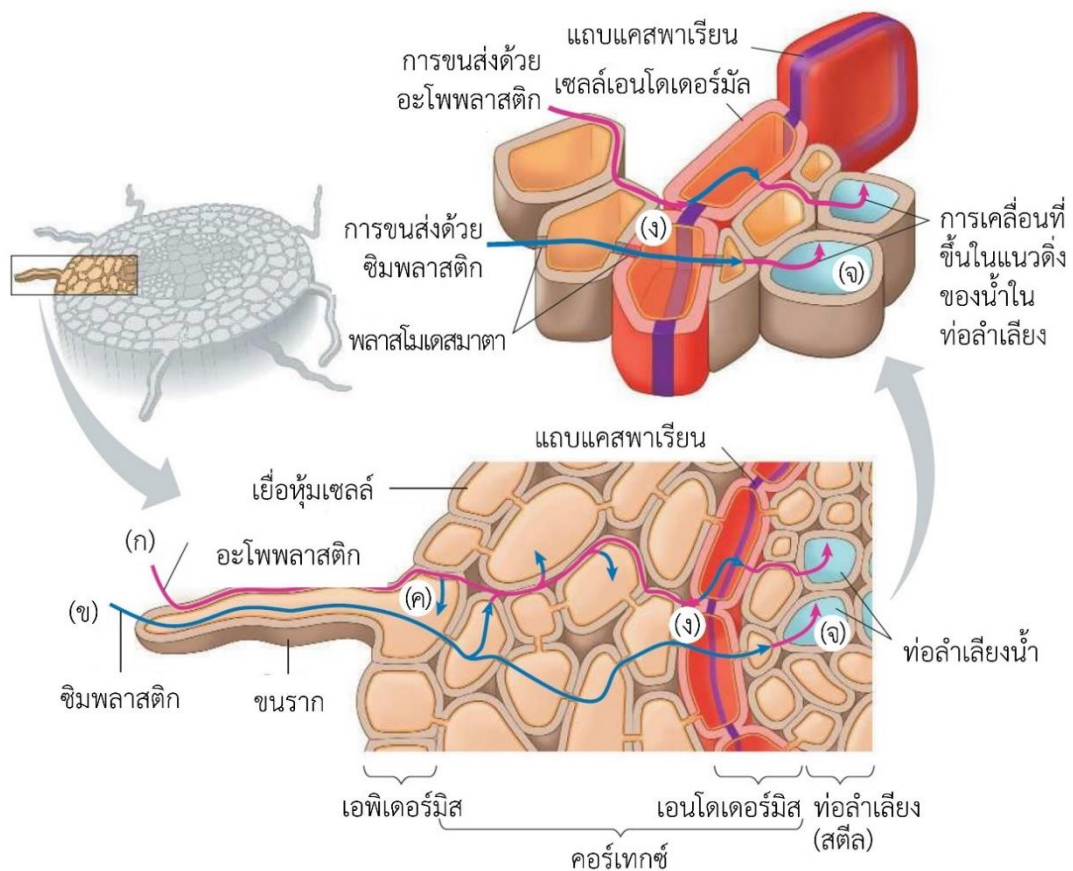
2.2.4 กลไกการดูดซับโลหะหนักของพืช

การดูดซับโลหะหนักของพืชเกิดขึ้นพร้อมกับการดูดตึงน้ำและธาตุอาหารโดยรากพืช จากลักษณะทางกายภาพของรากพืชที่มีการแตกแขนงและมีขนราก (Root Hair) จำนวนมากที่ส่วนปลายของราก ทำให้รากพืชมีพื้นที่ผิวสัมผัสปริมาณมากและสามารถดูดตึงน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในดินด้วยกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขนรากถูกพัฒนาขึ้นมาจากเซลล์ในชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดที่มีการจัดเรียงตัวของเซลล์ในลักษณะที่เรียงชิดติดต่อกันเพียงชั้นเดียว ผนังเซลล์บาง ภายในเซลล์ไม่มีคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) แต่มีแวคิวโอลขนาดใหญ่ ซึ่งโดยปกติจะมีสารละลายความเข้มข้นสูงกักเก็บอยู่ภายใน ทำให้พืชสามารถดูดตึงน้ำและสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าเข้าสู่เซลล์รากได้ตลอดเวลา ในทางกลับกัน หากสารละลายภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายภายในเซลล์ จะส่งผลให้รากพืชไม่

สามารถดูดดึงน้ำและธาตุอาหารได้ โดยการดูดดึงน้ำและธาตุอาหารรวมถึงสารละลายโลหะหนักนั้น รากพืชจะลำเลียงเข้าทางด้านข้าง (Lateral Transport) ด้วยการดูดดึงทางขนรากผ่านเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์ (Cortex) เอนโดเดอร์มิส (Endodermis) และสตีล (Stele) ซึ่งเป็นชั้นเนื้อเยื่อที่มีท่อลำเลียง (Vascular Cylinder) เป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้สามารถแบ่งกลไกการดูดดึงน้ำและสารละลายธาตุอาหารของพืชออกเป็น 2 เส้นทาง (Barberon & Geldner, 2014; Urry et al., 2020; พันธุ์ศรีสัมพันธ์พานิช, 2558a) ดังนี้

1) อะโพลลาสติก (Apoplastic Pathway) เป็นการขนส่งที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Passive Transport) ของเซลล์พืช โดยน้ำและสารละลายธาตุอาหารจะแพร่ไปตามผนังเซลล์ (Cell Wall) และช่องว่างระหว่างเซลล์ (Extracellular Spaces) โดยอัตราการแพร่จะขึ้นอยู่กับค่าศักย์ของน้ำ (Water Potential) และแรงดันของน้ำภายในเซลล์ราก อย่างไรก็ตาม น้ำและสารละลายธาตุอาหารจะไม่สามารถผ่านเข้าสู่ท่อลำเลียงได้ เนื่องจากในชั้นเอนโดเดอร์มิสจะมีแถบแคสพาเรียน (Casparian Strip) ที่เกิดจากสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำจำพวกซูเบอร์ริน (Suberin) หรือลิกนิน (Lignin) เคลือบเป็นวงแหวนล้อมรอบเซลล์ขวางกันอยู่ โดยแถบแคสพาเรียนมีหน้าที่ป้องกันสารพิษเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อลำเลียง และป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำและสารละลายธาตุอาหาร ทั้งนี้ น้ำและสารละลายธาตุอาหารยังสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) ของเซลล์หนึ่งเข้าสู่อีกเซลล์หนึ่งได้โดยไม่ผ่านพลาสโมเดสมตา (Plasmodesmata) ที่เป็นช่องทางที่เชื่อมต่อระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกัน โดยเรียกการขนส่งลักษณะนี้ว่า Coupled Trans-Cellular Pathway หรือ Transmembrane Route ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในเนื้อเยื่อเอพิเดอร์มิสและคอร์เทกซ์ หลังจากนั้นน้ำและธาตุอาหารจะถูกขนส่งเข้าสู่ท่อลำเลียงต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8

2) ซิมพลาสติก (Symplastic Pathway) เป็นเส้นทางที่เกี่ยวข้องกับทั้งการขนส่งที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Passive Transport) และการขนส่งที่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Active Transport) ของเซลล์พืช โดยน้ำและสารละลายธาตุอาหารจะถูกขนส่งผ่านของเหลวภายในเซลล์ (Cytosol) ของเซลล์หนึ่งเข้าสู่อีกเซลล์หนึ่งผ่านพลาสโมเดสมตาที่เป็นช่องขนาดเล็กจำนวนมากที่อยู่บนผนังเซลล์ ส่งผลให้น้ำและสารละลายธาตุอาหารรวมทั้งโลหะหนักและสารมลพิษอื่นๆ สามารถเคลื่อนย้ายผ่านเนื้อเยื่อเอนโดเดอร์มิสเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ได้ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดน้ำและธาตุอาหารของพืช; (ก) อะโพพลาสติก (ข) ซิมพลาสติก (ค) Coupled Trans-Cellular Pathway (ง) การควบคุมการเคลื่อนที่เข้า-ออกของสารประกอบในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส และ (จ) การขนส่งในท่อน้ำเลี้ยงน้ำ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Urry et al. (2020)

2.2.5 การดูดน้ำและสะสม และการเคลื่อนย้ายสารหนูในพืช

การดูดน้ำและสะสมสารหนูของพืชสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในรูปแบบการขนส่งที่ต้องใช้และไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทางเคมีของสารหนูในสิ่งแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโตอยู่ โดยเมื่อรากพืชดูดน้ำและสารหนูเข้าสู่เซลล์รากพืชแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปสารหนูและขนส่งไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งเป็นกลไกการลดความเป็นพิษ (Detoxification) โดยทั่วไปของพืชสามารถอธิบายการดูดน้ำและสะสม และการเคลื่อนย้ายสารหนูในพืชตามรูปทางเคมีของสารหนูได้ ดังนี้

1) อาร์เซนิต มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับฟอสเฟต (Phosphate) ทำให้ถูกดูดน้ำเข้าสู่เซลล์ราก (Root Cell) ผ่านตัวขนส่งฟอสเฟต (Phosphate Transporter) ซึ่งเป็นการขนส่งที่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยอาร์เซนิตจะถูกตรึงไว้ในรูปของอาร์เซนิตอย่าง

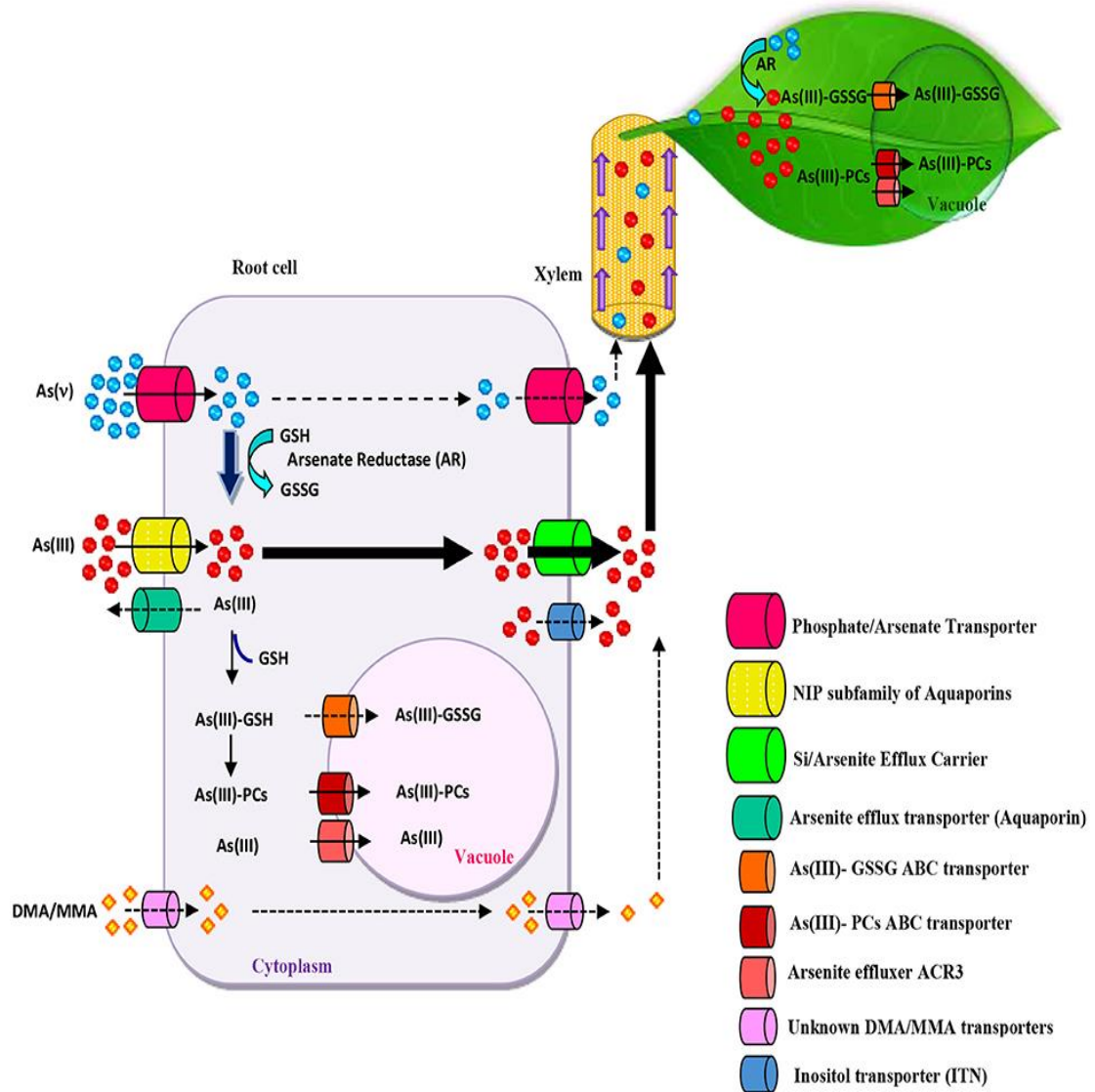
รวดเร็วด้วยการทำงานของเอนไซม์อาร์เซนเรดักเตส (Arsenate Reductase) โดยใช้กลูตาไธโอน (Glutathione, GSH) เป็นตัวรีดิวซ์ อย่างไรก็ตามอาจมีอาร์เซนบางส่วนไม่ถูกรีดิวซ์และเคลื่อนย้ายเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำผ่านตัวขนส่งฟอสเฟต ในกรณีพืชที่มีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก (Arsenic Hyperaccumulator) อาร์เซนส่วนใหญ่จะถูกขนส่งด้วยตัวพาซิลิกอน (Silicon Efflux Carrier) และตัวขนส่งอินซิทอล (Inositol Transporter) เข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ ส่วนที่เหลือจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไฟโตคีเลติน (Phytochelatins, PCs) หรือกลูตาไธโอน (Glutathione, GSH) เพื่อเปลี่ยนอาร์เซนให้อยู่ในรูปสารหนูอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษลดลง และถูกขนส่งไปกักเก็บในแวคิวโอลในเซลล์ราก ทั้งนี้อาจมีบางส่วนถูกขนส่งออกนอกเซลล์รากด้วยตัวขนส่งอาร์เซไนต์ (Arsenite Efflux Transporter) ผ่านทางอะควาพอริน (Aquaporin) ซึ่งเป็นโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางผ่านของน้ำ (Farooq et al., 2016; Han et al., 2017; Roy et al., 2015; Sourı et al., 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในขณะที่พืชที่ไม่มีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก (Arsenic Non-hyperaccumulator) จะกักเก็บอาร์เซไนต์ในแวคิวโอลในเซลล์รากได้มากกว่าการเคลื่อนย้ายอาร์เซไนต์เข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Sourı et al., 2017) โดยอาร์เซนและอาร์เซไนต์ในท่อลำเลียงน้ำจะถูกขนส่งขึ้นไปสะสมอยู่ที่ใบพืช จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง และถูกกักเก็บอยู่ในแวคิวโอลในใบพืชเช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นที่ราก

2) อาร์เซไนต์ ถูกดูดตั้งเข้าสู่เซลล์รากด้วยการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์บริเวณช่องทางผ่านของน้ำที่เรียกว่า Nodulin-26-like Intrinsic Membrane Protein (NIPs) ที่เป็นวงศ์ย่อยของอะควากลิเซอโรพอริน (Aquaglyceroporin) ซึ่งเป็นโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการผ่านของน้ำและสารละลายขนาดเล็กที่ไม่มีประจุ ดังนั้นการดูดตั้งอาร์เซไนต์จึงเป็นการขนส่งที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยอาร์เซไนต์ส่วนใหญ่ในสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของกรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับกรดซิลิสิก (H_4SiO_4) ทำให้การดูดตั้งอาร์เซไนต์เกี่ยวข้องกับการดูดตั้งซิลิกา (Si) และเมื่ออาร์เซไนต์เข้าสู่เซลล์รากจะสามารถถูกขนส่งเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำได้อย่างรวดเร็วด้วยตัวพาซิลิกอน ในขณะที่การขนส่งอาร์เซไนต์อิสระและอาร์เซไนต์ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับไฟโตคีเลตินและกลูตาไธโอนเพื่อไปกักเก็บในแวคิวโอลจะเกิดจากการทำงานของตัวขนส่ง Arsenite Effluxer ACR3, Arsenite-PCs ABC Transporter และ Arsenite-GSSG ABC Transporter (Farooq et al., 2016; Han et al., 2017; Roy et al., 2015; Sourı et al., 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

3) สารหนูอินทรีย์ เป็นรูปทางเคมีของสารหนูที่พบได้ในปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งรากพืชยังดูดตั้งสารหนูอินทรีย์ทั้งในรูปของโมนอเมทิลอาร์ซีน (Monomethylarsine, MMA) และไดเมทิลอาร์ซีน (Dimethylarsine, DMA) ด้วยการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้เพียงเล็กน้อย และยัง

ไม่สามารถระบุตัวขนส่งได้อย่างชัดเจน แต่มีความเป็นไปได้ที่รากพืชจะดูดดึงสารหนูอินทรีย์ในช่องทางเดียวกันกับการดูดดึงอาร์เซนไนต์ อย่างไรก็ตามเมื่อถูกดูดดึงเข้าสู่เซลล์รากพืชแล้วสารหนูอินทรีย์จะถูกขนส่งเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำได้อย่างรวดเร็ว (Farooq et al., 2016; Souri et al., 2017)

การเคลื่อนย้ายสารหนูของพืชเกี่ยวข้องกับการขนส่งอาร์เซนไนต์โดยท่อลำเลียงน้ำ ทำให้รูปทางเคมีของสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอาร์เซนไนต์ (Farooq et al., 2016) โดยอาร์เซนไนต์เหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารหนูอินทรีย์ด้วยกระบวนการเมทิลเลชันและขนส่งไปกักเก็บในแวคิวโอล อย่างไรก็ตามในกรณีที่พืชได้รับสารหนูในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนจากกระบวนการเมทิลเลชัน (Methylation) ของอาร์เซนไนต์ปริมาณมาก นำไปสู่การทำลายเซลล์จากการเกิดออกซิเดชันกับไขมัน โปรตีน และกรดไดออกซีไรโบนิวคลีอิกแอซิด (Deoxyribonucleic Acid, DNA) และทำให้พืชตกอยู่ในภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative Stress) ทั้งนี้พืชจะตอบสนองต่อภาวะดังกล่าวเพื่อปกป้องเซลล์ไม่ให้ถูกทำลายโดยการกำจัดอนุมูลอิสระของออกซิเจนด้วยสารต้านอนุมูลอิสระที่สังเคราะห์ขึ้น ได้แก่ กลูตาไธโอน (Glutathione) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และแอสคอร์เบต (Ascorbate) ในกรณีของการนำกลูตาไธโอนซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฟโตคีเลตินไปใช้ในการปกป้องเซลล์ จะส่งผลต่อการสังเคราะห์ไฟโตคีเลตินซึ่งมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อภาวะเครียดออกซิเดชันและความเป็นพิษของโลหะหนักลดลง และนำไปสู่การแสดงความเป็นพิษของสารหนูในพืชในท้ายที่สุด (Meharg & Hartley-Whitaker, 2002; จอมจันทร์ นทีวัฒนา, 2557)



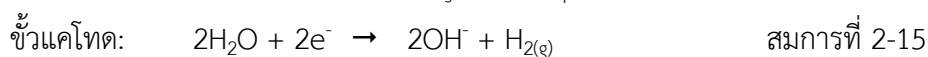
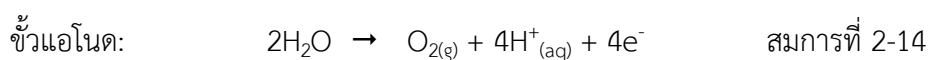
รูปที่ 2.9 การดูดซับ (Uptake) การขนส่ง (Transport) การเคลื่อนย้าย (Translocation) และการลดความเป็นพิษ (Detoxification) ของสารหนูผ่านทางท่อลำเลียงน้ำของพืช
ที่มา: Souri et al. (2017)

2.3 การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetics) เป็นเทคโนโลยีการบำบัดที่นำมาประยุกต์ใช้การบำบัดสารมลพิษทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในดินและน้ำใต้ดิน โดยถูกเรียกในหลายชื่อ เช่น Electrokinetic Remediation, Electrochemical Remediation, Electroremediation และ Electroreclamation เป็นต้น การบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงในระดับต่ำผ่านขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ติดตั้งอยู่ในดินหรือน้ำใต้ดิน ซึ่งจะทำให้น้ำ ไอออน และอนุภาคขนาดเล็กระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ นอกจากนี้สนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่เกิดขึ้นจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) ระหว่างขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (Anode) และขั้วลบหรือขั้วแคโทด (Cathode) ยังชักนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้สารมลพิษเกิดการเปลี่ยนรูป (Cameselle, 2015; Cameselle et al., 2013; Reddy & Cameselle, 2009; ศรีลาวัช ดำรงค์ศิริ, 2562) และจากการติดตั้งขั้วไฟฟ้าที่ไม่มีความซับซ้อนทำให้เทคโนโลยีนี้มีรายงานการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ 1) ดำเนินการบำบัดได้ทั้งใน (In-situ) และนอก (Ex-situ) พื้นที่ปนเปื้อน 2) บำบัดได้ทั้งดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ (Low Permeability) และดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogenous) 3) บำบัดได้ทั้งดินที่อิ่มตัว (Saturated) และไม่อิ่มตัว (Unsaturated) 4) บำบัดได้ทั้งดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก นิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclide) สารอินทรีย์ และสารผสม และ 5) สามารถบำบัดร่วมกับเทคโนโลยีการบำบัดอื่นๆ ได้ง่าย (Reddy & Cameselle, 2009) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดยังคงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในกากโลหะกรรม ดินตะกอน (Sediment) และเถ้าลอย (Fly Ash) (Ottosen et al., 2009)

2.3.1 กลไกการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากจลนศาสตร์ไฟฟ้าก่อให้เกิดกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Water Electrolysis) โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ที่ขั้วแอโนด ดังแสดงในสมการที่ 2-14 และการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ที่ขั้วแคโทด ดังแสดงในสมการที่ 2-15 (Cameselle, 2015; Reddy & Cameselle, 2009)

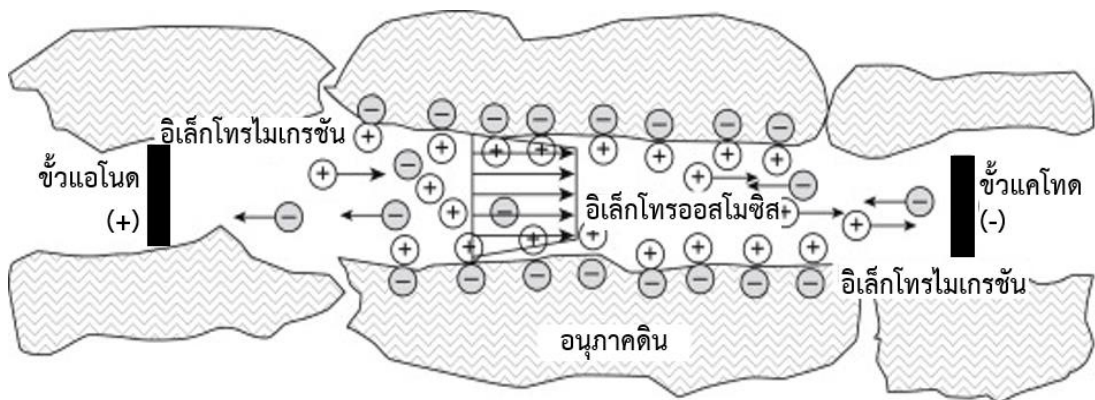


ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทำให้ที่ขั้วแอโนดเกิดสภาวะกรด (Acidification) จากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในขณะที่ขั้วแคโทดเกิดสภาวะด่าง (Alkalization) จากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ทั้งนี้ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนที่ของ H^+ ไปยังขั้วแคโทด และ OH^- ไปยังขั้วแอโนด (Cameselle, 2015; Reddy & Cameselle, 2009) การเกิดสภาวะกรดและสภาวะด่างรวมทั้งการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันของไอออนทั้งสองชนิดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สารมลพิษเกิดการเปลี่ยนรูปร่างทางเคมี การชะละลาย (Dissolution) การคายซับ (Desorption) การดูดซับ (Adsorption) และการตกตะกอน (Precipitation) (Cameselle, 2015) อย่างไรก็ตามการขยายตัวของสภาวะกรดจะเกิดขึ้นได้มากกว่าสภาวะด่าง ทั้งนี้เนื่องจาก H^+ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่า OH^- ถึงสองเท่า (Cameselle, 2015; Paz-Garcia et al., 2012; Reddy & Cameselle, 2009) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้ชักนำให้สารมลพิษเกิดการเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าได้ด้วยกลไกการเคลื่อนที่ที่สำคัญ ดังนี้

1) อิเล็กโทรออสโมซิส (Electroosmosis) เป็นกลไกการเคลื่อนที่แบบการพา (Advective) ที่เกิดจากการไหลสุทธิของน้ำ (Net Flux of Water) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินจะเคลื่อนที่ผ่านไปตามช่องรูพรุนในดินโดยแรงกระทำจากสนามไฟฟ้า กลไกการเคลื่อนที่นี้จะมีทิศทางการไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เนื่องจากโดยทั่วไปอนุภาคของดินในสิ่งแวดล้อมจะมีซิลิเกต (SiO_4^{4-}) เป็นองค์ประกอบหลักทำให้พื้นผิวมีประจุเป็นลบส่งผลให้เกิดการสะสมไอออนบวก (Cation) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างพื้นผิวของอนุภาคดินและน้ำในดิน โดยมีลักษณะการจัดเรียงตัวของไอออนเป็น 2 ชั้น ที่เรียกว่า Electrical Double Layer ประกอบด้วย 1) ชั้นในที่เรียกว่า Stern Layer ซึ่งอยู่ติดกับพื้นผิวของอนุภาคดิน มีความคงตัวสูงเนื่องจากได้รับอิทธิพลทางไฟฟ้าจากพื้นผิวของอนุภาคดิน และ 2) ชั้นนอกที่เรียกว่า Diffuse Layer ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของไอออนกระจายอยู่ห่างออกไปในน้ำ และได้รับแรงกระทำจากพื้นผิวของอนุภาคดินน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยในกรณีทั่วไปไอออนบวกใน Diffuse Layer จะเคลื่อนที่ขนานไปกับพื้นผิวของอนุภาคดินจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และชักนำให้น้ำและสารละลายในดินเกิดการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น ความเข้มข้นของไอออนใน Diffuse Layer จึงส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรออสโมซิส (Cameselle, 2015; Reddy & Cameselle, 2009; ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2562)

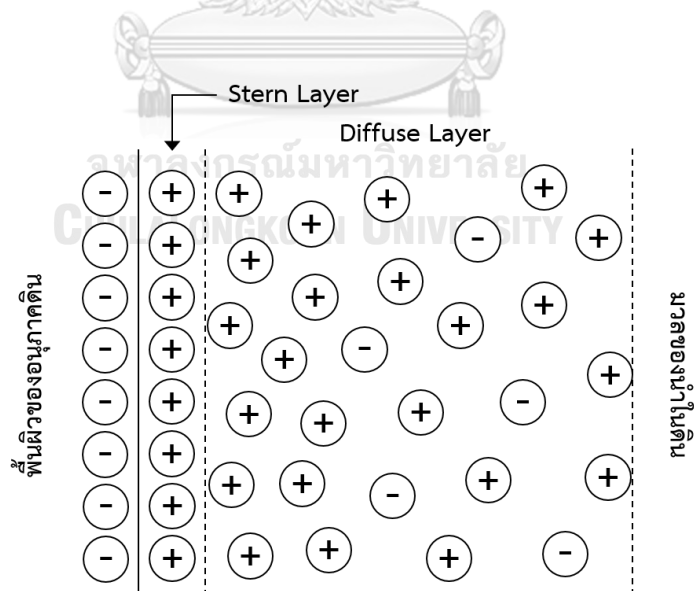
2) อิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) เป็นกลไกการเคลื่อนที่ของไอออนในดินไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้าม กล่าวคือ ไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่ไอออนลบ (Anion) เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กลไกการเคลื่อนที่แบบนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ H^+ และ OH^- จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โลหะหนักในรูปที่มีประจุ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่แตกตัวอยู่ในรูปที่มีประจุได้ โดยขนาดรูพรุน (Pore Size) ของดินจะไม่ส่งผลต่อการ

เคลื่อนที่ ทำให้กลไกการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรโมเกรชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในดินที่มีอนุภาคหยาบ (Coarse-grained Soil) และดินที่มีอนุภาคละเอียด (Fine-grained Soil) อย่างไรก็ตามอัตราการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรโมเกรชันขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความพรุนของดิน ขนาดของสนามไฟฟ้า ความเข้มข้นของไอออน และการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามของไอออนชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในดิน (Cameselle, 2015; Ottosen et al., 2009; Reddy & Cameselle, 2009)



รูปที่ 2.10 กลไกการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรออสโมซิสและอิเล็กโทรโมเกรชัน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Cameselle (2015)



รูปที่ 2.11 ลักษณะของการสะสมและการจัดเรียงตัวของไอออนแบบ 2 ชั้น

(Electric Double Layer) ที่เกิดขึ้นในดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Cameselle (2015)

2.3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การบำบัดสารปนเปื้อนในดินด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีต้นทุนในการบำบัดต่ำกว่ากระบวนการบำบัดทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ได้แก่ การทำให้เป็นแก้ว (Vitrification) การฝังกลบ (Landfilling) และกระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) (Lobo Bedmar et al., 2009) อย่างไรก็ตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงไปตามระยะเวลา ทั้งนี้ Yeung and Gu (2011) ได้แนะนำวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าโดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) การเพิ่มการชะละลายของสารปนเปื้อน เป็นการทำให้สารปนเปื้อนในดินในรูปที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคดิน หรือตกตะกอนอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายได้ซึ่งสามารถทำได้โดย

- การลดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน เนื่องจากโดยทั่วไปดินในธรรมชาติจะมีความจุบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) สูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้น้อย ทำให้สภาวะกรดที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้สารปนเปื้อนถูกชะละลายได้มากพอ โดยเฉพาะโลหะหนักที่ส่วนใหญ่จะละลายได้ดีในสภาวะกรด ทั้งนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารละลายกรดอ่อน หรือสารละลายกรดแก่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม Reddy and Cameselle (2009) ได้อธิบายว่า การขยายตัวของสภาวะกรดจากขั้วแอโนดที่มากเกินไปจะส่งผลให้ดินในระบบส่วนใหญ่มีความเป็นกรด และทำให้กลไกการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโทรออสโมซิสลดลง หรืออาจเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเป็นการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ในที่สุด

- การใช้สารช่วยเร่ง (Enhancing Agent) ในกรณีที่การลดค่าความเป็นกรด-ด่างของดินดำเนินการได้ยาก หรือก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพดิน สามารถเลือกใช้สารช่วยเร่งในการชะละลายให้มีความเหมาะสมตามชนิดของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน ได้แก่ สารคีเลต (Chelating Agent) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ตัวทำละลายร่วม (Cosolvent) สารออกซิไดส์/รีดิวส์ (Oxidizing/ Reducing Agent) และสารละลายไอออนบวก (Cation Solution)

2) การใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Membrane) เพื่อคัดเลือกเฉพาะไอออนที่ต้องการเข้าสู่ระบบ โดยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Membrane) จะยอมให้ไอออนบวกเท่านั้นที่จะผ่านไปได้ ในขณะที่เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Membrane) จะยอมให้ไอออนลบเท่านั้นที่จะผ่านไปได้ ดังนั้น ในกรณีที่มีการติดตั้งเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนบวกกั้นกลางระหว่างดินปนเปื้อนและบ่อเก็บสารแคโทไลต์ (Catholyte) ที่มีขั้วแคโทดการติดตั้งอยู่ จะทำให้โลหะไอออนบวกที่ปนเปื้อนอยู่ในดินเคลื่อนที่ผ่านออกไปได้โดยไม่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักในรูปของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดไม่สามารถ

เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ระบบได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพที่ลดลงตามระยะเวลาจากการอุดตันของตะกอนต่างๆ บนพื้นผิวของเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน

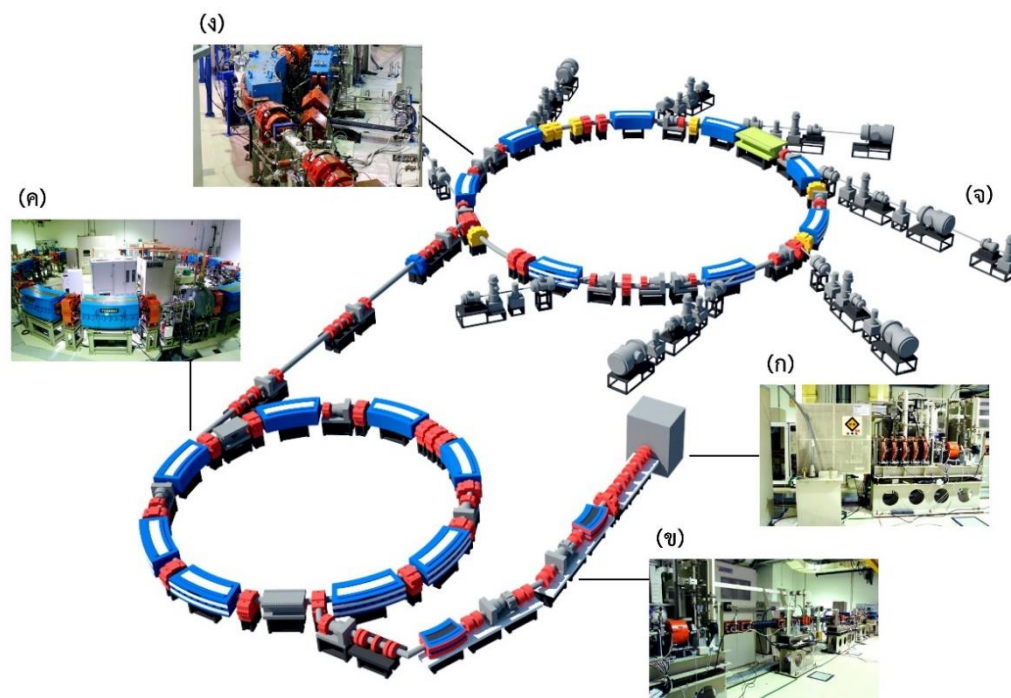
3) การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับเทคโนโลยีการบำบัดอื่น เนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีในการบำบัดดินและน้ำใต้ดินที่หลากหลาย โดยแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป การติดตั้งและการดำเนินการที่ไม่ซับซ้อนของจลนศาสตร์ไฟฟ้าทำให้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการบำบัดอื่นๆ ได้ง่าย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อจำกัด หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อน ทั้งนี้ Reddy and Cameselle (2009) และ Yeung and Gu (2011) ได้รวบรวมเทคโนโลยีการบำบัดที่มีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า คือ การฟื้นฟูด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน (Oxidation/Reduction Remediation) การปรับเสถียร (Stabilization) กำแพงบำบัด (Permeable Reactive Barrier) การฟื้นฟูทางชีวภาพ (Bioremediation) การบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) และการบำบัดด้วยความร้อน (Thermal Treatment)

2.4 แสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอน (Synchrotron Light) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุ ในที่นี้คือการที่อิเล็กตรอน (Electron, e^-) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงใกล้เคียงกับความเร็วแสง และถูกบังคับให้เลี้ยวเบนด้วยสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนที่ปลดปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ โฟตอน (Photon) ที่เรียกว่า แสงซินโครตรอน ที่มีความสว่างมากกว่าแสงจากดวงอาทิตย์กว่า 1 ล้านเท่า และครอบคลุม 4 ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่อินฟราเรด (Infrared) แสงที่ตามองเห็น (Visible Light) อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และรังสีเอกซ์ (X-rays) นอกจากนี้ลำแสงยังสามารถถูกบีบให้มีขนาดเล็กลงได้ในระดับไมโครเมตร จากคุณลักษณะของแสงซินโครตรอนที่มีความเข้มสูง มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ไม่ทำลายสารตัวอย่าง ลำแสงมีขนาดเล็ก และสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้ประโยชน์ได้ ทำให้แสงซินโครตรอนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาระดับโมเลกุลหรืออะตอมในงานวิจัยด้านต่างๆ เช่น การแพทย์ สิ่งแวดล้อม การเกษตร อาหาร โบราณคดี วัสดุศาสตร์ และอุตสาหกรรม เป็นต้น รวมไปถึงการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างนวัตกรรมใหม่ (Kopittke et al., 2017; สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), 2562) โดยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Source) มีอยู่มากกว่า 60 แห่งทั่วโลก สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนตั้งอยู่ 1 แห่ง ชื่อว่า เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam Photon Source) ซึ่งดำเนินงานภายใต้การดูแลของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

2.4.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

การผลิตแสงซินโครตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม เริ่มจากการผลิตอิเล็กตรอนจำนวนมหาศาลด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดของปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) จนร้อนเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงช่วยวกในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear Accelerator, LINAC) ซึ่งจะทำให้เร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงด้วยคลื่นไมโครเวฟให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) จากนั้นจะส่งต่อไปยังเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster Synchrotron) ซึ่งจะบังคับอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุเพื่อเพิ่มพลังงานอิเล็กตรอนให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในระยะเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือใกล้เคียงกับความเร็วแสง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงกักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอน (Storage Ring) และถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นในระดับ 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) ด้วยแม่เหล็กสองขั้ว (Dipole Magnet หรือ Bending Magnet) แม่เหล็กสี่ขั้ว (Quadruple Magnet) และแม่เหล็กหกขั้ว (Sextupole Magnet) ซึ่งจะบังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อสุญญากาศ โดยบริเวณแม่เหล็กบังคับเบี่ยงเบนสองขั้วที่ทำหน้าที่บังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่าแสงซินโครตรอน โดยระบบลำเลียงแสง (Beamlines) ซึ่งประกอบด้วยท่อสุญญากาศ (Vacuum) กระจกรวมแสง (Collimating Mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) กระจกโฟกัสแสง (Focusing Mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (Slit System) และอุปกรณ์ย่อยอื่นๆ จะทำหน้าที่นำและคัดเลือกแสงซินโครตรอนในช่วงพลังงานที่ต้องการไปยังสถานีทดลอง (Experimental Station) ต่อไป ทั้งนี้เมื่อแสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) ซึ่งจะถูกตรวจจับผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) จากนั้นข้อมูลต่างๆ ที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างของอะตอมต่อไป (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), 2562) สำหรับองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยามสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยาม; (ก) ปืนอิเล็กตรอน (ข) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (ค) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (ง) วงกักเก็บอิเล็กตรอน และ (จ) ระบบลำเลียงแสง
ที่มา: ดัดแปลงจาก <https://www.slri.or.th/th/what-is-synchrotron-light/for-research.html>

2.4.2 การใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของโลหะหนัก

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของธาตุต่างๆ ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray Absorption Spectroscopy, XAS) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Nondestructive Method) มีความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างในสภาพธรรมชาติได้ ซึ่งจะช่วยลดการเปลี่ยนรูปฟอร์มทางเคมีในขั้นตอนของการเตรียมสารตัวอย่าง ที่มีความแตกต่างจากเทคนิคเคมีวิเคราะห์อื่นๆ ที่จำเป็นต้องมีการเตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ (Foster & Kim, 2014; Kopittke et al., 2017; Kravtsova, 2020; วันทนา คล้ายสุบรรณ, 2549) โดยทั่วไปเทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์จะทำการฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Beam) ลงบนสารตัวอย่าง ทำให้สารตัวอย่างเกิดการตอบสนองอันเนื่องจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโฟตอนกับอะตอมในสารตัวอย่าง คือ การดูดกลืนรังสี (Photoelectric Absorption) และการกระเจิงรังสี (Scattering) ทั้งนี้การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะเป็นผลรวมของการดูดกลืนรังสีและการกระเจิงรังสี โดยเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์ หรือพลังงานโฟตอนมี

ค่าใกล้เคียงกับพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของอิเล็กตรอนในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสจะถูกกระตุ้นให้ย้ายจากชั้นพลังงานระดับลึก (Core Level) ในชั้น K หรือชั้น L1 - L3 ไปยังสถานะที่ว่างในชั้นพลังงานวงนอกสุดของอะตอม หรือชั้นวาเลนซ์ (Valence Shell) ทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีเอกซ์อย่างรวดเร็วของชั้นพลังงานระดับลึกที่มีสถานะที่ว่างอยู่ และปรากฏให้เห็นขอบของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray Absorption Edge) ในสเปกตรัมที่ค่าพลังงาน โฟตอนใกล้เคียงกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) จะกลับสู่สถานะพื้น (Ground State) โดยการย้ายอิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์กลับมายังชั้นพลังงานเดิมที่ว่างอยู่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอน หรือรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) เรียกกระบวนการนี้ว่า การเรืองรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Fluorescence อย่างไรก็ตามพลังงานที่คายออกมาอาจเกิดการชนกับอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานที่สูงกว่าทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนที่เรียกว่า Auger Electron Emission และเกิดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ในชั้นที่มีการสูญเสียอิเล็กตรอนได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นในทางปฏิบัติเทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์จึงสามารถทำการตรวจวัดสารตัวอย่างได้ 2 รูปแบบ คือ 1) การวัดแบบส่องผ่าน (Transmission Mode) ที่ทำการวัดปริมาณการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างจากความเข้มแสงที่ลดลงหลังจากลำรังสีส่องผ่านสารตัวอย่างโดยใช้เครื่องตรวจวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ (Ionization Chamber) และ 2) การวัดแบบเรืองแสง (Fluorescence Mode) ที่ทำการวัดความเข้มของการเรืองแสงที่เกิดขึ้นของสารตัวอย่างโดยใช้เครื่องตรวจวัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence Detector) โดยสเปกตรัมที่ได้จะประกอบด้วย 2 โครงสร้างหลัก (Kopittke et al., 2017; Zhang, 2019; วันทนา คล้ายสุบรรณ, 2549) ดังนี้

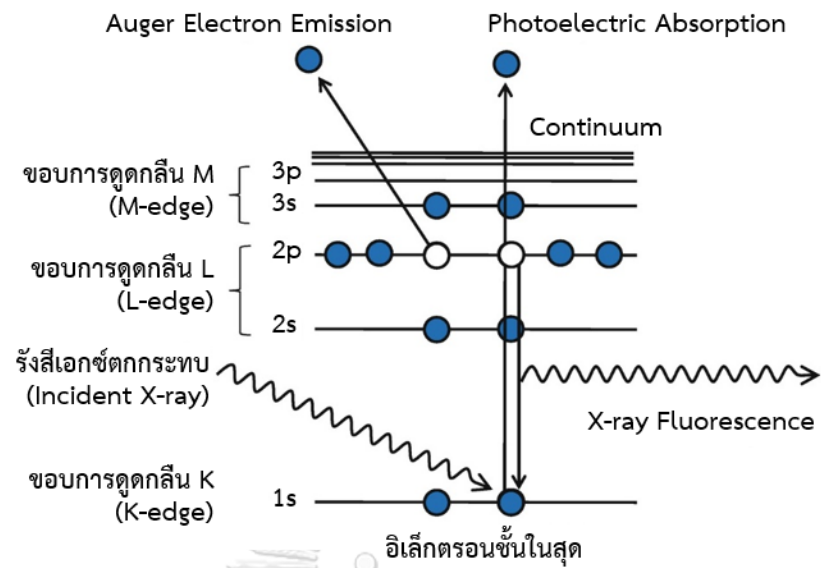
1) โครงสร้าง X-ray Absorption Near Edge Structure หรือ XANES ปรากฏอยู่ในสเปกตรัมของสัญญาณสเปกโทรสโกปีของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ ตั้งแต่บริเวณขอบการดูดกลืนรังสี (Absorption Edge, E_0) ของอะตอมจนถึงบริเวณช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 50 อิเล็กตรอนโวลต์เหนือขอบการดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 อะตอมของธาตุชนิดเดียวกันอาจมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่แตกต่างกันประมาณ 1 ถึง 10 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากขอบการดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะออกซิเดชันของอะตอม ทำให้โครงสร้าง XANES สามารถระบุสถานะออกซิเดชันของธาตุที่ทำการวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ชนิดเคมีของอะตอม (Fingerprint) และแยกแยะองค์ประกอบทางเคมีที่มีในสารตัวอย่าง (Principal Component Analysis, PCA) ได้

2) โครงสร้าง Extended X-ray Absorption Fine Structure หรือ EXAFS ปรากฏอยู่ในสเปกตรัมของสัญญาณสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ ต่อจากโครงสร้าง XANES ไปจนถึงบริเวณช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 1,000 อิเล็กตรอนโวลต์เหนือขอบการดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเกิดขึ้นจากโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ที่ถูกปลดปล่อยมาจากอะตอมในระหว่างการ

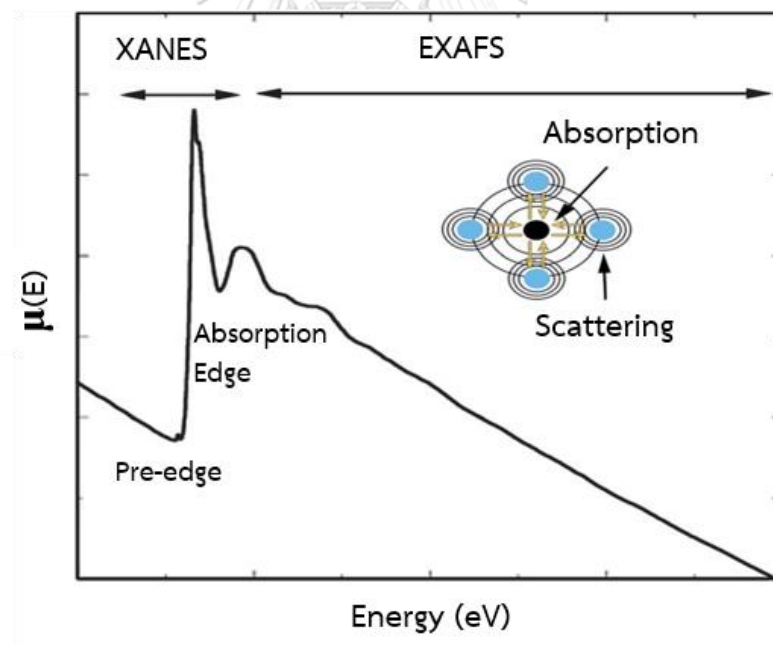
ดูดกลืนรังสีเอกซ์และถูกทำให้เกิดการกระเจิงโดยอะตอมรอบข้างและสะท้อนกลับมาแทรกสอดกับตัวเอง โดยขนาดของการกระเจิง (Scattering Amplitude) ที่เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างสลักันจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้าง EXAFS สามารถทำได้ด้วยการแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งจะแสดงถึงโครงสร้างการกระจายตัวของอะตอมรอบข้างในแต่ละชั้น สามารถนำไปวิเคราะห์ความยาวพันธะ (Bond Length) จำนวนของอะตอมรอบข้าง และชนิดของอะตอมรอบข้างได้

2.4.3 การใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืช

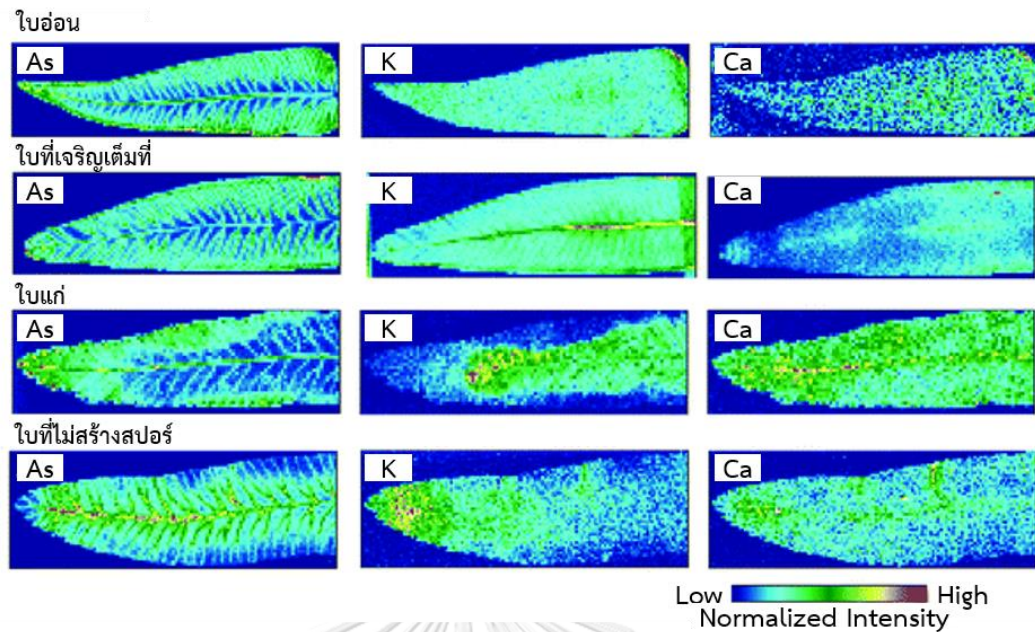
แสงซินโครตรอนมีความเข้มสูงทำให้สามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในบริเวณที่สนใจของตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) โดยการฉายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของธาตุที่สนใจ จากนั้นอิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงกว่าเกิดการย้ายไปยังชั้นที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุ โดยอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น (Shell) โดยชั้นในสุด คือ ชั้น K ที่มีระดับพลังงานต่ำสุด ชั้นถัดออกมาจะมีระดับพลังงานยึดเหนี่ยวสูงขึ้นตามลำดับ คือ ชั้น L ชั้น M และชั้น N โดยอิเล็กตรอนในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ในขณะที่อิเล็กตรอนในชั้นอื่นจะแบ่งระดับพลังงานออกเป็นชั้นย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งนี้อะตอมของธาตุแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน และธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงกว่า โดยการเรืองรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการย้ายอิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าลงไปแทนที่ว่างในชั้น K มีความเข้มของรังสีเอกซ์จำเพาะสูงกว่าการเรืองรังสีเอกซ์จำเพาะที่เกิดขึ้นจากชั้นอื่นๆ (Castillo-Michel et al., 2017; Terzano et al., 2019) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคในการโฟกัสลำรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอนให้มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและแสดงการกระจายตัวของธาตุที่สนใจในตัวอย่างได้ โดยเรียกเทคนิคนี้ว่า Synchrotron Based Micro-XRF Imaging (SR- μ -XRF Imaging) ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของโลหะหนักในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของพืช (Kopittke et al., 2018; Kopittke et al., 2017; Tancharakorn et al., 2012) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16



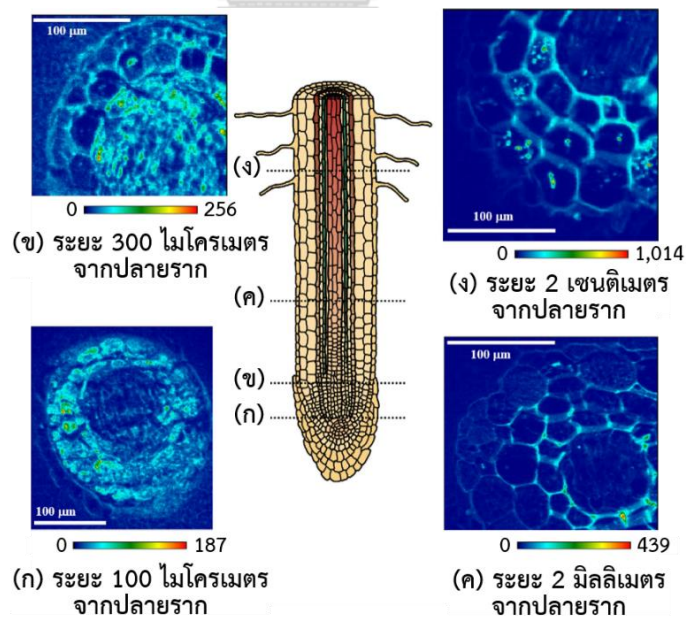
รูปที่ 2.13 การตอบสนองของอะตอมต่อรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Zhang (2019)



รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอะตอมที่แสดงถึงบริเวณใกล้ขอบการดูดกลืนรังสี (Pre-edge) ขอบการดูดกลืนรังสี (Absorption Edge) และโครงสร้าง XANES และ EXAFS
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ortega et al. (2012)



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของสารหนู (As) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ในใบย่อยของ กูดหมาก (*Pteris vittata* L.) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hokura et al. (2006)



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของสารหนูที่ระยะต่างๆ จากปลายรากของกูดหมาก (*Pteris vittata* L.) ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging
ที่มา: ดัดแปลงจาก Kashiwabara et al. (2021)

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การแพร่กระจายและการปนเปื้อนของสารหนูจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ

กิจกรรมการทำเหมืองแร่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้และก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมทั้งจากขั้นตอนการขุดค้น การแต่งแร่ และการจัดการของเสีย โดยเฉพาะกากโลหกรรมปริมาณมากที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่อยู่ในบ่อกักเก็บถือเป็นแหล่งกำเนิดของโลหะหนักที่สำคัญของกิจกรรมการทำเหมืองแร่ที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของฝุ่น อนุภาคขนาดเล็ก และน้ำเหมืองที่เป็นกรด โดย Ono et al. (2016) รายงานถึงการแพร่กระจายของสารหนูในรูปของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร บริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำในประเทศบราซิล พบว่า มีความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 38 - 313 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยผลการวิเคราะห์รูปแบบทางเคมีของสารหนูจากโครงสร้าง XANES บ่งชี้ว่า สารหนูในตัวอย่างฝุ่นละอองส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์ และโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ของเฟอร์ริกอาร์เซเนต (Poorly Crystalline Ferric Arsenate) ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบทางเคมีของสารหนูในกากโลหกรรมที่อยู่บริเวณผิวหน้าในบ่อกักเก็บ สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Corriveau et al. (2011) ที่พบว่า สารหนูในฝุ่นขนาด 0.5 - 1.6 ไมโครเมตร บริเวณรอบเหมืองทองคำเก่าในประเทศแคนาดาที่เกิดการแพร่กระจายทางอากาศจากการพัดพาโดยลมและกิจกรรมการขุดขี้ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอาร์เซเนตที่มีโครงสร้างอสัณฐาน คือ ไฮดรรัสเฟอร์ริกอาร์เซเนต (Hydrous Ferric Arsenate) และไฮดรรัสเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Hydrous Ferric Oxyhydroxide) รวมทั้งยังพบสารหนูในรูปของสกอร์ไต์และอาร์เซโนไฟไรต์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบทางเคมีของสารหนูในกากโลหกรรม นอกจากนี้ยัง พบว่า ขนาดอนุภาคของฝุ่นที่ลดลงจะส่งผลให้ปริมาณของสารหนูและธาตุต่างๆ ลดลงอีกด้วย

แม้ว่าสารหนูในกากโลหกรรมและฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบเหมืองแร่ทองคำบางส่วนจะยังคงอยู่ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์ที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพต่ำ แต่พบว่า มีโอกาสที่สารหนูในกากโลหกรรมเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแร่ออกไซด์ที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพได้เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นและออกซิเจนเพียงพอ โดย Johnston et al. (2020) รายงานการปนเปื้อนของสารหนูและพลวงในแม่น้ำซึ่งได้รับน้ำชะจากหินทิ้ง (Waste Rock) และกากโลหกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่อยู่ในรูปของสติบไนต์ (Stibnite, Sb_2S_3) และอาร์เซโนไฟไรต์ พบว่า ในระยะทาง 75 กิโลเมตร ของแม่น้ำที่ทำการศึกษา สารหนูและพลวงในตะกอนท้องน้ำมีระดับความเข้มข้นลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 58 - 207 และ 49 - 428 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของโลหะหนัก และผลการวิเคราะห์รูปแบบทางเคมีจากโครงสร้าง XANES พบว่า สารหนูส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนตและมีความเกี่ยวข้องกับสารประกอบ

เพอร์ริคที่มีโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ เช่น เพอร์ริไฮโดรต์ นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของสารหนูที่มีความเข้มข้นสูงในดินบริเวณลานตะพักลำน้ำ (Fluvial Terrace) ในเขตพื้นที่ที่ติดกับเมืองแร่ โดยส่วนใหญ่สารหนูอยู่ในรูปของอาร์เซเนตเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับ Acosta et al. (2015) ที่รายงานว่า การปนเปื้อนของสารหนูในดินบริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำแบบดั้งเดิม (Artisanal Mining) สองแห่งในประเทศโบลิเวียมีความเกี่ยวข้องกับแร่อาร์เซโนไฟไรต์และของเสียที่เกิดจากการร่อนทอง โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูในดินโดยรวม (Bulk Soil) และดินบริเวณรากพืช (Rhizosphere Soil) ในบริเวณพื้นที่เหมือง Velgen del Rosario ที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 36 และ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 50 และ 64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณพื้นที่เหมือง Rayo Rojo ที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 13 และ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 13 และ 36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูจากโครงสร้าง XANES บ่งชี้ว่า สารหนูในดินทั้ง 2 ประเภทอยู่ในรูปของอาร์เซเนต นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Mapping สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสารหนูในดินบริเวณรากพืชที่มีการสะสมอยู่ในบริเวณที่มีระดับความเข้มข้นของเหล็กสูงด้วย

นอกจากนี้การปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่บริเวณโดยรอบเหมืองแร่มีความเกี่ยวข้องกับแร่ต้นกำเนิดที่มีอยู่เดิมในพื้นที่การทำเหมือง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ซิลไฟด์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการปนเปื้อนของสารหนูและเหล็กบริเวณโดยรอบเหมืองแร่จึงมีความสัมพันธ์กัน โดย Gabarrón et al. (2018) รายงานว่า กากโลหะกรรมในบ่อกักเก็บของเหมืองเก่า 2 แห่ง ในประเทศสเปน คือ La Unión และ Mazarrón มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3.4 และ 2.49 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 4.1 และ 5.9 เดซิซิเมนต์ต่อเมตร ความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 102,762 และ 142,919 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 190 และ 436 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีสารหนูในรูปที่พร้อมใช้ทางชีวภาพเพียง 0.04 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของพื้นที่การทำเหมือง โดยที่สารหนูในกากโลหะกรรมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่คงค้างกับของแข็ง นอกจากนี้ยังพบว่า เกิดการปนเปื้อนสารหนูในดินบริเวณพื้นที่ทางการเกษตร เท่ากับ 98 และ 149 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดินบริเวณพื้นที่ทางธรรมชาติ เท่ากับ 79 และ 706 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินบริเวณรากพืช เท่ากับ 65 และ 513 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของพื้นที่การทำเหมือง ทั้งนี้ กากโลหะกรรมและดินในบริเวณโดยรอบพื้นที่เหมืองมีแนวโน้มระดับความเข้มข้นของเหล็กและสารหนูเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับสารหนูในรูปอาร์เซโนไฟไรต์และไฟไรต์ที่เป็นแร่ต้นกำเนิดที่มีอยู่เดิมในพื้นที่การทำเหมือง และคาดว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนสารหนูและเหล็กในดินบริเวณโดยรอบ ซึ่งสอดคล้องกับ Wang et al. (2016) ที่รายงานผลของสารประกอบเหล็กในรูปของแมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) ในกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองแดง

โมลลิบดินัม และทองคำ ที่มีต่อการปลดปล่อยสารหนู โดยกากโลหกรรมที่มีแมกนีไทต์ปริมาณต่ำ (ร้อยละ 4.6) และปริมาณสูง (ร้อยละ 12) มีความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 83,000 และ 109,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสารหนู เท่ากับ 144 และ 387 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยปริมาณของแมกนีไทต์ในกากโลหกรรมที่เพิ่มขึ้นทำให้สารหนูในกากโลหกรรมถูกชะละลายออกมาได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำชะที่ได้จากการบ่มกากโลหกรรมที่มีปริมาณแมกนีไทต์สูงและต่ำด้วยกากชานอ้อย (Sugarcane Mulch Residue) ปริมาณร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 4 สัปดาห์ มีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 34 และ 688 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูจากโครงสร้าง XANES บ่งชี้ว่า สารหนูในกากโลหกรรมอยู่ในรูปอาร์เซโนไฟไรต์ (Arsenopyrite) ออร์พิเมนต์ (Orpiment) และสารประกอบอาร์เซเนตเฟอร์ริไฮไดรด์ (Arsenate Ferrihydrite) แต่เมื่อทำการบ่มด้วยกากชานอ้อย พบว่า รูปทางเคมีของสารหนูในกากโลหกรรมคงเหลืออยู่ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์ และสารประกอบอาร์เซเนตเฟอร์ริไฮไดรด์เท่านั้น โดยในกากโลหกรรมที่มีปริมาณแมกนีไทต์สูงมีอาร์เซโนไฟไรต์ลดลงจากร้อยละ 76 เป็นร้อยละ 48 และสารประกอบอาร์เซเนตเฟอร์ริไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12 เป็นร้อยละ 52 ในขณะที่กากโลหกรรมที่มีแมกนีไทต์ปริมาณต่ำพบการเพิ่มขึ้นทั้งอาร์เซโนไฟไรต์และสารประกอบอาร์เซเนตเฟอร์ริไฮไดรด์ โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17 เป็นร้อยละ 25 และจากร้อยละ 57 เป็นร้อยละ 75 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมสารอินทรีย์สามารถทำให้การชะละลายและการออกซิเดชันของอาร์เซโนไฟไรต์และออร์พิเมนต์เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในกากโลหกรรมที่มีแมกนีไทต์ปริมาณต่ำ

แม้ว่าสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมของเหมืองแร่ทองคำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์และอาร์เซเนตที่ถูกดูดซับด้วยสารประกอบเหล็กออกไซด์ ซึ่งทำให้สารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมมีความสามารถในการละลายได้ (Solubility) และความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ต่ำ อย่างไรก็ตามหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจทำให้กากโลหกรรมเหล่านี้เกิดการแพร่กระจายในรูปของฝุ่น และอนุภาคขนาดเล็ก รวมทั้งมีโอกาที่จะเกิดการปลดปล่อยสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของน้ำเหมืองที่เป็นกรดจากการที่กากโลหกรรมเกิดการสัมผัสกับอากาศและการถูกชะล้างด้วยน้ำฝน

2.5.2 การบำบัดกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยพืช

กากโลหกรรมมีสมบัติโดยทั่วไปที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเป็นตัวกลางที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ต่ำ มีความเป็นกรดและค่าการนำไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังขาดความอุดมสมบูรณ์และมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่สูง (Wang et al., 2017) ทำให้เป็นอุปสรรคสำคัญในการบำบัดกากโลหกรรมด้วยพืช อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยหลายงานที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิดในกากโลหกรรมปนเปื้อนโลหะหนัก โดย

Visoottiviseth et al. (2002) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูของพืชท้องถิ่นบริเวณเหมืองแร่ดีบุกเก่า ในพื้นที่อำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และอำเภอบ้านนั้งस्ता จังหวัดยะลา พบว่า เฟิร์นเงิน (*Pityrogramma calomelanos* (L.) link) และกูดหมาก (*Pteris vittata* L.) มีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก โดยมีความเข้มข้นของสารหนูในใบ (Frond) เท่ากับ 8,350 และ 6,030 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ Xiao et al. (2008) ได้รายงานถึงความสามารถในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดินจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่และกิจกรรมอื่นๆ ของกูดหมากที่ขยายพันธุ์จากสปอร์ของต้นกูดหมากที่พบบริเวณเหมืองแร่ที่มีการปนเปื้อนสารหนู พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในใบมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่างและความเข้มข้นของสารหนูในดิน โดยกูดหมากที่ปลูกในดินที่ได้จากบริเวณโดยรอบพื้นที่การทำเหมืองแร่มีความเข้มข้นของสารหนูในราก (Rhizoid) และใบสูงที่สุด เท่ากับ 2,067 และ 2,680 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมากของเฟิร์นเงินและกูดหมากยังถูกรายงานในการนำไปบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดินจากกิจกรรมอื่นๆ มาอย่างต่อเนื่อง โดย Kertulis-Tartar et al. (2006) พบว่า กูดหมากที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนูจากน้ำยารักษาเนื้อไม้ในรูปของโครเมตคอปเปอร์อาร์เซเนต (Chromated Copper Arsenate, CCA) มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในใบในปีแรกและปีที่สอง เท่ากับ 4,575 และ 3,186 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับ Niazi et al. (2011) ที่พบว่า กูดหมาก (*Pteris vittata* L.) และเฟิร์นเงิน (*Pityrogramma calomelanos* var. *austroamericana*) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากยาฆ่าแมลงที่ใช้ในปศุสัตว์เป็นเวลา 10 เดือน มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในใบ เท่ากับ 887 และ 674 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ต่อมา Niazi et al. (2012) ได้รายงานเพิ่มเติมว่าที่ระยะเวลา 22 เดือน เฟิร์นเงินและกูดหมากมีระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในใบลดลง เท่ากับ 423 และ 292 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 27 เดือน ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในใบมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 581 และ 401 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของสารหนูในใบที่ลดลงมีสาเหตุมาจากค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณของธาตุเหล็กในดินที่เพิ่มขึ้นและจากการคำนวณระยะเวลาในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดินที่ระดับความลึก 0 - 20 เซนติเมตรให้มีระดับความเข้มข้นของสารหนูลดลงต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า เฟิร์นเงินที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 753 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกูดหมากที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 909 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะต้องใช้เวลาในการบำบัด 5.5 และ 13 ปี ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีรายงานการวิจัยที่แสดงถึงความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูในกาบโลหกรรมของพืชที่ไม่มีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก แต่มีมวลชีวภาพสูง โดย Ko et al. (2008) รายงานการดูดตั้งและสะสมสารหนูของผักกาดเขียว

(*Brassica juncea*) ที่ปลูกในกระถางทดลองที่บรรจุกากโลหะกรรมจากเหมืองแร่ทองคำในประเทศพิจิที่มีความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด (Total As) และสารหนูที่ละลายได้ในน้ำ (Water-soluble As) เท่ากับ 683 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 8 สัปดาห์พบว่า พืชมีความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน เท่ากับ 1.66 และ 47.36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อมีการเติมสารละลายผสมของแอมโมเนียมออกซาลेटโมโนไฮเดรต ((NH₄)₂C₂O₄·H₂O) ออกซาลิกแอซิดไดไฮเดรต (C₂H₆O₆·2H₂O) และกรดแอสคอร์บิก (C₆H₈O₆) ในอัตราส่วนโดยโมลที่ 1 ต่อ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ พบว่า พืชมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 21.31 และ 187.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีปริมาณการสะสมสารหนูเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.095 มิลลิกรัม ซึ่งส่งผลให้มวลชีวภาพส่วนเหนือดินของพืชลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ Chen et al. (2015) รายงานความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ของ แอลแฟลฟา (*Medicago sativa* L.) ที่ปลูกในกากโลหะกรรมจากเหมืองแร่ทองคำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2.8 และระดับความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 234.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า พืชมีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้นเมื่อดินที่ใช้ในการปลูกพืชมีสัดส่วนของกากโลหะกรรมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อดินมีสัดส่วนกากโลหะกรรมสูงที่สุดในการทดลองที่ร้อยละ 50 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น เท่ากับ 6.84 และมีระดับความเข้มข้นของสารหนูลดลง เท่ากับ 97.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่พืชมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 9.08, 1.37 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีปัจจัยในการเคลื่อนย้าย (Translocation Factor) ของสารหนู เท่ากับ 0.081 อย่างไรก็ตามแม้ว่าสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่ราก หากแต่พบว่า อัตราการงอก มวลชีวภาพ และปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของพืชลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อย่างไรก็ตามแม้ว่าเฟิร์นเงินและกูดหมากจะมีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก อีกทั้งการสะสมสารหนูของพืชยังไม่ส่งผลต่อการขยายพันธุ์และมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน แต่พบว่า พืชทั้งสองชนิดมีวงจรชีวิตยาวนานถึง 2 ปี ทำให้ใช้เวลาในการบำบัดที่ยาวนาน (Niazi et al., 2012; Visoottiviset et al., 2002) ในขณะที่พืชที่มีมวลชีวภาพสูงจะสามารถเจริญเติบโตและมีความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมได้ดี แต่อาจไม่สามารถนำมวลชีวภาพที่ได้มาใช้ประโยชน์ต่อได้ ทำให้ในปัจจุบันมีความพยายามในการนำพืชพลังงานที่มีวงจรชีวิตสั้น เจริญเติบโตเร็ว มีมวลชีวภาพสูง มีระบบรากแผ่ขยายกว้าง ขยายพันธุ์ได้ดี และเก็บเกี่ยวได้ง่าย มาใช้ในการบำบัดโลหะหนัก (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558b) เพื่อที่จะได้เก็บเกี่ยวพืชที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานต่อไป (Hauptvogel et al., 2020; Ma et al., 2016; Pandey et al., 2016) โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์หลายสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติดังที่

กล่าวมาและมีความทนทานต่อสภาวะแห้งแล้ง (Dussadee et al., 2016) นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำไปใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม สังกะสี และโครเมียม (Hu et al., 2018; Ko et al., 2017; Wiangkham & Prapagdee, 2018; Yang et al., 2020)

Sampanpanish (2018) ได้ศึกษาความสามารถในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำด้วยพืชทดลองในกระถางทดลอง ได้แก่ หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.) หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) ไม้ป่า (*Bambusa bambos* L.) กระจินเทพา (*Acacia mangium*) กระจินณรงค์ (*Acacia auriculiformis*) และกระจินไทย (*Leucaena leucocephala*) โดยกากโลหะกรรมมีความเข้มข้นของสารหนู 50.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถูกบรรจุในกระถางทดลองที่มีการเติมปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 180 วัน พบว่าหญ้าเนเปียร์มีมวลชีวภาพสูงที่สุด รองลงมา คือ กระจินเทพา กระจินณรงค์ หญ้าแฝก ไม้ป่า และกระจินไทย นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์ยังมีปริมาณการสะสมสารหนูสูงที่สุด เท่ากับ 31.8 มิลลิกรัมต่อตัน ในขณะที่ปริมาณการสะสมสารหนูของพืชชนิดอื่นมีค่าต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม สอดคล้องกับ Sampanpanish and Suwattiga (2017) ที่ศึกษาความสามารถในการบำบัดกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำในพื้นที่บ่อกักเก็บที่มีความเข้มข้นของสารหนู 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้วยหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.) ไม้ป่า (*Bambusa bambos* L.) และหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) โดยมีการรองกันหลุมด้วยพอลิเมอร์ดูดซับน้ำ (Polymer Absorber) และปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ในอัตราส่วน 500 กิโลกรัมต่อไร่ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 180 วัน พบว่า กากโลหะกรรมในทุกชุดการทดลองมีความเข้มข้นของสารหนูลดลงต่ำกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยหญ้าเนเปียร์มีมวลชีวภาพส่วนเหนือดินสูงที่สุด เท่ากับ 3,134.1 กรัม รองลงมา คือ หญ้าแฝกและไม้ป่า เท่ากับ 859.3 และ 631.7 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่มวลชีวภาพส่วนใต้ดินของพืชทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 179.2 - 223.3 กรัม โดยหญ้าเนเปียร์มีความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดิน เท่ากับ 8.6 และ 4.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณการสะสมสารหนูสูงที่สุด 17.3 มิลลิกรัมต่อตัน ในขณะที่หญ้าแฝกและไม้ป่ามีการสะสมสารหนู เท่ากับ 6.6 และ 4.9 มิลลิกรัมต่อตัน ตามลำดับ โดยหญ้าเนเปียร์มีมวลชีวภาพสูงที่สุด ดังนั้น เมื่อผ่านการบำบัดแล้วจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานต่อไปได้ ในขณะที่ Ma et al. (2016) ได้รายงานความสามารถของหญ้าเนเปียร์ยักษ์ลูกผสม (Hybrid Giant Napier, *Pennisetum sinense* Roxb) ในการดูดซับและสะสมสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรม โดยหลังจากการเพาะปลูกเป็นเวลา 2 ปี พบว่า กากโลหะกรรมมีความเข้มข้นของสารหนูลดลงจาก 49 เหลือ 33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยความเข้มข้นของสารหนูในรากแขนง (Fibrous Roots) รากปฐมภูมิ (Tap Roots) ลำต้น และใบ มีค่าเท่ากับ 112.6, 85.12, 4.72 และ 24.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นปริมาณการสะสมสารหนู เท่ากับ 3.377, 4.256, 6.581 และ 1.46 มิลลิกรัม ตามลำดับ

โดยพืชมีปริมาณการสะสมสารหนุรวม 15.67 มิลลิกรัมต่อต้น นอกจากนี้ยัง พบว่า การปลูกหญ้าเนเปียร์ยักษ์ลูกผสมยังส่งผลให้กากโลหะหนักมีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจาก 2.8 เป็น 3.4 รวมทั้งมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสะสมสารหนุและโลหะหนักอื่นๆ ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์ยักษ์ลูกผสมมีมวลชีวภาพลดลงมากกว่าร้อยละ 50

2.5.3 การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า

การบำบัดโลหะหนักด้วยพืชเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปนเปื้อนเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการบำบัดจะขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตและวงจรชีวิตของพืช อีกทั้งพื้นที่ในการบำบัดยังจำกัดโดยเฉพาะในบริเวณรากพืช และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของดินและรูปร่างเคมีของโลหะหนักที่ส่งผลต่อการดูดซับและสะสมของรากพืช จึงเป็นข้อจำกัดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช อย่างไรก็ตามการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าสามารถช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวได้ด้วยการให้สนามไฟฟ้าในระดับต่ำที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะส่งผลให้สารอาหารและโลหะหนักอยู่ในรูปที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังบริเวณรากพืช (Cameselle et al., 2013)

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของกระแสไฟฟ้า คือ 1) ไฟฟ้ากระแสตรงที่กระแสไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวนำและไม่ขึ้นอยู่กัเวลา และ 2) ไฟฟ้ากระแสสลับที่กระแสไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่สลับไป-มาตลอดเวลาตามความถี่ โดย Aoughalma et al. (2008) ได้ศึกษาผลของการให้ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับขนาด 500 มิลลิแอมป์ อย่างต่อเนื่อง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 33 เซนติเมตร ต่อการสะสมโลหะหนักในต้นมันฝรั่งที่มีอายุ 30 วัน พบว่า การให้ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของดินเกิดการเปลี่ยนแปลงจากขั้วแอโนดถึงขั้วแคโทดจาก 6.5 ไปอยู่ในช่วงประมาณ 3 - 8 จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ต่างจากการให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 60 วัน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ขั้วแอโนดจนถึงระยะ 12 เซนติเมตรจากขั้วแอโนด มีค่าต่ำกว่า 4 ซึ่งทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมในดินมีค่าสูงที่สุดที่ระยะ 12 เซนติเมตรจากขั้วแอโนด อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่า การให้ไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลให้พืชมีมวลชีวภาพลดลง ต่างจากการให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้มวลชีวภาพของพืชเพิ่มขึ้น แต่พบว่า การให้ไฟฟ้าทั้งสองประเภทต่างก็กระตุ้นให้รากพืชดูดซับและสะสมโลหะหนักได้เช่นเดียวกัน ในขณะที่ Bi et al. (2011) ได้ศึกษาผลของการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีด้วยผักกาดก้านขาว (*Brassica napus*) อายุ 60 วัน และยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) อายุ 90 วัน ร่วมกับการให้

สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร อย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 30 วัน ของชุดการทดลองผักกาดก้านขาว และ 90 วัน ของชุดการทดลองยาสูบ พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการสลับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทุก 3 ชั่วโมง ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินบริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลองผักกาดก้านขาวและยาสูบมีค่าลดลง 0.2 และ 0.4 หน่วย ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ผักกาดก้านขาวในทุกชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับมีแนวโน้มของความสูงและมวลชีวภาพที่สูงที่สุด ส่งผลให้มีปริมาณการดูดตั้งและสะสมโลหะหนักสูงที่สุดด้วยเช่นกัน ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไม่ส่งผลให้ความสูงและมวลชีวภาพของยาสูบเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้ยาสูบยังมีแนวโน้มปริมาณการสะสมโลหะหนักแตกต่างกับผักกาดก้านขาว ผลการทดลองที่แตกต่างกันของพืชทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไม่ได้ลดผลกระทบต่อมวลชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยพืชที่เพิ่มขึ้นเสมอไป สอดคล้องกับ Chirakkara et al. (2015) ที่ศึกษาความสามารถของข้าวโอ๊ต (*Avena sativa*) และทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ในการบำบัดดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนแนฟทาลีน (Naphthalene) ฟีนแอนทริน (Phenanthrene) ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ที่มีการปรับความชื้นเริ่มต้นให้เท่ากับ ร้อยละ 15 ร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1.25 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผ่านขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 61 วัน พบว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับส่งผลให้ข้าวโอ๊ตและทานตะวันมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามยังพบว่า การให้ไฟฟ้ากระแสสลับส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์โพเทนเชียลและค่าการนำไฟฟ้าของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงมักก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจนส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืช หากแต่ในหลายงานวิจัยได้มีการปรับขนาดของสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความเหมาะสม และปรับระยะเวลาในการให้สนามไฟฟ้าต่อวันที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช โดย Cang et al. (2011) ได้ทำการศึกษาผลของการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดต่างกันว่า 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผ่านขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน อีกทั้งยังมีการปรับความชื้นเริ่มต้นของดินให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 ของความสามารถในการอุ้มน้ำ รวมทั้งปรับปรุงคุณภาพของดินปนเปื้อนด้วยการเติมยูเรีย (Urea) และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่ 0.33 และ 0.32 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 16 วัน พบว่า ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าลดลงในบริเวณขั้วแอโนดและเพิ่มขึ้นในบริเวณขั้วแคโทด นอกจากนี้ยังส่งผลให้

ค่าการนำไฟฟ้าของดินบริเวณข้าวแอนโดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยพืชที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนเหนือดินสูงที่สุด รองลงมา คือ การให้สนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนใต้ดินของพืชที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่ 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามยังพบว่า มวลชีวภาพของพืชที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่าสูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าพืชที่มีการให้สนามไฟฟ้าที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชร่วมกับการใช้จุลนศาสตร์ไฟฟ้ามักมุ่งเน้นไปที่การบำบัดโลหะหนักที่แตกตัวอยู่ในรูปไอออนบวก คือ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งเคลื่อนที่ไปยังข้าวแคโทดได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของน้ำในดินด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส อย่างไรก็ตามในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการบำบัดสารหนูซึ่งมีการแตกตัวอยู่ในรูปไอออนลบด้วยพืชร่วมกับการใช้จุลนศาสตร์ไฟฟ้า โดย Mao et al. (2016) ได้ศึกษาความสามารถในการสะสมตะกั่ว (Pb) สารหนู (As) และซีเซียม (Cs) ของผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ปวยเล้ง (*Spinacia oleracea*) และกะหล่ำปลี (*Brassica rapa*) ที่ปลูกในดินที่ใช้ในการปลูกข้าว (Paddy Soil) และทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปุ๋ย โดยแบ่งชุดการทดลองตามชนิดของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว สารหนู และซีเซียม เท่ากับ 600, 20 และ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผ่านขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 15 วัน ผลการทดลองในชุดดินที่ปนเปื้อนสารหนู พบว่า การให้สนามไฟฟ้าทำให้ดินบริเวณข้าวแอนโด บริเวณระหว่างข้าวแอนโดและข้าวแคโทด และบริเวณข้าวแคโทด มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 1.6, 5.8 และ 11 ในขณะที่ดินในชุดการทดลองที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 6.7 แสดงให้เห็นได้ว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในรูปที่ละลายน้ำได้ (Water Soluble Fraction) และรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangable Fraction) บริเวณข้าวแอนโดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลง และพบว่า ผักกาดเขียวและปวยเล้งมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะดังกล่าว ดังนั้น การให้สนามไฟฟ้าส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินของผักกาดเขียวเพิ่มขึ้นจาก 11 และ 2.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 62 และ 35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสามารถช่วยกระตุ้นให้ปวยเล้งมีการดูดดึงและสะสมสารหนูไว้ในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น เท่ากับ 47 และ 14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูด้วยการใช้สารฟอสเฟตที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับสารหนู เพื่อเพิ่มการชะละลายสารหนูออกจากอนุภาคของดินด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange) โดย Couto et al. (2015) ได้ทำการศึกษาความสามารถของหญ้าไรย์ (*Lolium perenne*) และผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ในการบำบัด

ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) บริเวณพื้นที่การทำเหมืองแร่ที่มีความเข้มข้นของสารหนู (As) และพลวง (Sb) เท่ากับ 65.8 และ 547 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยทำการปรับความชื้นเริ่มต้นของดินในกระถางทดลองให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 ของความสามารถในการอุ้มน้ำ และให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผ่านขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน นอกจากนี้ยังทำการเติมสารละลายฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 15 วัน พบว่า มวลชีวภาพโดยรวมของพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้า และชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารฟอสเฟต โดยเฉพาะในส่วนใต้ดินของพืชทดลองทั้งในบริเวณขั้วแอโนด ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด และบริเวณขั้วแคโทด ที่มีค่าสูงกว่ามวลชีวภาพส่วนใต้ดินของพืชทดลองในชุดควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและการเติมสารฟอสเฟต ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการสะสมสารหนูและพลวงโดยเฉพาะในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินในชุดการทดลองควบคุมของหญ้าไรย์และผักกาดเขียว มีค่าเท่ากับ 85.7 และ 78.4 ไมโครกรัมต่อกระถาง ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 94.9 และ 174.9 ไมโครกรัมต่อกระถาง ตามลำดับ และชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารฟอสเฟต มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 142.5 และ 333.7 ไมโครกรัมต่อกระถาง ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง พบว่า การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตส่งผลให้ปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของผักกาดเขียว มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.9 ไมโครกรัม ดังนั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การให้สนามไฟฟ้าที่มีขนาดที่เหมาะสมร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตสามารถช่วยให้หญ้าไรย์และผักกาดเขียวมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและสะสมสารหนูของพืชได้ด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ใช้สารคีเลตในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักไอออนบวก (Cationic Heavy Metal) และเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่สะสมอยู่ในส่วนใต้ดินขึ้นสู่ส่วนเหนือดินของพืชมาอย่างต่อเนื่อง โดย Lim et al. (2004) และ Lim et al. (2012) ได้ทำการทดลองและพบว่า ขนาดของสนามไฟฟ้าและระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและสารหนู มีความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองเหล่านี้ไม่ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูของผักกาดเขียวภายใต้สภาวะดังกล่าว ในขณะที่ Zhou et al. (2007) ได้ศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอต่อความสามารถในการดูดซับและสะสมทองแดงและสังกะสีของหญ้าไรย์ (Ryegrass) ที่ปลูกในดินบริเวณพื้นที่เหมืองแร่ที่ระดับความลึก 0 - 60 เซนติเมตรจากผิวดิน ซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดงและสังกะสีอยู่ในช่วง 1,200 - 1,531 และ 126 - 257 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีการปรับความชื้นของดินให้มีค่าเท่ากับ

ร้อยละ 70 ของความสามารถในการอุ้มน้ำ และทำการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ผ่านขั้วไฟฟ้าสแตนเลสที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง โดยติดตั้งขั้วแอโนดที่ความลึก 5 เซนติเมตรจากผิวดิน และขั้วแคโทดที่ก้นกระถางทดลองที่ความลึก 50 เซนติเมตรจากผิวดิน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 7 วัน พบว่า ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินของหญ้าไรย์ในชุดควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและการเติมสารอิตีทีเอ มีค่าเท่ากับ 274 และ 29.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอิตีทีเอ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 576 และ 434 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 519 และ 635 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของทองแดงในส่วนเหนือดินของหญ้าไรย์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่า หญ้าไรย์ไม่สามารถดูดซับและสะสมสังกะสีได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอส่งผลให้มวลชีวภาพทั้งในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินของหญ้าไรย์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้ Tahmasbian and Safari Sinegani (2014) ได้ทำการศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอต่อความสามารถในการดูดซับและสะสมแคดเมียมของต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ที่ปลูกในดินจากทุ่งเลี้ยงสัตว์บริเวณรอบเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี เป็นเวลา 53 วัน จากนั้นทำการเติมสารละลายอิตีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 5 กรัมต่อกิโลกรัม และทิ้งไว้นาน 7 วัน โดยเมื่อครบเวลา 60 วัน จึงให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน ผ่านขั้วแอโนด (แกรไฟต์) จำนวน 4 ขั้ว ที่ติดตั้งล้อมรอบต้นพืชในแนวรัศมีที่มีระยะห่างจากขั้วแคโทด (สแตนเลส) เท่ากับ 9 เซนติเมตร โดยทำการติดตั้งด้วยการเสียบไว้ที่โคนของลำต้นทานตะวัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 14 วัน พบว่า การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินของพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพืชในชุดควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและการเติมสารอิตีทีเอ รวมทั้งชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้าหรือการเติมสารอิตีทีเอเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง ยกเว้นพืชในชุดการทดลองที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ ที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่า การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอไม่ทำให้มวลชีวภาพของพืชลดลง นอกจากนี้ Tahmasbian and Safari Sinegani (2016) ได้รายงานผลการทดลองที่แตกต่างกันในการดูดซับและสะสมตะกั่ว โดยการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนใต้ดินไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนเหนือดินมีค่าสูงที่สุดและมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ในขณะที่ Luo et al. (2018) รายงานผลของการให้สนาม ไฟฟ้ากระแสตรงและ กระแสสลับร่วมกับการเติมสารอิตีทีโอต่อความสามารถในการดูดดึงและสะสมแคดเมียม ตะกั่ว และ ทองแดงของต้นโกลจูฟารศ (*Eucalyptus globulus*) ที่ปลูกในดินจากบริเวณสถานที่กำจัดขยะ อิเล็กทรอนิกส์ที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเติมสารละลาย อิตีทีโอความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร หลังจากนั้น 1 วัน จึงให้สนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 2, 4 และ 10 โวลต์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ผ่านขั้วไฟฟ้าสเตนเลสที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง โดยติดตั้งขั้วแคโทดที่ผิวดิน และขั้วแอโนดที่ก้นกระถางทดลองที่ความลึก 80 เซนติเมตรจากผิวดิน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 14 วัน พบว่า การเติมสารอิตีทีโอส่งผลให้พืชมีมวลชีวภาพลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ร่วมกับการเติมสารอิตีทีโอส่งผลให้พืชมีมวลชีวภาพสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารอิตีทีโอสามารถ ทำให้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความ ต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของตะกั่วมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นในส่วนใต้ดินเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง และในส่วนเหนือดินเมื่อมีการให้ สนามไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ความเข้มข้นของ ทองแดงในส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นระดับความเข้มข้นของทองแดง ในส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความ ต่างศักย์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจากผลงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ สารอิตีทีโอที่มีต่อการดูดดึงและสะสมโลหะหนักไอออนบวกของพืชที่เพิ่มขึ้นภายใต้อิทธิพลของ สนามไฟฟ้า ดังนั้น ความสามารถในการสกัดโลหะหนักไอออนบวกของสารอิตีทีโอจึงส่งผลให้สารหนูที่ ถูกดูดซับอยู่บนอนุภาคของสารประกอบเหล็กออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมา และเพิ่มโอกาสที่สารหนู จะถูกดูดดึงและสะสมผ่านทางรากพืชได้ในที่สุด

2.5.4 การเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในเนื้อเยื่อพืช

กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในเนื้อเยื่อพืชมักถูกศึกษาในพืช ที่มีความสามารถในการสะสมสารหนูในปริมาณมาก เนื่องจากส่วนต่างๆ ของพืชมักมีระดับความ เข้มข้นของสารหนูสูงกว่าพืชทั่วไป และทำให้เห็นการกระจายตัวของสารหนูในเนื้อเยื่อพืชได้อย่าง ชัดเจน โดย Kashiwabara et al. (2021) ได้รายงานถึงการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของ สารหนูในรากของกูดหมาก (*Pteris vittata*) ที่ปลูกในดินเป็นเวลา 6 เดือน แล้วถูกย้ายมาปลูกใน สารละลายโพแทสเซียมอาร์เซเนต (KH_2AsO_4) ที่มีความเข้มข้นของสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น เวลา 3 วัน โดยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวาง (Cross Section) ด้วยเทคนิค SR- μ -

XRF Imaging พบว่า ในบริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ (Maturation Zone) ของรากพืชมีการกระจายตัวของสารหนุอยู่ตามผนังเซลล์ทั้งในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส คอร์เทกซ์ เอนโดเดอร์มิส และสตีล นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนุภายในเซลล์ของเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์ และเอนโดเดอร์มิส ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการกระจายตัวของโพแทสเซียม ทั้งนี้เนื่องจากพืชจะใช้โพแทสเซียมในรูปของไอออนบวกในการสร้างสมดุลของไอออนภายในเซลล์จากการสะสมสารหนุในรูปของไอออนลบ โดยโพแทสเซียมจะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นสตีลได้มากกว่าสารหนุ นอกจากนี้ยังพบการสะสมโพแทสเซียม แมงกานีส เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ขึ้นราก ในขณะที่บริเวณเนื้อเยื่อเจริญ (Meristematic Zone) และบริเวณเซลล์ยืดตัว (Elongation Zone) ที่ระยะ 100 และ 300 ไมโครเมตร จากปลายราก (Root Tip) ตามลำดับ มีการกระจายตัวของสารหนุอย่างสม่ำเสมอภายในเซลล์ ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าบริเวณเนื้อเยื่อเจริญที่ปลายราก จะเกิดกลไกการดูดดึงสารหนุผ่านเส้นทางซิมพลาสติก (Symplastic Pathway) ในขณะที่บริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ จะเกิดการดูดดึงสารหนุผ่านเส้นทางอะพลาสติก (Apoplastic Pathway) โดยสารหนุบางส่วนในชั้นคอร์เทกซ์และเอนโดเดอร์มิส สามารถเกิดการแพร่ผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปสะสมอยู่ภายในเซลล์ได้

Datta et al. (2017) ได้มีการรายงานการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนุในใบย่อย (Pinna) ของกูดหมาก (*Pteris vittata*) ที่ปลูกในดินเป็นเวลา 1 เดือน จากนั้นจึงย้ายมาปลูกในสารละลาย Hoagland เพื่อให้พืชปรับสภาพเป็นเวลา 14 วัน แล้วจึงเติมสารละลายโซเดียมอาร์เซเนตให้มีความเข้มข้นของสารหนุ 6.7 มิลลิโมล จากนั้นจึงปล่อยให้เจริญเติบโตต่อไปอีก 14 วัน จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging พบว่า สารหนุกระจายตัวสะสมอยู่บริเวณขอบใบ (Margin) โดยมีปริมาณการสะสมสูงในบริเวณปลายใบย่อย (Pinna Tip) ต่างจากโพแทสเซียมที่มีกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณใบย่อย โดยมีปริมาณการสะสมสูงในบริเวณฐานใบ (Base) และแกนกลางของใบย่อย (Pinna Rachis) ในขณะที่แคลเซียมมีปริมาณการสะสมสูงที่โคนของแกนกลางของใบย่อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารหนุสามารถกระจายตัวไปตามการไหลของน้ำในเส้นใบ (Veins) และมีความเป็นไปได้ที่พืชจะขับสารหนุออกทางต่อมคายน้ำ (Hydathode) ที่อยู่บริเวณปลายของเส้นใบ (Vein Tips) โดยผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนุด้วยเทคนิค Synchrotron Micro-XANES (SR- μ -XANES) ในบริเวณที่มีปริมาณการสะสมสารหนุสูงในใบย่อย สามารถตรวจพบสารหนุในรูปอาร์เซเนตในทุกตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ แต่มีบางตำแหน่งที่ตรวจพบสารหนุในรูปอาร์เซเนตร่วมด้วย และจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของสารหนุในตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางบริเวณปลายใบ (Apex) ของใบย่อย พบการสะสมสารหนุสูงในเส้นกลางใบ (Midrib) และกระจายตัวไปสะสมที่ผิวใบด้านบน (Adaxial Surface) ได้น้อยกว่าผิวใบด้านล่าง (Abaxial Surface) ที่มีต่อมคายน้ำและปากใบ (Stomata) อยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การกระจายตัวของสารหนุที่เส้นกลางใบและผิวใบยังมี

ความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของโพแทสเซียมและซิลิเฟออร์ ผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า กูดหมากดูดดึงสารหนูในรูปของอาร์เซเนตและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ และเมื่อถูกกำเลียง ขึ้นสู่ใบด้วยท่อลำเลียงน้ำในเส้นกลางใบแล้ว สารหนูจะกระจายตัวด้วยเส้นทางอะโพพลาสติกไปยัง บริเวณขอบใบและผิวใบด้านล่าง และถูกขับออกผ่านทางต่อมคายน้ำและปากใบได้มากกว่าการสะสม ตัวอยู่ในแวคคิวโอล โดยการสะสมตัวของสารหนูบริเวณขอบใบและผิวใบอาจทำให้อาร์เซไนต์บางส่วน ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนตได้

สอดคล้องกับ Hokura et al. (2006) ที่ทำการศึกษากการกระจายตัวและรูปฟอร์ม ทางเคมีของสารหนูในใบย่อยของกูดหมาก (*Pteris vittata*) ในช่วงการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน โดย ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging แสดงให้เห็นว่า สารหนูสามารถกระจายตัวสะสมอยู่ ตามเส้นใบในทุกช่วงการเจริญเติบโต โดยเฉพาะใบที่ไม่สร้างสปอร์ (Sterile Pinna) ที่มีการสะสม สารหนูปริมาณมากที่เส้นใบ ต่างจากใบอ่อน (Young Pinna with Spore) ใบที่เจริญเต็มที่ (Mature Pinna with Spore) และใบแก่ (Old Pinna) ที่จะมีการสะสมสารหนูปริมาณมากที่บริเวณขอบใบ และปลายใบ ในขณะที่โพแทสเซียมที่มีหน้าที่ในการสร้างสมดุลของไอออนภายในเซลล์ พบว่า มีการ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในใบอ่อน และมีการสะสมปริมาณมากที่บริเวณขอบใบและเส้นใบเมื่อใบ เข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตเต็มที่ จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะใบแก่ที่เกิดการแตกตัวของอับสปอร์ (Sporangium) และเกิดภาวะใบแห้ง (Browning) ที่บริเวณขอบใบ พบว่า การสะสมโพแทสเซียมที่ บริเวณขอบใบและเส้นใบลดลง และเกิดการสะสมโพแทสเซียมปริมาณมากที่บริเวณกลางใบ โดยการ กระจายตัวของสารหนูและโพแทสเซียมในบริเวณที่แตกต่างกันในใบแก่บ่งชี้ให้เห็นว่า สารหนูมีการ กระจายตัวอยู่ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพต่ำกว่า ในขณะที่ใบที่ไม่สร้างสปอร์จะพบการสะสม สารหนูในปริมาณมากที่บริเวณปลายใบ และยังพบว่า การการกระจายตัวของแคลเซียมเป็นไปใน ลักษณะเดียวกันกับการกระจายตัวของโพแทสเซียม นอกจากนี้ยังพบการสะสมสารหนูและโพแทสเซียมมี ปริมาณมากในบริเวณฐานของอับสปอร์ และจากผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูด้วย เทคนิค SR- μ -XANES พบว่า สารหนูในดินอยู่ในรูปของอาร์เซเนต และเกิดการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ อาร์เซไนต์เมื่อถูกดูดดึงเข้าสู่เซลล์พืช โดยที่ก้านใบ (Petiole) และเส้นกลางใบของใบที่เจริญเต็มที่ สามารถตรวจพบสารหนูทั้งในรูปอาร์เซเนตและอาร์เซไนต์ โดยมีสัดส่วนอยู่ในช่วงร้อยละ 29 - 37 และร้อยละ 63 - 71 ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณฐานใบ ปลายใบ และขอบใบ สามารถตรวจพบ สารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ได้ อย่างไรก็ตามในบริเวณที่เกิดภาวะใบแห้งของใบแก่ พบว่า สารหนูใน รูปอาร์เซไนต์ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนต

ในขณะที่ Hammond et al. (2018) ได้ทำการศึกษากลไกการดูดดึงและสะสม สารหนูในรากของกระถินหางกระรอก (*Prosopis juliflora*) ที่ปลูกในภาคโลหกรรมที่เกิดการผุพังอยู่ กับที่จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Weathering) ของอาร์เซโนไฟรต์ และมีความเข้มข้นของ

สารหนู 4,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการเติมปุ๋ยหมัก (Compost) ในอัตราส่วน 150 กรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลา 1 ปี โดยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเนื้อเยื่อแบบแผ่นบาง (Thin Section) ตามแนวยาวของรากด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging พบว่า เหล็กและสารหนูในรูปอาร์เซเนตมีการกระจายตัวและเกิดการสะสมในปริมาณมากในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส ในขณะที่โพแทสเซียมและซิลเฟอร์มีการสะสมในปริมาณมากในเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์และสตีล ซึ่งทำให้พบการกระจายตัวของสารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ที่จับอยู่กับซิลไฟต์ (As^{3+} -S) ในเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์และสตีลเช่นเดียวกัน โดยจากโครงสร้าง Fe K-edge μ XANES และ Fe K-edge EXAFS สามารถบ่งชี้ให้เห็นได้ว่า รูปฟอร์มทางเคมีของเหล็กในกากโลหะกรรม ชั้นของเหล็กที่เคลือบอยู่บริเวณผิวของรากพืช (Iron Plaque) เปลือกราก (Bark) และเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์ริก (Ferric Compound) ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานหรือโครงสร้างผลึกแบบไม่สมบูรณ์ (Poorly Crystalline) ของจาโรไซต์ (Jarosite) และชแวร์ทมานไนต์ (Schwertmannite) ซึ่งทำให้สารหนูในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิสอยู่ในรูปของอาร์เซเนตที่ถูกดูดซับด้วยสารประกอบเฟอร์ริก และเป็นสาเหตุที่ทำให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิสมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 1.61 - 3.64 ไมโครโมลต่อกรัม ในขณะที่สารหนูในเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์และสตีลมีสัดส่วนอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ที่จับอยู่กับซิลไฟต์ โดยมีความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในช่วง 0.15 - 0.21 และ 0.07 - 0.12 ไมโครโมลต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ชั้นของสารประกอบเฟอร์ริกที่เกิดขึ้นที่เปลือกรากสามารถจำกัดการดูดซับและสะสมสารหนูของรากพืช และยังทำให้การเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินลดลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษากลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระด้วย จลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดตั้งและสะสมสารหนู มีรายละเอียด วิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย

การศึกษาและวิจัยทั้งหมดในครั้งนี้ได้ดำเนินการทดลองที่โรงเรือนทดลอง ชั้น 2 อาคาร สถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ภาคผนวก ก) โดยทำการวิเคราะห์ ตัวอย่างกากโลหกรรมและหญ้าเนเปียร์แคระที่ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัย สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการวิเคราะห์กากโลหกรรมและหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยแสงซินโครตรอน ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย และ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน

3.2 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ภาชนะทดลองพลาสติกแบบทรงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้นภาชนะ ทดลอง 35 เซนติเมตร ปากภาชนะทดลอง 43 เซนติเมตร และมีความสูงของภาชนะทดลอง 22 เซนติเมตร
- 2) ภาชนะทดลองพลาสติกแบบทรงสี่เหลี่ยม ที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ความ ยาว 46 เซนติเมตร และมีความสูงของภาชนะทดลอง 27 เซนติเมตร
- 3) กระจกทดลองพลาสติก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร และมีความสูง 30 เซนติเมตร
- 4) ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (Graphite Electrode) แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร
- 5) ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L (316L Stainless Steel Electrode) แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 และ 9.52 มิลลิเมตร

6) เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Power Supply) ขนาด 30 โวลต์ 5 แอมแปร์ รุ่น RXN-305D ยี่ห้อ Zhaoxin

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) น้ำประปา (Tap Water)
- 2) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, >15 MΩ)
- 3) น้ำบริสุทธิ์สูง (Ultrapure Water, >18.2 MΩ)
- 4) ผงวุ้นเกรดอาหาร (Food Grade Agar)
- 5) ไตโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 6) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)
- 7) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- 8) เอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติกแอซิดไตโซเดียมซอลท์ไฮเดรต หรืออีดีทีเอไตโซเดียมซอลท์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{-EDTA}$, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- 9) กรดไนตริกเข้มข้น (69% HNO_3)
- 10) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)
- 11) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% (30% H_2O_2)
- 12) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As_2O_3)
- 13) อาร์เซนิกเพนตะออกไซด์ (As_2O_5)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) เครื่องวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll Meter) รุ่น SPAD-502Plus ยี่ห้อ Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง พิกัด 7,200 กรัม รุ่น SBA 61 ยี่ห้อ Scaltec ประเทศเยอรมนี
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง พิกัด 3,200 กรัม รุ่น CP3202S ยี่ห้อ Sartorius ประเทศเยอรมนี
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง พิกัด 220 กรัม รุ่น TB-224A ยี่ห้อ Denver Instrument ประเทศเยอรมนี
- 5) ตู้อบร้อน (Hot Air Oven) รุ่น SM400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
- 6) ตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ (Ultra-Low Temperature Freezers, -60°C) รุ่น Arctic 270 ยี่ห้อ The Cool ประเทศไทย

- 7) เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer) รุ่น Lyovapor™ L-200 ยี่ห้อ Buchi ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 8) เครื่องบดตัวอย่าง (Pulverizing Machine) รุ่น RT-04A บริษัท Rong Tsong Precision Technology Co. ประเทศไต้หวัน
- 9) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น pH 3210 set 4 ยี่ห้อ WTW ประเทศเยอรมนี
- 10) เครื่องวัดค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential Meter) รุ่น pH 3210 set 4 ยี่ห้อ WTW ประเทศเยอรมนี
- 11) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity Meter) รุ่น Cond 3210 set 2 ยี่ห้อ WTW ประเทศเยอรมนี
- 12) ชุดเครื่องย่อยสลายสารระบบปิดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digestion System) รุ่น UltraWAVE ยี่ห้อ Milestone ประเทศอิตาลี
- 13) เครื่องอินดักทีฟพลาสมาอิมมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ (Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) รุ่น PQ 9000 Elite ยี่ห้อ Analytik Jena ประเทศเยอรมนี
- 14) กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) รุ่น SZ61 ยี่ห้อ Olympus ประเทศญี่ปุ่น
- 15) ระบบลำเลียงแสงพหุเทคนิคครั้งสี่เอกซ์ (Beamline 1.1W, Multiple X-ray Techniques (MXT)) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ประเทศไทย
- 16) ระบบลำเลียงแสง 23A (Beamline 23A, X-ray Nanoprobe), Taiwan Photon Source (TPS), National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมกากโลหะกรรม

กากโลหะกรรมได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างจากบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศึกษาแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก ที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จากผิวดิน จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งแล้วทำการคลุกผสมตัวอย่างเพื่อให้ได้ตัวอย่างแบบผสมรวม (Composite Sample) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากโลหะกรรมด้วยวิธีการและเครื่องมือต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3.2 การเตรียมต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ

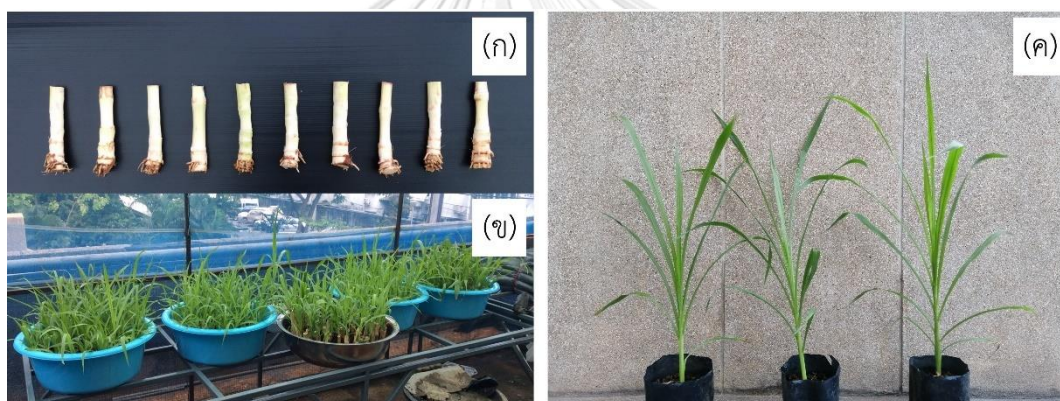
หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ได้จากการนำท่อนพันธุ์ที่มีอายุ 90 - 110 วัน ที่ตัดจากแปลงเพาะพันธุ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา อำเภอบางบาล จังหวัดนครราชสีมา แล้วนำท่อนพันธุ์ที่มีตาอยู่ที่ปล้องจำนวน 2 ตา มาขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำแบบท่อนเดียวในดินเพาะปลูก จากนั้นดูแลรักษาให้มีอายุ 6 สัปดาห์ เพื่อให้ต้นหญ้าพันธุ์จากระยะงอกและอยู่ในระยะแตกกอ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) ซึ่งมีความสมบูรณ์และแข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากโลหกรรม

พารามิเตอร์	วิธีการและเครื่องมือวิเคราะห์
1. ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture)	1. Pipette Method
2. ปริมาณความชื้น (Moisture Content)	2. Gravimetric Method
3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3. pH Meter
4. ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential, Eh)	4. ORP Meter
5. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)	5. Electrical Conductivity Meter
6. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC)	6. Ammonium Acetate Method
7. อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM)	7. Walkley and Black Method
8. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	8. Kjeldahl Method
9. ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus)	9. Bray 2 Method
10. ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium)	10. Ammonium Acetate Method
11. ความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด (Total As)	11. Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)
12. รูปร่างทางเคมีของสารหนู (As Speciation)	12. Synchrotron-X-ray-Absorption Near Edge Structure (SR-XANES)



รูปที่ 3.1 การเตรียมภาคโลหกรรม; (ก) บ่อกักเก็บภาคโลหกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก และ (ข) การคลุกผสมตัวอย่างภาคโลหกรรม



รูปที่ 3.2 การเตรียมพืชทดลอง; (ก) ท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ อายุ 3 สัปดาห์ และ (ข) ต้นกล้าหญ้าเนเปียร์แคระอายุ 3 สัปดาห์ และ (ค) ต้นกล้าหญ้าเนเปียร์แคระอายุ 6 สัปดาห์

3.3.3 การศึกษาการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้นปนเปื้อนสารหนู

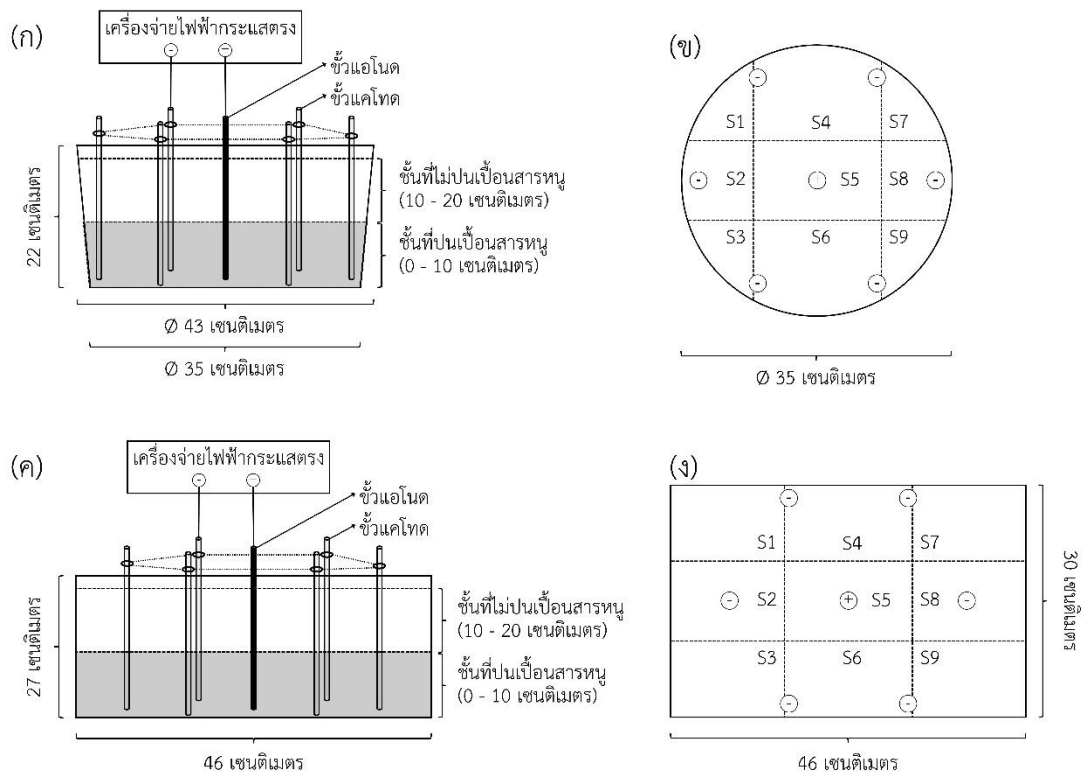
ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น โดยกำหนดให้มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal Two-Dimensional Electrode Configuration) ที่มีการติดตั้งขั้วแอโนดหรือขั้วบวก (ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L) จำนวน 1 ขั้ว บริเวณกึ่งกลางของภาชนะทดลอง ล้อมรอบด้วยขั้วแคโทดหรือขั้วลบ (ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L) จำนวน 6 ขั้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากันที่ 15 เซนติเมตร และเตรียมตัวกลางวุ้นจากการละลายผงวุ้นเกรดอาหาร ปริมาณ 15 กรัม ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์ (Putra et al.,

2013) โดยแบ่งตัวกลางวุ้นในภาชนะทดลองออกเป็น 2 ชั้น ได้แก่ 1) ชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูที่ระดับความสูง 0 - 10 เซนติเมตร จากก้นภาชนะทดลอง ที่มีการเติมสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนเนต เฮปตะไฮเดรต ความเข้มข้น 0.2173 กรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นสารหนู เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2) ชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู ที่ระดับความสูง 10 - 20 เซนติเมตร จากก้นภาชนะทดลอง ที่ไม่มีการเติมสารหนู ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การศึกษาผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู โดยแบ่งชุดการทดลอง ตามปัจจัยที่สนใจ คือ 1) การให้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาดของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร) 2) การใช้ขั้วแอโนดที่แตกต่างกัน (ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L) และ 3) ภาชนะทดลองที่แตกต่างกัน (ภาชนะทดลองแบบทรงกลมและแบบทรงสี่เหลี่ยม) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงทำการเก็บตัวอย่างตัวกลางวุ้นโดยแบ่งพื้นที่การเก็บตัวอย่างออกเป็น 9 ส่วน และแบ่งระดับความสูงออกเป็น 2 ชั้น แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคิปปิเลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตามวิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 2007a) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถทำให้สารหนูในตัวกลางวุ้นเกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมบริเวณขั้วแอโนดได้สูงที่สุด

2) การศึกษาผลของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 6 ชุดการทดลอง ตามชนิดและระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เติมลงในตัวกลางวุ้นชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู ได้แก่ 1) สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่ระดับความเข้มข้นฟอสเฟต เท่ากับ 25, 50 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2) สารละลายอีดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรต ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นอีดีทีเอ เท่ากับ 25, 50 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงทำการเก็บตัวอย่างตัวกลางวุ้นโดยแบ่งพื้นที่การเก็บตัวอย่างออกเป็น 9 ส่วน และแบ่งระดับความสูงออกเป็น 2 ชั้น แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคิปปิเลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตามวิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 2007a) เพื่อหาระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เหมาะสมที่สามารถทำให้สารประกอบสารหนูในตัวกลางวุ้นเกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมบริเวณขั้วแอโนดได้สูงที่สุด

3) การศึกษาผลของสารผสมต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู ทำการทดลองโดยใช้ระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2) มาทำการศึกษาผลของสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูด้วยวิธีการเดียวกันกับข้อ 2)



รูปที่ 3.3 ภาพด้านข้างของภาชนะทดลองพลาสติก การแบ่งชั้นของวุ้น และการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร แบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม; (ก) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ค) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม และภาพด้านบนแสดงการแบ่งพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างตัวกลางวุ้นออกเป็น 9 ส่วน (S1 - S9) ใน (ข) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ง) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม

3.3.4 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรม

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรม ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 3.3.3 เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยทำการปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของกากโลหกรรมให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 (Chirakkara et al., 2015) ด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือสารช่วยเร่งที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.3.3 โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองตามชนิดของสารช่วยเร่ง คือ 1) น้ำปราศจากไอออน (ชุดการทดลองควบคุม) 2) สารฟอสเฟต 3) สารอีดีทีเอ และ 4) สารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร และทำการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรมบริเวณขั้วแอโนดกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด ที่เวลา 72, 120 และ 168 ชั่วโมง โดยหลังจากการ

เก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมที่เวลา 72 และ 120 ชั่วโมง แล้วจะทำการเติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 2 ลิตร ในทุกชุดการทดลองเพื่อรักษาระดับความชื้นของกากโลหะกรรม โดยตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตามวิธีการของ USEPA Method 3051A (USEPA, 2007b)

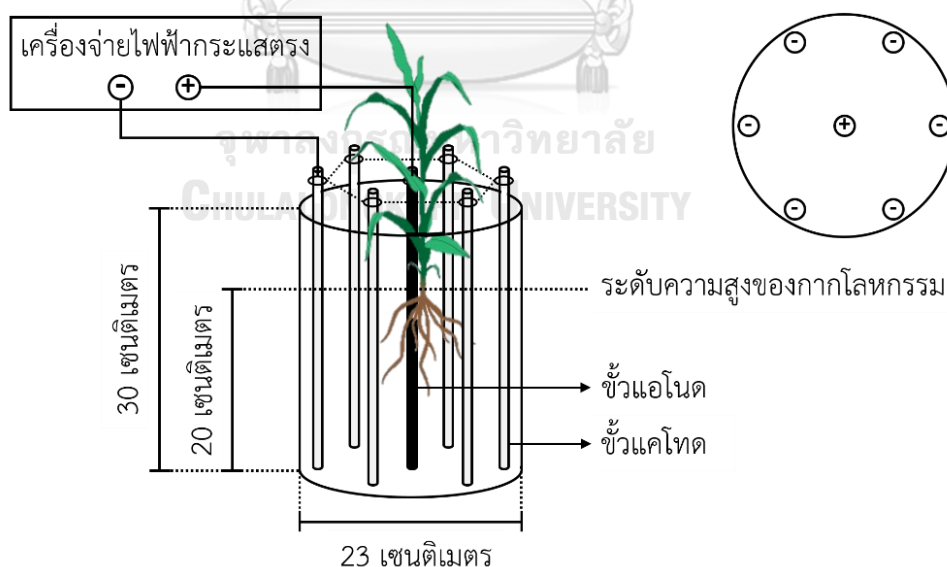
3.3.5 การศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงต่อการกร่อนและการปลดปล่อย เหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ของขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L

ทำการทดลองในน้ำประปาที่มีการให้สนามไฟฟ้าในขนาดที่ทำให้สารหนูในตัวกลาง วัฏเกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมบริเวณขั้วแอโนดได้สูงที่สุด เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ขั้วไฟฟ้า สแตนเลสเกรด 316L แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร เป็นขั้วแอโนด จำนวน 1 ขั้ว และขั้วแคโทด จำนวน 1 ขั้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 10 เซนติเมตร และทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปาที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ของการ ทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ ขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตาม วิธีการของ USEPA Method 3015A (USEPA, 2007a)

3.3.6 การทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนใน กากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารช่วยเร่งต่อการ ดูดดึงและสะสมสารหนูของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยทำการทดลองในกระถางทดลองที่มีการติดตั้ง ขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ที่มีการติดตั้งขั้วแอโนด จำนวน 1 ขั้ว บริเวณกึ่งกลาง ภาชนะทดลอง ล้อมรอบด้วยขั้วแคโทด จำนวน 6 ขั้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากันที่ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระอายุ 6 สัปดาห์ จะถูกย้ายมาปลูก บริเวณขั้วแอโนดในกระถางทดลองที่บรรจุกากโลหะกรรมที่มีระดับความสูง 20 เซนติเมตร ก่อนทำการ ทดลองเป็นเวลา 14 วัน เพื่อให้พืชได้ปรับตัว (Putra et al., 2013) หลังจากนั้นจึงเติมสารช่วยเร่ง 2 ชนิด คือ สารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอ โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 1) ชุดการทดลองควบคุม 1 ที่ ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง 2) ชุดการทดลองควบคุม 2 ที่มีการให้สนามไฟฟ้า แต่ไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง 3) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต ที่มีการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติม สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่มีระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟต แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.7, 1.4 และ 2.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (Wang et al., 2018a) และ 4) ชุดการทดลองสารอิตีทีเอ ที่มีการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารละลายอิตีทีเอไดโซเดียมซอลท์

ไดไฮเดรต ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$) ที่มีความเข้มข้นของสารอิติทีเอแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (Abbas & Abdelhafez, 2013) โดยหลังจากการเติมสารช่วยเร่งแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Luo et al., 2018) จึงทำการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน (Bi et al., 2011; Chirakkara et al., 2015) นอกจากนี้ยังมีการเติมน้ำประปาเพื่อให้ความชื้นของกากโลหะกรรมเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระตลอดระยะเวลาของการทดลองที่ 60 วัน และในวันที่ 15, 30, 45 และ 60 ของการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบพืช แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอนโดกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Hendershot et al., 2007) ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล และค่าการนำไฟฟ้า (Miller & Curtin, 2007) ของกากโลหะกรรม จากนั้นจึงนำตัวอย่างกากโลหะกรรมแบบผสมรวม (Composite Sample) ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตามวิธีการของ USEPA Method 3051A (USEPA, 2007b) และเก็บตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระโดยแยกตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) จากนั้นทำให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์ ตามวิธีการของ USEPA Method 3052 (USEPA, 1996)



รูปที่ 3.4 ขนาดของกระถางทดลองพลาสติก ตำแหน่งการปลูกต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ และการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ด้วยขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L แบบเพลากลม ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 มิลลิเมตร

3.3.7 การทดลองการเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการให้สนามไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับและสะสมสารหนูของหญ้าเนเปียร์แคะ โดยทำการทดลองในกระถางทดลองด้วยวิธีการเดียวกันกับการทดลอง 3.3.6

3.3.8 การศึกษาการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคะที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง

ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในส่วนต่างๆ ของหญ้าเนเปียร์แคะ คือ ราก ลำต้น และใบ ของชุดการทดลองในการทดลองที่ 3.3.6 และ 3.3.7 ที่พืชมีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพในการดูดซับและสะสมสารหนูสูงที่สุด โดยเตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อพืชในส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิคการตัดเนื้อเยื่อตามขวาง จากนั้นจึงนำตัวอย่างเนื้อเยื่อ (Specimen) ที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Vacuum Freeze Drying) แล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของสารหนูด้วยเทคนิค Synchrotron Based Micro-XRF Imaging (SR- μ -XRF Imaging) ที่ Beamline 23A นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในกากโลหะกรรมที่เตรียมตัวอย่างด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation Based Bulk-XANES (SR-Bulk-XANES) ที่ Beamline 1.1W โดยข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำแสงแสดงในตารางที่ 3.2

3.3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ในการทดลองการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) เพื่อหาค่า F-value ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในกรณีที่ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันจะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีดันแคน (Duncan's Multiple Range Test, DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำแสงที่ใช้ในการทดลอง

ข้อมูลทางเทคนิค	Beamline 1.1W*	Beamline 23A**
เทคนิคการวิเคราะห์	XAS	Micro-XRF Imaging
พลังงานของแสง (Photon Energy)	4 - 18 keV	4 - 15 keV
ความเข้มแสง (Photon Flux)	$10^7 - 10^{10}$ ph/s (@100 mA)	5×10^{10} ph/s
ค่าแยกชัดพลังงาน (Energy Resolution)	10^{-4}	-
ขนาดของลำแสง (Beam Size)	แนวนอน 6 mm แนวตั้ง 3 mm	40 x 40 nm ² (@10 keV)

ที่มา: * สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ประเทศไทย (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน))

** National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน
(สืบค้นจาก http://tpsbl.nsrcc.org.tw/bd_page.aspx?lang=en&pid=1027&port=23A)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

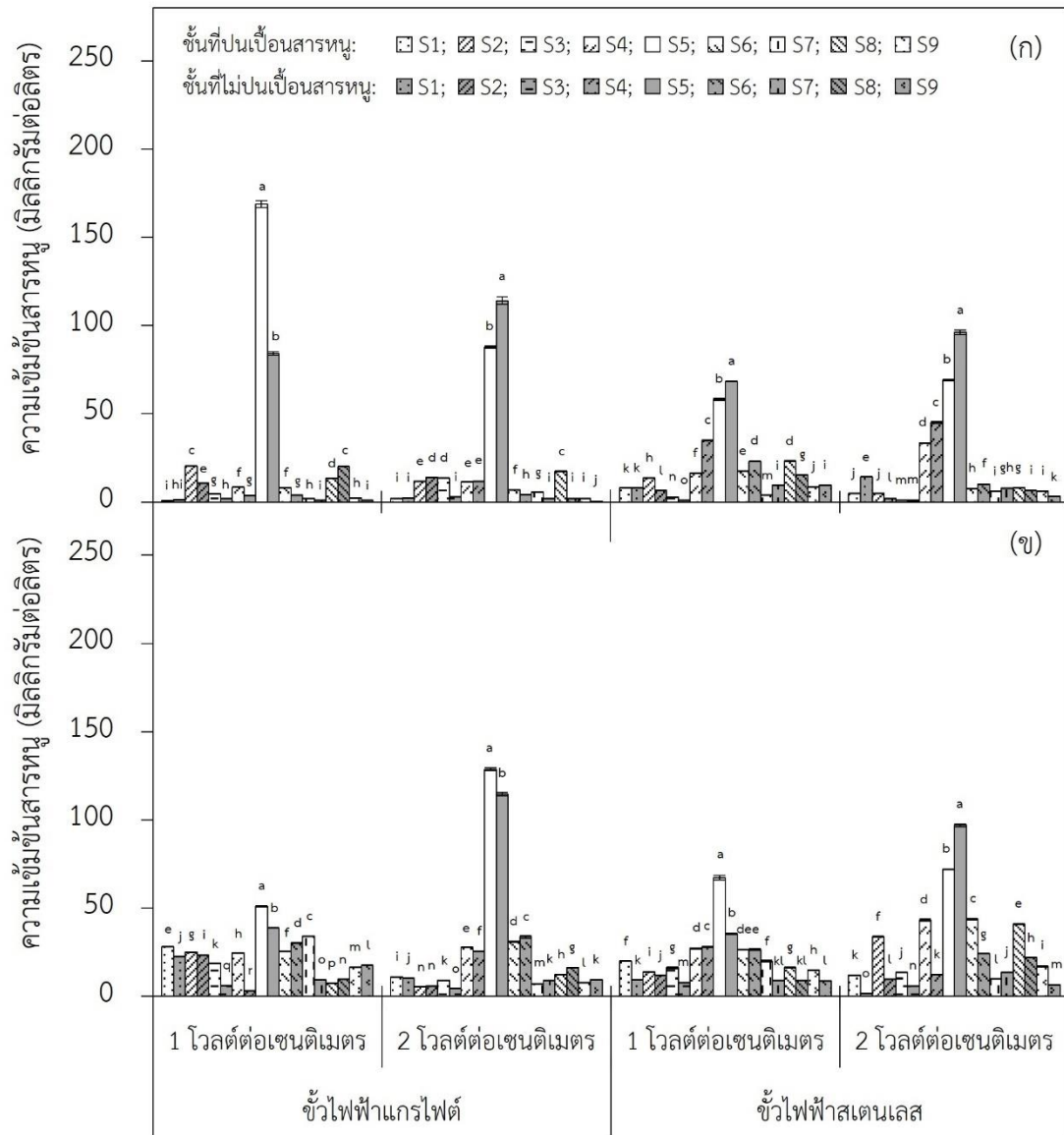
การศึกษากลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระด้วย จลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับและสะสมสารหนู แบ่งการทดลอง ออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น 2) การทดลองการ เคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรม 3) การทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีทีเอในการบำบัด สารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า และ 4) การศึกษา การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น

4.1.1 ผลของขนาดสนามไฟฟ้า ชนิดของขั้วแอโนด และรูปแบบของภาชนะทดลองต่อการ เคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น

จากสภาวะกรดที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด (Anode) และสภาวะด่างที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด (Cathode) สามารถทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล และค่าการนำไฟฟ้า ระหว่าง ขั้วไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) โดยการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามอิทธิพล ของสภาวะกรดและสภาวะด่างที่เกิดขึ้นในเวลานั้นๆ ซึ่งทำให้การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าไม่ สม่าเสมอและมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน (Alshawabkeh, 2009) ดังนั้น ขนาดสนามไฟฟ้า ชนิดของ ขั้วแอโนด และรูปแบบของภาชนะทดลอง จึงส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น โดย ความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่างของชุดการทดลองที่มีการ ติดตั้งขั้วแอโนดด้วยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และขั้วไฟฟ้าสเตนเลสในภาชนะทดลองแบบทรงกลม ดังแสดง ในรูปที่ 4.1(ก) และภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) แสดงให้เห็นถึงการ เคลื่อนที่ของสารหนูในรูปไอออนลบไปสะสมอยู่ที่บริเวณขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วย กลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน (Electromigration) และทำให้ตัวกลางวุ้นในพื้นที่ S5 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการ ติดตั้งขั้วแอโนดในทุกชุดการทดลองมีระดับความเข้มข้นของสารหนูสูงที่สุด โดยขนาดสนามไฟฟ้าที่ เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นของตัวกลางวุ้นในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ ปนเปื้อนสารหนู (ระดับความสูง 0 - 10 เซนติเมตร จากก้นภาชนะทดลอง) ที่มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู (ระดับความสูง 10 - 20 เซนติเมตร จากก้นภาชนะ

ทดลอง) ที่มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการเปลี่ยนแปลงตามชนิดของข้าวแอนด์ที่ติดตั้งอยู่ในภาชนะทดลองที่มีรูปแบบต่างกัน



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างข้าวในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูที่ทำการทดลองใน (ก) ภาชนะทดลองแบบทรงกลม และ (ข) ภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงกลม (รูปที่ 4.1(ก)) พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณหัวแวนอด (S5) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ติดตั้งหัวแวนอดด้วยหัวไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าเท่ากับ 168.78 ± 2.08 และ 84.14 ± 1.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเท่ากับ 87.69 ± 0.59 และ 114.06 ± 2.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ติดตั้งหัวแวนอดด้วยหัวไฟฟ้าสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 58.24 ± 0.65 และ 68.39 ± 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเท่ากับ 69.12 ± 0.56 และ 96.10 ± 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ผลการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 4.1(ข)) พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณหัวแวนอด (S5) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ติดตั้งหัวแวนอดด้วยหัวไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าเท่ากับ 51.05 ± 0.38 และ 38.84 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเท่ากับ 128.58 ± 0.78 และ 114.49 ± 0.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่ชุดการทดลองที่ติดตั้งหัวแวนอดด้วยหัวไฟฟ้าสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 67.18 ± 1.28 และ 35.38 ± 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าเท่ากับ 72.08 ± 0.17 และ 96.99 ± 0.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

นอกจากนี้ยัง พบว่า ชุดการทดลองที่ดำเนินการในภาชนะทดลองและติดตั้งหัวแวนอดแบบเดียวกันมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณหัวแวนอดทั้งในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยกเว้น ชุดการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงกลมที่มีการติดตั้งหัวแวนอดด้วยหัวไฟฟ้าแกรไฟต์ที่พบว่า ขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นที่ปนเปื้อนมีระดับความเข้มข้นของสารหนูลดลง แต่ในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูยังคงมีระดับความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้สารหนูในรูปอาร์เซเนตไอออน คือ $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} เกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชันมาสะสมที่บริเวณหัวแวนอด และพบว่า มีสารหนูเพียงบางส่วนที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นไปสะสมอยู่ในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำและก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่หัวแวนอด และเมื่อสนามไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น เท่ากับ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่หัวแวนอดเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งของสารหนูที่สะสมอยู่บริเวณหัวแวนอดที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Kim et al. (2012a) ที่ทำการบำบัดดินเค็มด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีการติดตั้งหัวไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ซึ่งพบว่า การให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้คลอไรด์ไอออน (Cl⁻) และ

ไนเตรตไอออน (NO_3^-) เกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบไปยังขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งขึ้นได้จากการระเหยของน้ำ (Water Evaporation)

ในขณะที่ขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density) หรือความเข้มของกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดย Xu et al. (2022) รายงานว่า เมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1, 1.5 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้ดินขาว (Kaolin Soil) ที่ปนเปื้อนสารหนูและโครเมียม มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 1.12, 1.57 และ 2.11 มิลลิโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับของขนาดสนามไฟฟ้า และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า มีค่าลดลง เท่ากับ 0.46, 0.51 และ 0.42 มิลลิโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับของขนาดสนามไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการชะละลายของไอออนในดินขาวเกิดความไม่สม่ำเสมอตามขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดของสารหนูและโครเมียมไม่ได้เพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้า ซึ่งต่างจากการทดลองในครั้งนี้ ที่ทำการศึกษาในตัวกลางวุ้นซึ่งเป็นตัวกลางคล้ายดินที่ไม่มีองค์ประกอบใดๆ ที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารหนู (Putra et al., 2013) โดยเมื่อขนาดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ความเข้มกระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ดำเนินการในภาชนะทดลองและติดตั้งขั้วแอโนดแบบเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดการทดลองที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสทั้งในภาชนะทดลองแบบทรงกลมและแบบทรงสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) สูงกว่าสแตนเลสเกรด 316L (Dihrab et al., 2009) ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณกระแสไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ของชุดการทดลองที่ดำเนินการในภาชนะทดลองแบบเดียวกันและให้สนามไฟฟ้าขนาดเท่ากันที่พบว่า ชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าสแตนเลส ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองในภาชนะทดลองแบบเดียวกันและให้สนามไฟฟ้าขนาดเท่ากันยังพบว่า ชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีระดับความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดทั้งในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูสูงกว่าชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าสแตนเลส โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ที่ทำการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยมที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าสแตนเลส โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 ความเข้มของกระแสไฟฟ้า ระดับความเข้มข้นสารหนูที่บริเวณหัวแอโนด (S5) และสัดส่วนปริมาณสารหนูที่บริเวณหัวแอโนด (S5) ในแต่ละชุดการทดลองของตัวกลางวันเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง

หัวไฟฟ้าแอโนด	ภาชนะทดลองแบบพรางกลม				ภาชนะทดลองแบบพรางสี่เหลี่ยม			
	แอมป์		สแตนเลส		แอมป์		สแตนเลส	
ขนาดสนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร)	1	2	1	2	1	2	1	2
ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า (แอมป์)	0.99	3.60	0.84	2.83	0.96	3.49	0.55	1.52
ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู	84.14±1.02 ^c	114.06±2.13 ^a	68.39±0.11 ^d	96.10±1.20 ^b	38.84±0.23 ^e	114.49±0.91 ^a	35.38±0.29 ^f	96.99±0.89 ^b
ชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู	168.78±2.08 ^a	87.69±0.59 ^c	58.24±0.65 ^s	69.12±0.56 ^e	51.05±0.38 ^h	128.58±0.78 ^b	67.18±1.28 ^f	72.08±0.17 ^d
สัดส่วนปริมาณสารหนู (ร้อยละ)								
ชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู	33.27±0.37 ^h	56.53±0.59 ^c	54.01±0.28 ^d	58.17±0.11 ^a	43.21±0.33 ^f	47.10±0.28 ^e	34.50±0.41 ^s	57.37±0.28 ^b
ชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู	66.73±0.37 ^a	43.47±0.59 ^f	45.99±0.28 ^e	41.83±0.11 ^h	56.79±0.33 ^c	52.90±0.28 ^d	65.50±0.41 ^b	42.63±0.28 ^s

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอนของความเข้มข้นสารหนูในแต่ละชั้นแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า การให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยมส่งผลให้การสะสมสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดที่มีค่าต่ำกว่าภาชนะทดลองแบบทรงกลมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ รูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal Two-Dimensional Electrode Configuration) ที่ทำให้พื้นที่ที่ไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Non-affected Area) ในภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยมมีมากกว่าภาชนะทดลองแบบทรงกลม และทำให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมยังบริเวณอื่นๆ ได้มากกว่าภาชนะทดลองแบบทรงกลม นอกจากนี้การติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ที่มีจำนวนขั้วแคโทดมากกว่าจำนวนขั้วแอโนดจะส่งผลให้เกิดพื้นที่ที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Affected Area) เพิ่มขึ้น และเกิดการขยายตัวของสภาวะกรดจากขั้วแอโนดที่เกิดจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น (Malekzadeh & Sivakugan, 2017) ส่งผลทำให้สารหนูในระบบมีความเป็นประจุลดลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้การเคลื่อนที่ในแนวราบด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชันมายังขั้วแอโนดของสารหนูในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ติดตั้งขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เกิดขึ้นได้น้อยกว่าการให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

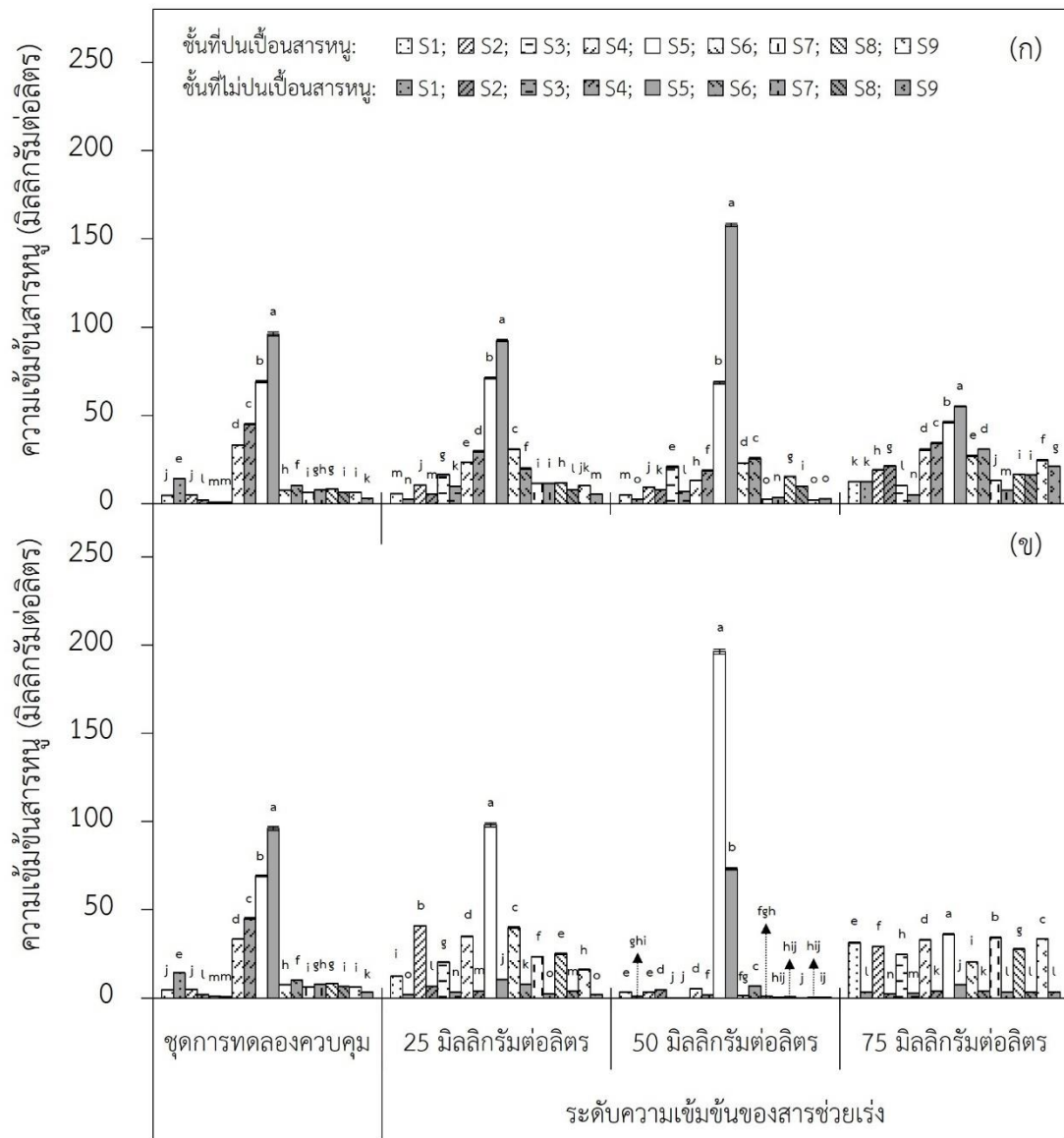
อย่างไรก็ตามแม้ว่าขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์จะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าดี ทนทานต่อการกัดกร่อน และไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการจากการกร่อนของขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะกรดและสภาวะออกซิเดชัน อย่างไรก็ตามขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีความเหมาะสมต่อการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากมีความเปราะ (Brittleness) รวมทั้งสามารถเกิดการกร่อนได้ที่บริเวณพื้นผิวเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานได้เช่นเดียวกัน ทำให้มีขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสแตนเลสจึงมักถูกนำมาใช้งานทดแทนขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ในการปฏิบัติงานในพื้นที่ปนเปื้อน (Cindy & Lim, 2014; Iannelli et al., 2015; Nunes et al., 2016) โดย Alshawabkeh et al. (1999) ได้แนะนำข้อควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการบำบัดด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ดังนี้ 1) สมบัติการนำไฟฟ้า 2) ความพร้อมใช้งาน 3) ความง่ายในการดัดแปลงให้เหมาะสมต่อการใช้งาน 4) ความสะดวกในการติดตั้ง และ 5) ต้นทุนในการผลิตและการติดตั้ง โดยเมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสและให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ภาชนะทดลองแบบทรงกลมมีระดับความเข้มข้นของสารหนูไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเทียบกับภาชนะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม แต่มีสัดส่วนปริมาณสารหนูในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 58.17 ± 0.11 โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นชุดการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงกลมที่ติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสและให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร จึงเป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น

4.1.2 ผลของระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น

ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมของการทดลองในภาชนะทดลองแบบทรงกลมที่ติดตั้งขั้วไฟฟ้าสเตนเลสและให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ชุดการทดลองควบคุม) ซึ่งมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนด (S5) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 69.12 ± 0.56 และ 96.10 ± 1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็นสัดส่วนปริมาณสารหนูร้อยละ 41.83 ± 0.11 และ 58.17 ± 0.11 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเมื่อทำการเติมสารช่วยเร่ง พบว่า ชนิดและระดับความเข้มข้นของสารช่วยเร่งที่แตกต่างกันสามารถทำให้ความเข้มข้นสารหนูบริเวณขั้วแอโนดของชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าแตกต่างกัน ดังนี้

1) สารฟอสเฟต

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก) พบว่า ชุดการทดลองที่ทำการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 71.21 ± 0.48 และ 92.41 ± 0.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในขณะที่ชุดการทดลองที่เติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูสูงที่สุด เท่ากับ 157.98 ± 1.03 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 68.58 ± 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองควบคุม โดยระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่มาสะสมอยู่ในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันของฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-}) และอาร์เซนิตไอออน (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-}) ที่จะเกิดการแตกตัวได้ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใกล้เคียงกัน (Strawn, 2018) ซึ่งทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟอสเฟตไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับอาร์เซนิตไอออน (Choi et al., 2010) โดยเมื่อสารประกอบฟอสเฟตเกิดการแตกตัวจะทำให้มีปริมาณไอออนในระบอบเพิ่มขึ้นและทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของตัวกลางวุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารหนูในรูปของอาร์เซนิตไอออนเคลื่อนที่ในแนวราบและไปสะสมอยู่ที่บริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชันและเคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นไปสะสมอยู่ในระดับที่สูงกว่าจากการระเหยของน้ำได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผลการทดลองเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุม เท่ากับ 46.19 ± 0.40 และ 55.10 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวันในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ทำการเติม (ก) สารฟอสเฟต และ (ข) สารอินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.2 ระดับความเข้มข้นสารหนูบริเวณข้าวแอนโด (S5) และสัดส่วนปริมาณสารหนูบริเวณข้าวแอนโด (S5) ในแต่ละชุดการทดลองของตัวกลางวันที่ทำการเติมสารฟอสเฟต สารอีทีไอ และสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีทีไอ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง

ภาชนะทดลองแบบกลมที่ติดตั้งข้าวฟัสเตนเลสและให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร									
ระดับความเข้มข้นสารช่วยเร่ง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0	25	50	75	0	0	0	0	50
สารฟอสเฟต	0	0	0	0	25	50	75	0	50
สารอีทีไอ	0	0	0	0	25	50	75	0	50
ความเข้มข้นสารหนู (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
ชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู	96.10±1.20 ^b	92.41±0.71 ^c	157.98±1.03 ^a	55.10±0.26 ^e	10.58±0.08 ^f	73.04±0.66 ^d	7.51±0.08 ^g	91.22±0.58 ^c	
ชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู	69.12±0.56 ^e	71.21±0.48 ^d	68.58±0.70 ^e	46.19±0.40 ^f	98.03±1.06 ^b	196.23±1.50 ^a	36.29±0.31 ^g	73.59±0.97 ^c	
สัดส่วนปริมาณสารหนู (ร้อยละ)									
ชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู	58.17±0.11 ^b	56.48±0.17 ^c	69.73±0.08 ^a	54.40±0.10 ^e	9.74±0.03 ^h	27.13±0.05 ^f	17.15±0.22 ^g	55.35±0.35 ^d	
ชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู	41.83±0.11 ^g	43.52±0.17 ^f	30.27±0.08 ^h	45.60±0.10 ^d	90.26±0.10 ^d	72.87±0.05 ^c	82.85±0.22 ^b	44.65±0.35 ^e	

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอนของความเข้มข้นสารหนูในแต่ละชั้นแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ของตัวกลางที่ลดลงจากปริมาณไอออนในระบบที่เพิ่มขึ้น (Isosaari & Sillanpää, 2012) โดยสภาวะดังกล่าวจะส่งผลต่อกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้ไอออนลบของสารหนูและฟอสเฟตที่สะสมอยู่ที่บริเวณขั้วแอโนดสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีประจุลดลงหรือรูปที่ไม่มีประจุ (Uncharged Species) ได้จากการรับโปรตรอน (Protonation) หรือไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นปริมาณมากที่บริเวณขั้วแอโนดจึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไอออนลบภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ามายังบริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชันลดลง อีกทั้งยังอาจเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามไปยังขั้วแคโทดด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิสของสารประกอบในรูปที่ไม่มีประจุได้ด้วยเช่นกัน

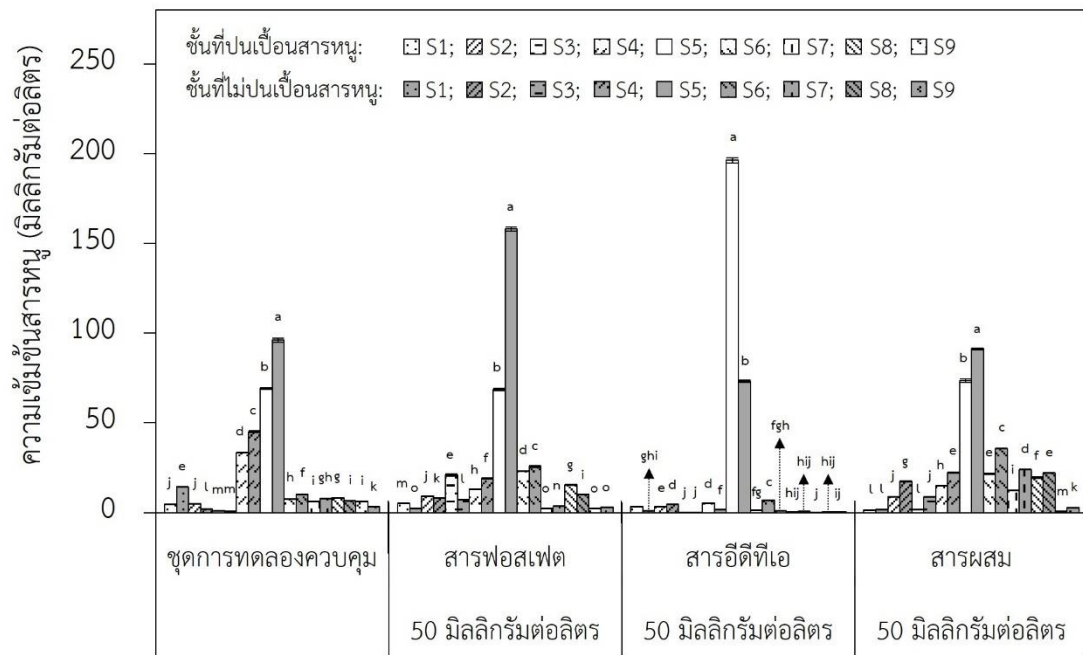
2) สารอีดีทีเอ

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2(ข) พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 98.03 ± 1.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 10.58 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในขณะที่ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูสูงที่สุด เท่ากับ 196.23 ± 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู เท่ากับ 73.04 ± 0.66 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบมาสะสมอยู่ในบริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูได้เพิ่มขึ้น แต่เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบอีดีทีเอสามารถแตกตัวอยู่ในรูปของไอออนลบ (H_3EDTA^- , H_2EDTA^{2-} , $HEDTA^{3-}$ และ $EDTA^{4-}$) ได้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่ามากกว่า 2 โดยจะมีประจุเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสารประกอบอีดีทีเอจะอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (H_4EDTA) และรูปของไอออนบวก (H_5EDTA^+) ได้ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าต่ำกว่า 2 (Crisponi & Nurchi, 2016; Maketon et al., 2008) ดังนั้น สารประกอบอีดีทีเอที่แตกตัวอยู่ในรูปของไอออนลบจึงสามารถเคลื่อนที่ในแนวราบภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปสะสมอยู่ที่ขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชันได้เช่นเดียวกันกับอาร์เซนเตไอออน อย่างไรก็ตามการสะสมตัวที่บริเวณขั้วแอโนดของสารประกอบอีดีทีเอซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และมีมวลโมเลกุลสูง (Crisponi & Nurchi, 2016; Maketon et al., 2008) สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งเพื่อไปสะสมอยู่ในระดับที่สูงกว่าจากการระเหยของน้ำของอาร์เซนเตไอออนได้ นอกจากนี้เมื่อระดับความ

เข้มข้นของสารอีดีทีเอเพิ่มขึ้นเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณข้าวแอนด์ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 36.29 ± 0.31 และ 7.51 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณไอออนในระบบที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่เติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร

3) สารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอ

จากผลของระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวุ้น สามารถสรุปได้ว่า การเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สารหนูบริเวณข้าวแอนด์เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นไปสะสมในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูได้สูงที่สุด ในขณะที่การเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบมาสะสมที่บริเวณข้าวแอนด์ในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูได้สูงที่สุด ดังนั้น ในชุดการทดลองสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอจึงทำการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณข้าวแอนด์ในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู มีค่าเท่ากับ 73.59 ± 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมและชุดการทดลองที่เติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และระดับความเข้มข้นของสารหนูในบริเวณข้าวแอนด์ในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู มีค่าเท่ากับ 91.22 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมและชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตาม พบว่า การเคลื่อนที่และการสะสมสารหนูในชุดการทดลองสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอมีแนวโน้มใกล้เคียงกับชุดการทดลองควบคุม โดยคาดว่าสาเหตุมาจากสมดุลไอออนระหว่างไอออนบวก ได้แก่ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) โพแทสเซียมไอออน (K^+) และโซเดียมไอออน (Na^+) และไอออนลบ ได้แก่ ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และอีดีทีเอไอออน ($EDTA^{4-}$) ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) และอีดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรต ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$) จึงทำให้การเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอไม่ทำให้ปริมาณไอออนในระบบและสภาพการนำไฟฟ้าของตัวกลางวุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.3 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวกลางวุ้นในแต่ละจุดพื้นที่ของการเก็บตัวอย่าง 9 ส่วน (S1 - S9) ในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูของชุดการทดลองที่ทำการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สารอิตีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอิตีทีเอ
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรม

การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมทำการทดลองภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จาก 4.1.2 โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดการทดลองควบคุม 2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต 3) ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ และ 4) ชุดการทดลองสารผสม ซึ่งทำการเติมน้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารผสมระหว่างสารละลายฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ตามลำดับของชุดการทดลอง ในการปรับความชื้นเริ่มต้นของกากโลหะกรรมให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากโลหะกรรม

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกากโลหะกรรมแห้งแบบผสมรวมที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างจากบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก ที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า กากโลหะกรรมมีองค์ประกอบของทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) คิดเป็น ร้อยละ 56.6, 33.8 และ 9.6 ตามลำดับ ซึ่งทำให้กากโลหะกรรมมีลักษณะเนื้อดินแบบดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) (Soil Science Division Staff, 2017) โดยกากโลหะกรรมมีปริมาณความชื้น เท่ากับ ร้อยละ 1.02 ± 0.04 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.35 ± 0.05 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล เท่ากับ 242.18 ± 7.39 มิลลิโวลต์ และค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 2.46 ± 0.62 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า กากโลหะกรรมมีความเป็นด่างเล็กน้อย อยู่ในสภาวะออกซิเดชัน และมีความเค็มอยู่ในระดับน้อยมาก (Very Slightly Saline) (Soil Science Division Staff, 2017) นอกจากนี้ยังพบว่า กากโลหะกรรมมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 2.43 เซนติโมลต่อกิโลกรัม อินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 0.65 และมีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus) และโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium) คิดเป็น ร้อยละ 0.03, 0.002 และ 0.03 ตามลำดับ ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืชที่มีปริมาณต่ำมาก รวมทั้งยังปนเปื้อนโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงหลายชนิด ได้แก่ สารหนู (As) เหล็ก (Fe) อะลูมิเนียม (Al) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) และซีลีเนียม (Se) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้กากโลหะกรรมจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำไม่ใช่ตัวกลางที่เหมาะสมจะนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้เช่นเดียวกัน

กับดินเพาะปลูกตามธรรมชาติ หากแต่เมื่อทำการพิจารณาตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ดิพีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 138 ตอนพิเศษ 54 ง ลงวันที่ 11 มีนาคม 2564 พบว่า กากโลหะกรรมมีความเข้มข้นสารหนูเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการค้าขาย เกษตรกรรม และกิจการอื่นๆ ที่กำหนดให้สารหนูต้องมีค่าไม่เกิน 6 และไม่เกิน 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 สมบัติของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนู

สมบัติของกากโลหะกรรม	ค่าที่ตรวจวัดได้
1. ลักษณะเนื้อดิน	ดินร่วนปนทราย
ทราย (ร้อยละ)	56.6
ทรายแป้ง (ร้อยละ)	33.8
ดินเหนียว (ร้อยละ)	9.6
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	1.02±0.04
3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.35±0.05
4. ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	242.18±7.39
5. ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนตต่อเมตร)	2.46±0.62
6. ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	2.43
7. อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	0.65
8. ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	0.03
9. ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ร้อยละ)	0.002
10. โพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ร้อยละ)	0.03
11. ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
สารหนู	62.60±2.60
เหล็ก	26,942.6±478
อะลูมิเนียม	14,390.4±634
แมงกานีส	1,193.7±47
สังกะสี	77.17±2.24
ทองแดง	73.91±17.21
โครเมียม	47.54±12.69
ตะกั่ว	14.14±1.62

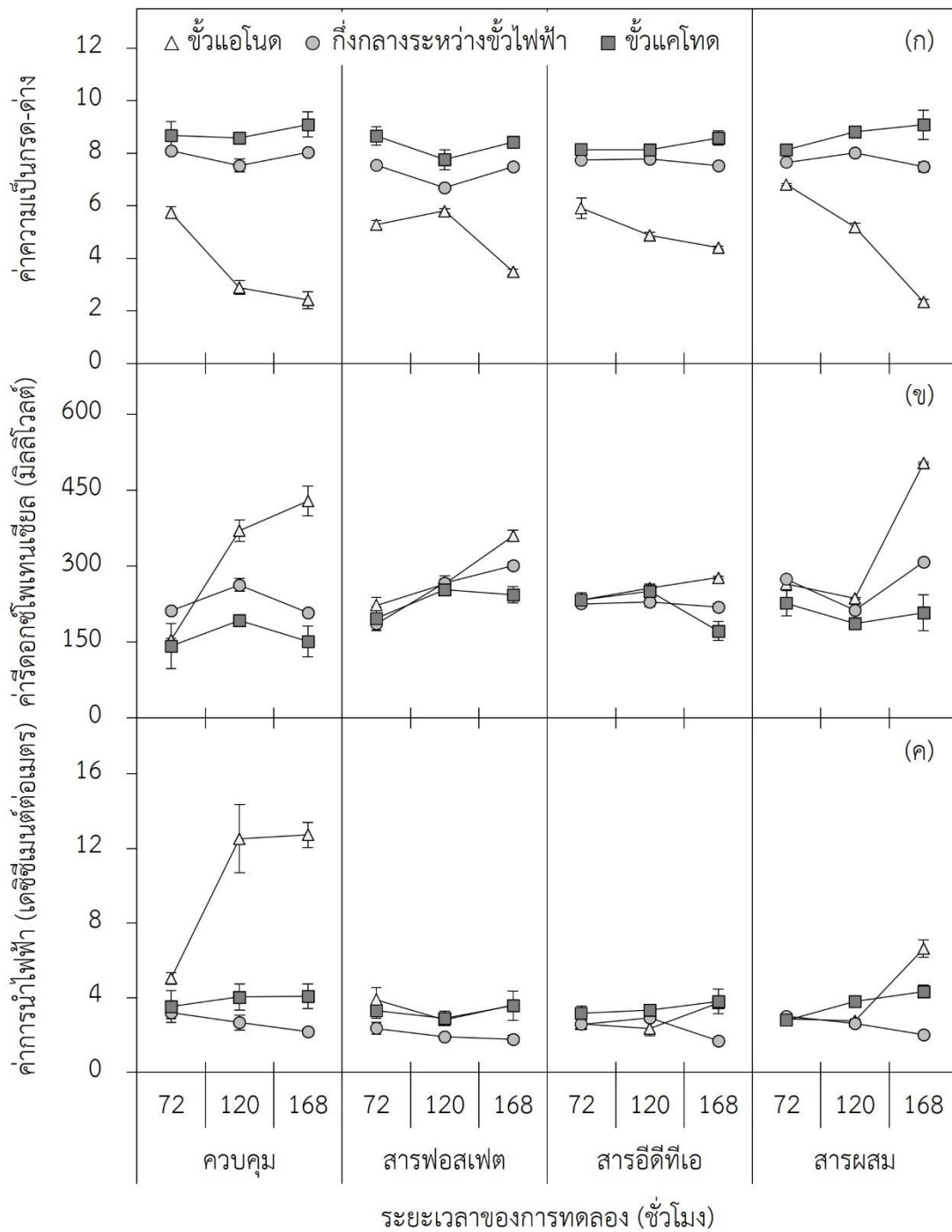
4.2.2 ผลของสารช่วยเร่งต่อสมบัติของกากโลหะกรรมภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

การเติมสารช่วยเร่งส่งผลต่อสมบัติของกากโลหะกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ ดังนี้

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 5.74 ± 0.22 โดยต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ที่มีค่าเท่ากับ 8.35 ± 0.05 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 หลังจากนั้นที่เวลา 120 ชั่วโมง มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และที่เวลา 168 ชั่วโมง มีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 2.89 ± 0.27 และ 2.41 ± 0.32 ตามลำดับ ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 154.13 ± 3.35 มิลลิโวลต์ โดยต่ำกว่าค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น ที่มีค่าเท่ากับ 242.18 ± 7.39 มิลลิโวลต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 หลังจากนั้นที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 370.10 ± 21.32 และ 428.40 ± 29.43 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแตกต่างจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแคโทดที่เวลา 72 และ 120 ชั่วโมง ที่มีค่าเท่ากับ 8.68 ± 0.53 และ 8.58 ± 0.16 ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.10 ± 0.48 โดยมีค่าแตกต่างกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 141.87 ± 44.59 - 192.64 ± 9.09 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าต่ำกว่าค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าเท่ากับ 8.05 ± 0.06 และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล มีค่าเท่ากับ 208.33 ± 1.71 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น ตามลำดับ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองควบคุมที่เกิดขึ้นเป็นผลจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Water Electrolysis) ทำให้ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ในขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) (Cameselle, 2015; Kim et al., 2014; Reddy & Cameselle, 2009) โดยสภาวะที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง แต่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเพิ่มขึ้น ในขณะที่กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น แต่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลลดลง



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ข) ค่ารีดอกซ์โฟเทินเซียล และ (ค) ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลทกรรมที่บริเวณข้าวแอนโด กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า และบริเวณข้าวแคโทด ของ 1) ชุดการทดลองควบคุม 2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต 3) ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ และ 4) ชุดการทดลองสารผสม ที่ระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์ (แอนด์) กึ่งกลางระหว่างข้าวแอนด์และข้าวแคโทด (กึ่งกลาง) และบริเวณข้าวแคโทด (แคโทด)

เวลา (ชั่วโมง)	จุดเก็บ ตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง			
		ควบคุม	สารฟอสเฟต	สารอีดีทีเอ	สารผสม
0	ตัวอย่างผสม	8.35±0.05 ^{bcA}	8.35±0.05 ^{aA}	8.35±0.05 ^{abA}	8.35±0.05 ^{bA}
72	แอนด์	5.74±0.22 ^{eB}	5.28±0.17 ^{eC}	5.91±0.39 ^{dB}	6.80±0.04 ^{eA}
	กึ่งกลาง	8.09±0.07 ^{cA}	7.55±0.05 ^{bC}	7.74±0.04 ^{cB}	7.65±0.14 ^{cdBC}
	แคโทด	8.68±0.53 ^{abA}	8.66±0.35 ^{aA}	8.14±0.19 ^{bB}	8.13±0.12 ^{bB}
120	แอนด์	2.89±0.27 ^{fC}	5.80±0.10 ^{dA}	4.88±0.12 ^{eB}	5.19±0.16 ^{fB}
	กึ่งกลาง	7.54±0.24 ^{dB}	6.70±0.12 ^{cC}	7.78±0.06 ^{cAB}	8.02±0.06 ^{bcA}
	แคโทด	8.58±0.16 ^{bcA}	7.76±0.38 ^{bC}	8.14±0.13 ^{bB}	8.81±0.17 ^{aA}
168	แอนด์	2.41±0.32 ^{fC}	3.49±0.11 ^{fB}	4.40±0.06 ^{fA}	2.34±0.10 ^{gC}
	กึ่งกลาง	8.05±0.06 ^{cA}	7.48±0.09 ^{bB}	7.53±0.09 ^{cB}	7.49±0.18 ^{dB}
	แคโทด	9.10±0.48 ^{aA}	8.44±0.17 ^{aB}	8.59±0.27 ^{aB}	9.09±0.55 ^{aA}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด)

เวลา (ชั่วโมง)	จุดเก็บ ตัวอย่าง	ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)			
		ควบคุม	สารฟอสเฟต	สารอีดีทีเอ	สารผสม
0	ตัวอย่างผสม	242.18±7.39 ^{cdA}	242.18±7.39 ^{deA}	242.18±7.39 ^{bcdA}	242.18±7.39 ^{deA}
72	แอโนด	154.13±3.35 ^{fc}	222.43±15.76 ^{eb}	233.67±7.55 ^{cdeB}	264.60±5.41 ^{cdA}
	กึ่งกลาง	211.60±5.17 ^{deB}	185.87±12.48 ^{fc}	225.23±5.90 ^{deB}	273.90±4.32 ^{ca}
	แคโทด	141.87±44.59 ^{fc}	196.36±23.88 ^{fb}	233.18±13.95 ^{cdeA}	226.59±24.60 ^{efAB}
120	แอโนด	370.10±21.32 ^{ba}	264.90±16.04 ^{cdB}	256.83±7.85 ^{bBC}	236.73±1.44 ^{defC}
	กึ่งกลาง	263.03±13.06 ^{ca}	266.57±8.00 ^{ca}	229.60±9.51 ^{deB}	213.13±3.95 ^{efgB}
	แคโทด	192.64±9.09 ^{eb}	253.74±6.87 ^{cdA}	250.39±6.56 ^{bcA}	186.46±8.44 ^{gB}
168	แอโนด	428.40±29.43 ^{ab}	359.43±11.14 ^{ac}	277.23±2.97 ^{ad}	503.67±2.22 ^{aa}
	กึ่งกลาง	208.33±1.71 ^{deB}	301.40±7.07 ^{ba}	219.20±7.27 ^{eb}	308.03±5.59 ^{ba}
	แคโทด	151.48±30.40 ^{fc}	243.31±15.79 ^{deA}	171.74±18.55 ^{fc}	207.96±35.28 ^{fgB}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

นอกจากนี้ H^+ ที่เกิดขึ้นยังมีปริมาณมากกว่า OH^- ถึงสองเท่า ทำให้สภาวะกรดเกิดการขยายตัวได้มากกว่าสภาวะด่าง (Cameselle, 2015; Paz-Garcia et al., 2012; Reddy & Cameselle, 2009) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรุนแรง อย่างไรก็ตามการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยมในการทดลองนี้ที่มีจำนวนขั้วแคโทด (6 ขั้ว) มากกว่าขั้วแอโนด (1 ขั้ว) ทำให้ OH^- และ H_2 ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดสามารถช่วยยับยั้งการขยายตัวของสภาวะกรด และน่าจะเป็นสาเหตุทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และที่บริเวณขั้วแคโทดเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kim et al. (2012b) และ Kim et al. (2014) ที่พบว่า การติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบขนาน สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม ที่มีจำนวนขั้วแคโทดมากกว่าขั้วแอโนด 2, 4 และ 6 เท่า ตามลำดับ สามารถทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารแคโทไลต์ (Catholyte) ที่ขั้วแคโทดเกิดการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าสารแอโนไลต์ (Anolyte) ที่ขั้วแอโนด

ในขณะที่การเติมสารฟอสเฟตสามารถช่วยลดความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าได้ โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 5.28 ± 0.17 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 5.80 ± 0.10 และ 3.49 ± 0.11 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) ที่พบว่า กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 222.43 ± 15.76 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 4.5 และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 264.90 ± 16.04 และ 359.43 ± 11.14 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่เวลาเดียวกัน พบว่า ชุดการทดลองสารฟอสเฟตมีค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดแตกต่างกับชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามียังอยู่ในช่วง $6.70 \pm 0.12 - 7.55 \pm 0.05$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองควบคุมที่เวลาเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $7.76 \pm 0.38 - 8.66 \pm 0.35$ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่เวลาเดียวกัน พบว่า ชุดการทดลองสารฟอสเฟตมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแคโทดที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง ต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าและบริเวณขั้วแคโทดที่มี

แนวโน้มสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมที่เวลาเดียวกัน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ชุดการทดลองสารฟอสเฟตมีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าและบริเวณขั้วแคโทด เท่ากับ 301.40 ± 7.07 และ 243.31 ± 15.79 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (รูปที่ 4.4(ก)) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (รูปที่ 4.4(ข)) ของชุดการทดลองสารฟอสเฟตภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นน้อยกว่าชุดการทดลองควบคุม มีสาเหตุมาจากสมบัติในการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดีของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต อีกทั้งโพแทสเซียมไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ในรูปไอออนบวกได้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 2 - 12 (Isosaari & Sillanpää, 2012) และจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้เกิดสมดุลไอออนระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ และช่วยลดสถานะต่างที่เกิดจากอิทธิพลของ OH^- ที่บริเวณขั้วแคโทด ในขณะที่ฟอสเฟตไอออนที่เกิดขึ้นจะเกิดการรับโปรตอน ซึ่งจะช่วยลดสถานะกรดที่เกิดจากอิทธิพลของ H^+ ที่บริเวณขั้วแอโนดได้

ในขณะที่การเติมสารอีดีทีเอส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเติมสารฟอสเฟต โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 5.91 ± 0.39 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีค่าลดลงเท่ากับ 4.88 ± 0.12 และ 4.40 ± 0.06 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากนั้นมีแนวโน้มคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.53 ± 0.09 - 7.78 ± 0.06 ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 8.14 ± 0.13 - 8.59 ± 0.27 ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การเติมสารอีดีทีเอส่งผลให้ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากการเติมสารฟอสเฟต โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) พบว่า ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด ที่เวลา 72 และ 120 ชั่วโมง เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 225.23 ± 5.90 - 256.83 ± 7.85 มิลลิโวลต์ และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ 277.23 ± 2.97 , 219.20 ± 7.27 และ 171.74 ± 18.55 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการ

ทดลองควบคุม พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองสารอีดีทีเอเกิดการเปลี่ยนแปลงได้น้อยกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากสารอีดีทีเอสามารถแตกตัวอยู่ในรูปไอออนลบได้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่ามากกว่า 2 และจะมีประจุเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น (Maketon et al., 2008) ซึ่งทำให้สารอีดีทีเอสามารถทำหน้าที่รับโปรตอน (Protonation) ที่ซั้วแอโนด และให้โปรตอน (Deprotonation) ที่ซั้วแคโทดได้ในเวลาเดียวกัน (Kim et al., 2014) ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ซั้วแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันที่ซั้วแคโทดลดลง

ผลการทดลองที่แตกต่างแสดงให้เห็นในชุดการทดลองสารผสม โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณซั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 6.80 ± 0.04 โดยมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากนั้นที่เวลา 120 ชั่วโมง มีค่าลดลงเท่ากับ 5.19 ± 0.16 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 168 ชั่วโมง มีค่าลดลงเท่ากับ 2.34 ± 0.10 โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณซั้วแอโนดของชุดการทดลองควบคุม ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างซั้วไฟฟ้ามีค่าลดลงที่เวลา 72 ชั่วโมง โดยมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลองเช่นเดียวกันกับชุดการทดลองสารฟอสเฟตและชุดการทดลองสารอีดีทีเอ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $7.49 \pm 0.18 - 8.02 \pm 0.06$ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณซั้วแคโทดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 9.09 ± 0.55 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองควบคุม นอกจากนี้การเติมสารผสมยังส่งผลทำให้ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่บริเวณซั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างซั้วไฟฟ้า และบริเวณซั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ 264.60 ± 5.41 , 273.90 ± 4.32 และ 226.59 ± 24.60 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่าค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณซั้วแอโนด และกึ่งกลางระหว่างซั้วไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 503.67 ± 2.22 และ 308.03 ± 5.59 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณซั้วแคโทดมีค่าลดลง เท่ากับ 207.96 ± 35.28 มิลลิโวลต์ โดยที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่เวลา 168 ชั่วโมง ยังคงมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่เวลา 72 ชั่วโมง ยังคงแสดงให้เห็นถึงบทบาทของสารฟอสเฟตในการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (Isosaari & Sillanpää, 2012) และสารอีดีทีเอที่ทำหน้าที่ในการรับโปรตอน (Protonation) ที่ซั้วแอโนด และให้โปรตอน (Deprotonation) ที่ซั้วแคโทด (Kim et al., 2014) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น

พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอาจจะมีสาเหตุมาจากการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ทำให้ชุดการทดลองสารผสมมีปริมาณของสารช่วยเร่งโดยรวมมากกว่าชุดการทดลองอื่น ดังนั้น ปริมาณไอออนในระบบที่เกิดการแตกตัวของสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอจึงมีมากกว่าชุดการทดลองอื่น และเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงผลให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 168 ชั่วโมง โดยเฉพาะกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

2) ค่าการนำไฟฟ้า

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 5.02 ± 0.31 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และมีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น ที่มีค่าเท่ากับ 2.46 ± 0.62 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 12.52 ± 1.82 และ 12.72 ± 0.68 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกับค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยัง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง $3.52 \pm 0.86 - 4.08 \pm 0.66$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างกับค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $2.18 \pm 0.15 - 3.19 \pm 0.33$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น

ในขณะที่การเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยชุดการทดลองสารฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง $2.81 \pm 0.19 - 3.89 \pm 0.65$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และชุดการทดลองสารอีดีทีเอ มีค่าอยู่ในช่วง $2.35 \pm 0.38 - 3.70 \pm 0.06$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดของทั้งสองชุดการทดลองมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมที่เวลาเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ยัง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับชุดการทดลองควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ชุดการทดลองสารฟอสเฟตและชุดการทดลองสารอีดีทีเอ มีค่าเท่ากับ 1.77 ± 0.20 และ 1.68 ± 0.15 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดของทั้งสองชุดการทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลองควบคุม โดยชุดการทดลองฟอสเฟต มีค่าอยู่

ในช่วง 2.90 ± 0.37 - 3.57 ± 0.79 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และชุดการทดลองสารอีทีทีเอ มีค่าอยู่ในช่วง 3.17 ± 0.38 - 3.80 ± 0.66 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร

ตารางที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด)

เวลา (ชั่วโมง)	จุดเก็บ ตัวอย่าง	ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)			
		ควบคุม	สารฟอสเฟต	สารอีทีทีเอ	สารผสม
0	ตัวอย่างผสม	2.46 ± 0.62^{deA}	2.46 ± 0.62^{cdA}	2.46 ± 0.62^{dA}	2.46 ± 0.62^{deA}
72	แอโนด	5.02 ± 0.31^{bA}	3.89 ± 0.65^{aB}	2.58 ± 0.17^{cdC}	2.87 ± 0.06^{dC}
	กึ่งกลาง	3.19 ± 0.33^{cdeA}	2.35 ± 0.31^{cdC}	2.57 ± 0.19^{cdBC}	3.00 ± 0.18^{dAB}
	แคโทด	3.52 ± 0.86^{cdA}	3.30 ± 0.40^{abAB}	3.17 ± 0.38^{abcAB}	2.79 ± 0.27^{dB}
120	แอโนด	12.52 ± 1.82^{aA}	2.81 ± 0.19^{bcB}	2.35 ± 0.38^{dB}	2.75 ± 0.10^{dB}
	กึ่งกลาง	2.66 ± 0.41^{deA}	1.91 ± 0.09^{dB}	2.91 ± 0.09^{bcdA}	2.62 ± 0.11^{dA}
	แคโทด	4.03 ± 0.69^{bcA}	2.90 ± 0.37^{bcC}	3.34 ± 0.30^{abBC}	3.80 ± 0.24^{cAB}
168	แอโนด	12.72 ± 0.68^{aA}	3.61 ± 0.04^{abC}	3.70 ± 0.06^{aC}	6.64 ± 0.47^{aB}
	กึ่งกลาง	2.18 ± 0.15^{eA}	1.77 ± 0.20^{dBC}	1.68 ± 0.15^{eC}	2.01 ± 0.07^{eAB}
	แคโทด	4.08 ± 0.66^{bcA}	3.57 ± 0.79^{abA}	3.80 ± 0.66^{aA}	4.33 ± 0.34^{bA}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

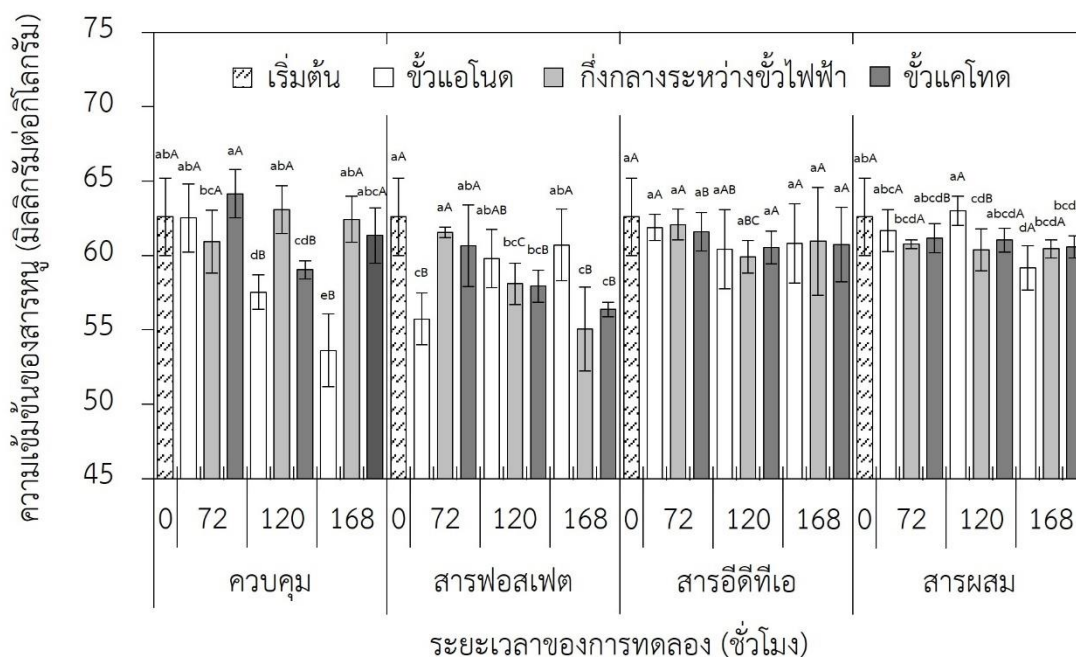
การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า และสารช่วยเร่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kim et al. (2005) ที่รายงานว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับ 1) ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า 2) ไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของสารช่วยเร่ง และ 3) ไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การคายซับ (Desorption) และการชะละลาย (Dissolution) อย่างไรก็ตามนอกจาก H^+ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้เกิดสภาวะกรดด้วย ซึ่งทำให้เกิดการชะละลายของโลหะหนักโดยเฉพาะเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส ให้อยู่ในรูปของโลหะไอออนบวก โดย H^+ และโลหะไอออนบวกที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทด และทำให้โลหะหนักที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าสามารถเกิดการชะละลายด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม OH^- ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดสามารถที่จะรวมตัวกับ H^+ เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ รวมทั้งยังทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่มายังขั้วแคโทดเกิดการตกตะกอนหรือถูกดูดซับได้ ส่งผลให้ที่บริเวณขั้วแคโทดเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่บริเวณขั้วแอโนด (Acar et al., 1995; Reddy & Cameselle, 2009) ในขณะที่การเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอในการทดลองครั้งนี้ไม่ส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมโดยเฉพาะที่บริเวณขั้วแอโนดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากการที่ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และอีดีทีเอไอออน ($EDTA^{4-}$) แสดงบทบาทในการรับโปรตรอน ซึ่งส่งผลทำให้ H^+ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดมีปริมาณลดลง และทำให้กากโลหะกรรมของชุดการทดลองสารฟอสเฟตและชุดการทดลองสารอีดีทีเอที่เอเกิดสมดุลของไอออนในระบบได้มากกว่าชุดการทดลองควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลองสารฟอสเฟตและชุดการทดลองสารอีดีทีเอที่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม (รูปที่ 4.4(ก))

อย่างไรก็ตาม การเติมสารผสมแสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่แตกต่างกับการเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ โดยจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 72 ชั่วโมง ในทุกจุดของการเก็บตัวอย่าง และที่เวลา 120 ชั่วโมง ที่บริเวณขั้วแอโนดและกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า มีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $2.62 \pm 0.11 - 3.00 \pm 0.18$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากสมดุลของไอออนที่เกิดจากการรับโปรตรอนของ PO_4^{3-} และ $EDTA^{4-}$ โดยเฉพาะที่บริเวณขั้วแอโนดที่กากโลหะกรรมมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดที่เวลา 120 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 3.80 ± 0.24 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแคโทดที่เวลา 120 ชั่วโมง ที่มีค่าลดต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) และอาจจะทำให้ปริมาณไอออนที่เกิดจากการชะละลายภายใต้สภาวะ

รีดิวซ์ (Reductive Dissolution) เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Kim et al. (2016) ที่รายงานว่า การเติมสารรีดิวซ์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอในการชะละลายโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน เนื่องจากโลหะหนักโดยเฉพาะเหล็กและแมงกานีสจะถูกชะละลายภายใต้สภาวะรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไอออนบวกได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดและบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.64 ± 0.47 และ 4.33 ± 0.34 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า มีค่าลดลงเท่ากับ 2.01 ± 0.07 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 168 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 72 และ 120 ชั่วโมง ที่จุดเก็บตัวอย่างเดียวกัน โดยเมื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมในชุดการทดลองสารผสมที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลองควบคุม จึงมีความเป็นไปได้ที่ค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุม แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองสารฟอสเฟตและชุดการทดลองสารอีดีทีเออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจมีสาเหตุมาจากการแตกตัวของสารผสมมากกว่าอิทธิพลของกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

4.2.3 ผลของสารช่วยเร่งต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูของกากโลหะกรรมภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

สารช่วยเร่งที่ใช้ในการปรับความชื้นเริ่มต้นของกากโลหะกรรมให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 15 ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด ในแต่ละชุดการทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยในชุดการทดลองควบคุม พบว่า ที่เวลา 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ 62.51 ± 2.28 , 60.92 ± 2.13 และ 64.15 ± 1.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น ที่มีค่าเท่ากับ 62.60 ± 2.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 57.52 ± 1.16 และ 53.60 ± 2.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง เท่ากับ 63.07 ± 1.60 และ 62.43 ± 1.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่บริเวณแคโทดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากนั้นมีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 59.04 ± 0.61 และ 61.33 ± 1.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกาบโลทกรรมเริ่มต้น บริเวณข้าวแอนด์ กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า และบริเวณข้าวแคโทดของ 1) ชุดการทดลองควบคุม 2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟต 3) ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ และ 4) ชุดการทดลองสารผสม ที่ระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละจุดของการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาของการทดลองเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

โดยภายใต้สภาวะออกซิเดชันที่มีคาร์บอกซีโพเทนเซียมากกว่า 100 มิลลิโวลต์พบว่า สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอาร์เซนเตอออนที่ถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อาร์เซนเตอออนมีความเป็นประจุเพิ่มขึ้น (Khalid et al., 2017; Panagiotaras et al., 2016; Smedley & Kinniburgh, 2002) และสามารถเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังข้าวแอนด์ด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถถูกยับยั้งได้จากการไหลสุทธิของน้ำด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิสในทิศทางตรงกันข้ามจากข้าวแอนด์ไปยังข้าวแคโทด (Baek et al., 2009; Yang et al., 2014) รวมทั้งการเคลื่อนที่ไปยังข้าวแคโทดด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชันของไอออนบวกของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส ที่เพิ่มขึ้นจากการแตกตัวภายใต้สภาวะกรดและสภาวะ

ออกซิเดชัน โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดของชุด การทดลองควบคุมที่มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง และมีค่าต่ำกว่าบริเวณระหว่าง ขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณขั้วแคโทด โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้ เห็นว่าการให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้อาร์เซนเตอออนเกิดการเคลื่อนที่ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทดตามการไหลสุทธิของน้ำด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส มากกว่าการเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการ เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 ที่ทำให้อาร์เซนเตอออนเมื่อเริ่มต้นการทดลองส่วนใหญ่อยู่ในรูป ของไฮโดรเจนอาร์เซนเตอออน (HAsO_4^{2-}) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเป็นไปได้ที่อาร์เซนเตอ ออนจะมีประจุลดลงอยู่ในรูปของไดไฮโดรเจนอาร์เซนเตอออน (H_2AsO_4) และทำให้การเคลื่อนที่ ไปยังบริเวณขั้วแอโนดของอาร์เซนเตอออนด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชันลดลง

สำหรับชุดการทดลองสารฟอสเฟต พบว่า ที่เวลา 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ สารหนูที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ 55.72 ± 1.74 , 61.54 ± 0.35 และ 60.64 ± 2.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าต่ำกว่า ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และที่เวลา 120 และ 168 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 59.79 ± 1.96 และ 60.70 ± 2.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีแนวโน้มลดลง ตลอดระยะเวลาการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง พบว่า มีค่าเท่ากับ 55.05 ± 2.81 และ 56.36 ± 0.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำกว่าที่บริเวณขั้วแอโนด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าการเติมสารฟอสเฟตสามารถช่วยให้อาร์เซนเตอ ออนเกิดการเคลื่อนที่ด้วยกลไกอิเล็กโทรโมเกรชันได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ในกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดที่พบว่าอาร์เซนเตอ ออนอยู่ในรูปของไฮโดรเจนอาร์เซนเตอออนตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยการที่อาร์เซนเตอ ออนเกิดการเคลื่อนที่มาสะสมอยู่ที่บริเวณขั้วแอโนดเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนลบ ระหว่างฟอสเฟตไอออนและอาร์เซนเตอออนที่บริเวณขั้วแคโทด และการชะละลายของสารหนูที่ถูก ดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสที่บริเวณขั้วแอโนด (Yang et al., 2014) โดยมีความสอดคล้องกับ Kim et al. (2005) ที่รายงานว่า การบำบัดสารหนู ปนเปื้อนในดินขาวและกากโลหะกรรมด้วยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยมีการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น สารแอโนไลต์ (Anolyte) และสารแคโทไลต์ (Catholyte) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูเท่ากับ

ร้อยละ 44.74 และ 9.96 ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนสารแคโทไลต์เป็นสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1 M KH_2PO_4) พบว่า สารแอโนไลต์มีระดับความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดินขาวและกากโลหะกรรมมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ ร้อยละ 88.75 และ 27.29 ตามลำดับ ในขณะที่ Yang et al. (2014) พบว่า เมื่อปรับความชื้นของดินปนเปื้อนให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 20 ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1 M H_3PO_4) แล้วให้สนามไฟฟ้าขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1 M Na_2SO_4) เป็นสารแอโนไลต์ และสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1 M KH_2PO_4) เป็นสารแคโทไลต์ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองสารแอโนไลต์มีปริมาณสารหนูเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารแคโทไลต์มีปริมาณทองแดงและสังกะสีเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดสารหนู ทองแดง และสังกะสี มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 31.1, 44.4 และ 68.9 ตามลำดับ

ผลการทดลองที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นในชุดการทดลองสารอดีทีเอ โดยความเข้มข้นของสารหนูมีค่าคงที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น และในทุกจุดเก็บตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $59.90 \pm 1.11 - 62.07 \pm 1.03$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองสารฟอสเฟต พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารหนูที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และที่บริเวณขั้วแคโทด มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากอาร์เซนตไอออนส่วนใหญ่จะถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ในขณะที่ความเข้มข้นของสารอดีทีเอที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ในการทดลองนี้ทำให้สารอดีทีเอกับโลหะไอออนบวกที่เป็นองค์ประกอบของกากโลหะกรรม มีอัตราส่วนโดยโมลต่ำกว่า 1 ต่อ 1 และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด พบว่า เหล็กซึ่งเป็นธาตุที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดของกากโลหะกรรม เท่ากับ 26,942.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 4.3) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) (Brookins, 1988) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารหนูได้สูง (Khalid et al., 2017) ทำให้อาร์เซนตไอออนไม่ถูกปลดปล่อยออกจากอนุภาคของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และเคลื่อนที่ไปยังบริเวณขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชันได้ ในขณะที่เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนด สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอดีทีเอ และทำให้ปริมาณไอออนที่บริเวณขั้วแอโนดลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลองสารอดีทีเอที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งส่งผลต่อการเกิดกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่ลดลง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถช่วยยับยั้งการ

เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทดตามการไหลสุทธิของน้ำด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ - ออสโมซิสของอาร์เซนตไอออนได้ ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าหากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารอิตีทีเอ กับโลหะไอออนบวกมีค่าเพิ่มขึ้นอาจทำให้อาร์เซนตไอออนเกิดการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปสะสมที่บริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกรงกันได้เพิ่มขึ้น

ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูในชุดการทดลองสารผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่บริเวณขั้วแอโนด โดยพบว่า ความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 72 และ 120 ชั่วโมง มีแนวโน้มคงที่เท่ากับ 61.67 ± 1.41 และ 63.00 ± 0.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 168 ชั่วโมง มีค่าลดลงต่ำที่สุด เท่ากับ 59.16 ± 1.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีค่าแตกต่างกับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 60.38 ± 1.42 - 60.75 ± 0.28 และ 60.55 ± 0.74 - 61.16 ± 0.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารหนูในชุดการทดลองสารผสมเกิดขึ้นจากอิทธิพลของสารอิตีทีเอมากกว่าสารฟอสเฟต

4.3 ผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของชีวไฟฟ้าสแตนด์เลสและการปลดปล่อยเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล

การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผ่านชีวไฟฟ้าสแตนด์เลสเกรด 316L ส่งผลให้ชีวไฟฟ้า และน้ำประปาที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยที่เวลา 24 ชั่วโมง พบว่า น้ำประปามีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จาก 7.62 ± 0.04 เป็น 8.62 ± 0.30 จากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 48 และ 72 ชั่วโมง มีแนวโน้มคงที่ เท่ากับ 8.29 ± 0.08 และ 8.06 ± 0.46 ตามลำดับ ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 223.70 ± 11.74 มิลลิโวลต์ โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าแล้ว พบว่า มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง -85.30 ± 24.18 ถึง -106.65 ± 4.31 มิลลิโวลต์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปาเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0.24 ± 0.01 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร แสดงให้เห็นว่าน้ำประปามีปริมาณไอออนต่ำ และมีสมบัติในการเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ดี นอกจากนี้การให้สนามไฟฟ้ายังไม่ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปาเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 0.19 ± 0.01 - 0.20 ± 0.03 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร

นอกจากนี้ กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เกิดขึ้นยังทำให้ชีวแอโนดมีน้ำหนักลดลงจากการกร่อนภายใต้สภาวะกรด ในขณะที่ชีวแคโทดมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการตกสะสม (Deposition) ของสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิลภายใต้สภาวะต่าง (Choi et al., 2009) ซึ่งสอดคล้องกับการกร่อนของชีวแอโนดที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง โดยที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 0.03 ± 0.01 และ 0.05 ± 0.01 ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็นร้อยละ 0.09 ± 0.02 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกร่อนที่ชีวแอโนดก่อให้เกิดการปลดปล่อยเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของชีวไฟฟ้าสแตนด์เลสเกรด 316L ที่มีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 68.8, 17.2 และ 10.9 ตามลำดับ (Choi et al., 2009) ในขณะเดียวกันการตกสะสมของชีวแคโทดที่มีค่าคงที่อยู่ในช่วงร้อยละ 0.10 ± 0.03 ถึง 0.16 ± 0.01 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ที่ปลดปล่อยออกมาจากชีวแอโนดและอยู่ในรูปของไอออนบวก จะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังชีวแคโทดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเกิดการตกสะสมที่ชีวแคโทด โดยเฉพาะเฟอร์ริกออกไซด์และโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr(OH)_3) (Choi et al., 2009) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ของน้ำประปาที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของชีวไฟฟ้าสแตนด์และกราฟการปลดปล่อยเหล็ก โคโรเนียม และนิกเกิล ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการทดลอง (ชั่วโมง)			
	0	24	48	72
การกร่อนของขั้วแอโนด (ร้อยละ)	-	0.03±0.01 ^b	0.05±0.01 ^b	0.09±0.02 ^a
การตกสะสมของขั้วแคโทด (ร้อยละ)	-	0.10±0.03 ^a	0.16±0.02 ^a	0.16±0.01 ^a
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.62±0.04 ^b	8.62±0.30 ^a	8.29±0.08 ^{ab}	8.06±0.46 ^{ab}
ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	223.70±11.74 ^a	-102.30±47.52 ^b	-85.30±24.18 ^b	-106.65±4.31 ^b
ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)	0.24±0.01 ^a	0.20±0.01 ^{ab}	0.20±0.03 ^{ab}	0.19±0.01 ^b
ความเข้มข้นของเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 0.3	1.89±0.13 ^b	4.47±1.44 ^{ab}	6.29±0.56 ^a
ความเข้มข้นของโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 0.05 [*]	0.61±0.02 ^c	1.24±0.17 ^b	1.75±0.03 ^a
ความเข้มข้นของนิกเกิล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 0.07 [*]	0.31±0.04 ^c	0.68±0.09 ^b	0.99±0.03 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

* เกณฑ์กำหนดนำผลการประปาครหลวง พ.ศ. 2560 (การประปานครหลวง, 2560)

4.4 ผลของการเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า

ผลของการเติมสารช่วยเร่งร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตรอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมที่แตกต่างกันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า กล่าวคือ การเติมน้ำปราศจากไอออนในชุดการทดลองควบคุมส่งผลให้สารหนูเคลื่อนที่ไปสะสมที่บริเวณขั้วแคโทดด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส แต่ต่างจากการเติมสารฟอสเฟตที่ช่วยให้สารหนูเคลื่อนที่ไปสะสมที่บริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน ในขณะที่การเติมสารอีดีทีเอและการเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอไม่สามารถช่วยให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ไปสะสมที่บริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน แต่สามารถยับยั้งไม่ให้สารหนูเกิดการเคลื่อนที่ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิสไปสะสมที่บริเวณขั้วแคโทดได้

อย่างไรก็ตามขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอาจไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยพีชร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า โดย Wanitsawatwichai and Sampanpanish (2021) ได้รายงานถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคะ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott.) ร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลาการทดลอง 120 วัน พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคะของชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 4.38 ± 0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ทำให้ความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรมมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 6.69 ± 0.13 และ 6.26 ± 0.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าขนาด 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า มีค่าลดลงเท่ากับ 2.61 ± 0.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยัง พบว่า ขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อมวลชีวภาพที่ลดลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าลดลง และที่บริเวณขั้วแคโทดมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Cang et al. (2011) ที่ศึกษาผลของการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ร่วมกับการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดต่างกันที่ 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นขนาดสนามไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมต่อการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้าและการเติมสารช่วยเร่ง

ทั้งนี้ ในการทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอินทรีย์เอนในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคะร่วมกับจุลนาศาสตร์ไฟฟ้าแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 8 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองควบคุม 1 (C1) ที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง ชุดการทดลองควบคุม 2 (C2) ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่ไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง ชุดการทดลองสารฟอสเฟต ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับ 0.7 (P1), 1.4 (P2) และ 2.8 (P3) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองสารอินทรีย์เอน ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และมีการเติมสารอินทรีย์เอนที่ระดับ 2.5 (E1), 5 (E2) และ 10 (E3) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.4.1 สมบัติของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างกากโลหะกรรมที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างจากบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมของเหมืองแร่ทองคำที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำบริเวณจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก ที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ซึ่งเป็นกากโลหะกรรมที่เหลือจากการทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรมในหัวข้อ 4.2 และทำการเก็บรักษาด้วยการตั้งกองเอาไว้ในสภาวะบรรยากาศสุกน้อมาวิเคราะห์สมบัติของกากโลหะกรรมอีกครั้งก่อนนำไปใช้ในการทดลองครั้งนี้ โดยผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า กากโลหะกรรมมีองค์ประกอบของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว คิดเป็น ร้อยละ 83.8, 15.2 และ 1.0 ตามลำดับ แต่ยังคงมีลักษณะเนื้อดินแบบดินร่วนปนทราย (Soil Science Division Staff, 2017) เช่นเดิม กากโลหะกรรมมีปริมาณความชื้น เท่ากับ ร้อยละ 0.51 ± 0.03 โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.71 ± 0.05 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล เท่ากับ 196.64 ± 2.31 มิลลิโวลต์ และค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 4.41 ± 0.04 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า กากโลหะกรรมมีความเป็นด่างเล็กน้อย อยู่ในสภาวะออกซิเดชัน และมีความเค็มน้อย (Slightly Saline) (Soil Science Division Staff, 2017) อย่างไรก็ตาม สมบัติของกากโลหะกรรมยังคงมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 3.0 เซนติโมลต่อกิโลกรัม อินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 1.58 และมีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus) และโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium) คิดเป็น ร้อยละ 0.029, 0.00351 และ 0.0102 ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นธาตุอาหารหลักของพืชที่มีปริมาณต่ำมาก นอกจากนี้ยัง พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมบัติของกากโลหะกรรมที่ใช้ในการทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยน้ำเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า

สมบัติของกากโลหะกรรม	ค่าที่ตรวจวัดได้เดิม*	ค่าที่ตรวจวัดได้
1. ลักษณะเนื้อดิน	ดินร่วนปนทราย	ดินร่วนปนทราย
ทราย (ร้อยละ)	56.6	83.8
ทรายแป้ง (ร้อยละ)	33.8	15.2
ดินเหนียว (ร้อยละ)	9.6	1.0
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	1.02±0.04	0.51±0.03
3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.35±0.05	7.71±0.07
4. ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	242.18±7.39	196.64±2.31
5. ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)	2.46±0.62	4.41±0.04
6. ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	2.43	3.00
7. อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	0.65	1.58
8. ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ)	0.03	0.03
9. ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ร้อยละ)	0.002	0.004
10. โปแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ร้อยละ)	0.03	0.01
11. ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
สารหนู	62.60±2.60	66.61±0.98
เหล็ก	26,942.6±478	18,792.4±2,435
อะลูมิเนียม	14,390.4±634	9,293.0±91
แมงกานีส	1,193.7±47	989.4±19

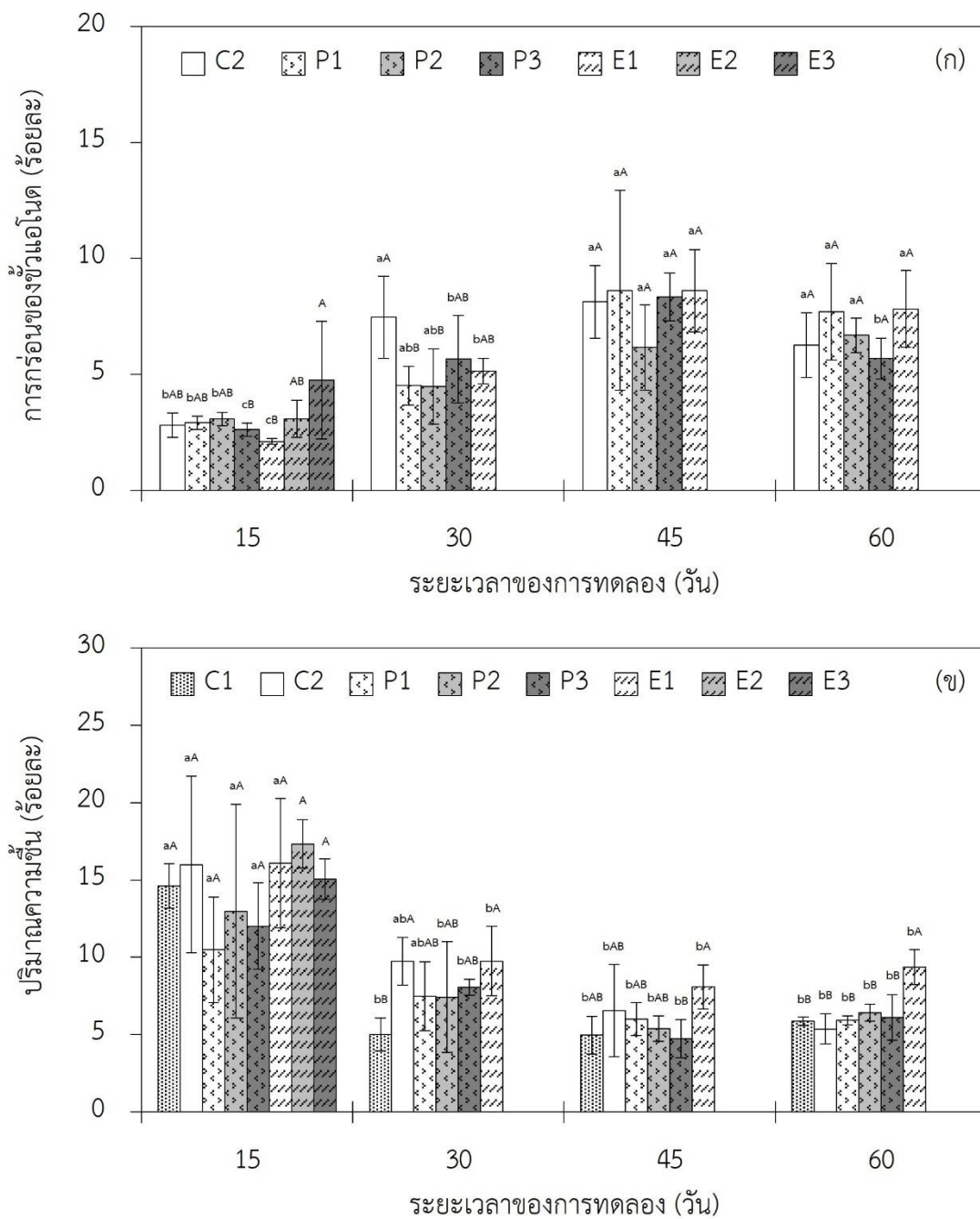
หมายเหตุ: * ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.3

4.4.2 ผลของสารช่วยเร่งต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของข้าวไฟฟ้าและปริมาณความชื้นของกากโลหกรรม

ภายใต้สภาวะการทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้ทำให้ข้าวไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โดยน้ำหนักของข้าวแอนโดมิแวนโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งเกิดจากการกร่อนของข้าวแอนโดภายใต้สภาวะกรด (Choi et al., 2009) อย่างไรก็ตามยังพบว่า น้ำหนักของข้าวไฟฟ้าแคโทดของทุกชุดการทดลองมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยร้อยละการกร่อนของข้าวแอนโดในทุกชุดการทดลองมีแวนโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก) โดยการกร่อนของข้าวแอนโดที่เวลา 15 วันของชุดการทดลอง C2 คิดเป็นร้อยละ 2.81 ± 0.52 จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วงร้อยละ 6.27 ± 1.39 - 8.13 ± 1.56 ในขณะที่ชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 มีแวนโน้มการเปลี่ยนแปลงการกร่อนของข้าวแอนโดเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง C2 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.92 ± 0.28 - 8.62 ± 4.31 , 3.08 ± 0.29 - 6.69 ± 0.74 และ 2.63 ± 0.29 - 8.35 ± 1.03 ตามลำดับ เช่นเดียวกับชุดการทดลอง E1 ที่พบว่า การกร่อนของข้าวแอนโดมีแวนโน้มการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 2.11 ± 0.12 - 8.61 ± 1.78 ในขณะที่ชุดการทดลอง E2 และ E3 มีร้อยละการกร่อนของข้าวแอนโดที่เวลา 15 วัน คิดเป็นร้อยละ 3.08 ± 0.80 และ 4.76 ± 2.53 ตามลำดับ

ในขณะที่ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในทุกชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข) มีแวนโน้มลดลงจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นของกากโลหกรรมที่ทำการปรับความชื้นด้วยน้ำประปาให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 โดยปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 ที่เวลา 15 วัน คิดเป็นร้อยละ 14.60 ± 1.44 จากนั้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าคงที่อยู่ในช่วงร้อยละ 4.96 ± 1.22 - 5.86 ± 0.28 นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมที่เวลา 15 วัน ในทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อยู่ในช่วงร้อยละ 12.01 ± 2.79 - 17.33 ± 1.57 จากนั้นปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C2, P1, P2, P3 และ E1 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าคงที่เช่นเดียวกับชุดการทดลอง C1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 4.74 ± 1.23 - 9.75 ± 2.24 อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง E1 มีค่าสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 9.37 ± 1.13 โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการควบคุมปริมาตรของน้ำประปาที่ใช้ในการรดน้ำหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละกระถางให้เท่ากัน โดยรดน้ำครั้งละ 200 มิลลิลิตร ด้วยความถี่ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมที่ลดลงเกี่ยวข้องกับการดูดดึงน้ำและธาตุอาหารของพืชตามการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งการระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าในชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) การกร่อนของข้อแวนด และ (ข) ปริมาณความชื้นของ กากโหลทกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.4.3 ผลของสารช่วยเร่งต่อสมบัติของกากโลหะกรรม

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่มีค่าเริ่มต้น เท่ากับ 7.71 ± 0.07 และ 196.64 ± 2.31 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไปในแต่ละชุดการทดลอง โดยผลการทดลองของชุดการทดลอง C1 พบว่า กากโลหะกรรมมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงและมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง $7.25 \pm 0.07 - 7.31 \pm 0.18$ โดยมีค่าแตกต่างกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง $217.30 \pm 1.65 - 292.43 \pm 3.35$ มิลลิโวลต์ และมีค่าแตกต่างกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าส่งผลให้กากโลหะกรรมในชุดการทดลอง C2 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล แตกต่างกับชุดการทดลอง C1 ที่ระยะเวลาของการทดลองเดียวกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 15 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าแตกต่างกับบริเวณขั้วแคโทดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนด มีค่าแตกต่างกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 5.68 ± 1.71 และที่เวลา 30 วัน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง $3.49 \pm 0.41 - 4.42 \pm 1.14$ จนสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 257.50 ± 99.94 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น และที่เวลา 30 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มคงที่จนสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง $363.17 \pm 50.47 - 424.30 \pm 27.85$ มิลลิโวลต์ ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มคงที่และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $7.42 \pm 0.07 - 7.75 \pm 0.03$ และ $192.10 \pm 3.56 - 285.13 \pm 4.36$ มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากที่บริเวณขั้วแคโทดที่พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 5.68 ± 1.71 โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และที่เวลา 30 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่จนสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง $9.36 \pm 0.57 - 10.16 \pm 0.67$ ซึ่งมีค่าแตกต่างกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง $157.10 \pm 39.98 - 231.93 \pm 30.80$ มิลลิโวลต์ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นตลอดระยะเวลาการทดลอง

ตารางที่ 4.9 ค่าความแปรปรวนต่างของกาลิเลทกรรมที่บริเวณข้าวแอนโด (แอนโด) กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณข้าวแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

เวลา จุดเก็บ (วัน) ตัวอย่าง	ค่าความแปรปรวนต่าง								
	C1	C2	P1	P2	P3	E1	E2	E3	
0	7.71±0.07 ^{aA}	7.71±0.07 ^{cdA}	7.71±0.07 ^{bA}	7.71±0.07 ^{cA}	7.71±0.07 ^{dA}	7.71±0.07 ^{deA}	7.71±0.07 ^{bA}	7.71±0.07 ^{cA}	
15	7.28±0.17 ^{bA}	5.68±1.71 ^{eA}	6.29±0.38 ^{cA}	5.87±1.18 ^{dA}	6.45±0.40 ^{eA}	6.97±0.29 ^{eA}	6.99±0.53 ^{cA}	6.67±0.59 ^{dA}	
	7.28±0.17 ^{bE}	7.57±0.07 ^{cdD}	7.62±0.05 ^{bD}	7.75±0.11 ^{cdD}	7.87±0.03 ^{dC}	8.06±0.15 ^{dB}	8.36±0.09 ^{aA}	8.52±0.15 ^{bA}	
	7.28±0.17 ^{bb}	8.69±0.70 ^{bca}	8.48±0.39 ^{abA}	8.84±0.45 ^{aA}	8.48±0.06 ^{cdA}	9.07±0.91 ^{cA}	8.54±0.11 ^{aA}	9.42±0.49 ^{aA}	
30	7.31±0.06 ^{bA}	3.49±0.41 ^{fC}	4.34±1.44 ^{dB}	5.18±1.56 ^{deBC}	4.24±1.36 ^{fBC}	5.61±0.74 ^{fAB}	N/A ^{**}	N/A	
	7.31±0.06 ^{bC}	7.42±0.07 ^{dB}	7.49±0.08 ^{bB}	7.48±0.01 ^{cB}	7.50±0.04 ^{dB}	7.68±0.06 ^{deA}	N/A	N/A	
	7.31±0.06 ^{bb}	9.64±0.49 ^{abA}	9.69±0.73 ^{aA}	9.37±0.70 ^{abA}	9.70±0.64 ^{abA}	9.43±0.50 ^{bcA}	N/A	N/A	
45	7.25±0.07 ^{bA}	3.57±0.53 ^{fBC}	3.78±1.15 ^{dB}	4.47±0.28 ^{EB}	3.30±0.49 ^{BC}	3.13±0.69 ^{HC}	N/A	N/A	
	7.25±0.07 ^{bD}	7.51±0.01 ^{cdC}	7.60±0.02 ^{bbc}	7.56±0.02 ^{CC}	7.66±0.09 ^{dAB}	7.74±0.04 ^{deA}	N/A	N/A	
	7.25±0.07 ^{bb}	10.16±0.67 ^{aA}	9.61±0.94 ^{aA}	10.02±0.34 ^{aA}	10.50±0.17 ^{aA}	10.31±0.27 ^{aA}	N/A	N/A	
60	7.31±0.18 ^{bA}	4.42±1.14 ^{fB}	4.53±1.37 ^{dB}	4.16±0.72 ^{EB}	5.21±1.16 ^{fB}	3.96±0.55 ^{EB}	N/A	N/A	
	7.31±0.18 ^{bC}	7.75±0.03 ^{cdAB}	7.69±0.05 ^{bAB}	7.69±0.06 ^{CB}	7.62±0.02 ^{dB}	7.79±0.05 ^{deA}	N/A	N/A	
	7.31±0.18 ^{bb}	9.36±0.57 ^{abA}	9.43±0.52 ^{aA}	10.04±0.29 ^{aA}	9.08±0.97 ^{bcA}	9.97±0.58 ^{abA}	N/A	N/A	

หมายเหตุ: * ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

** N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล (Not Available) เนื่องจากวิธีการทดลองจากการที่ญาเป็นเปอร์เซ็นต์แสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายลง

ตารางที่ 4.10 ค่ารีดออกซิโทเทนเซียของกากโหลทรรที่บริเวณข้าวแอนโดต (แอนโดต) กึ่งกลางระหว่างไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณข้าวแอนโดต (แอนโดต) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

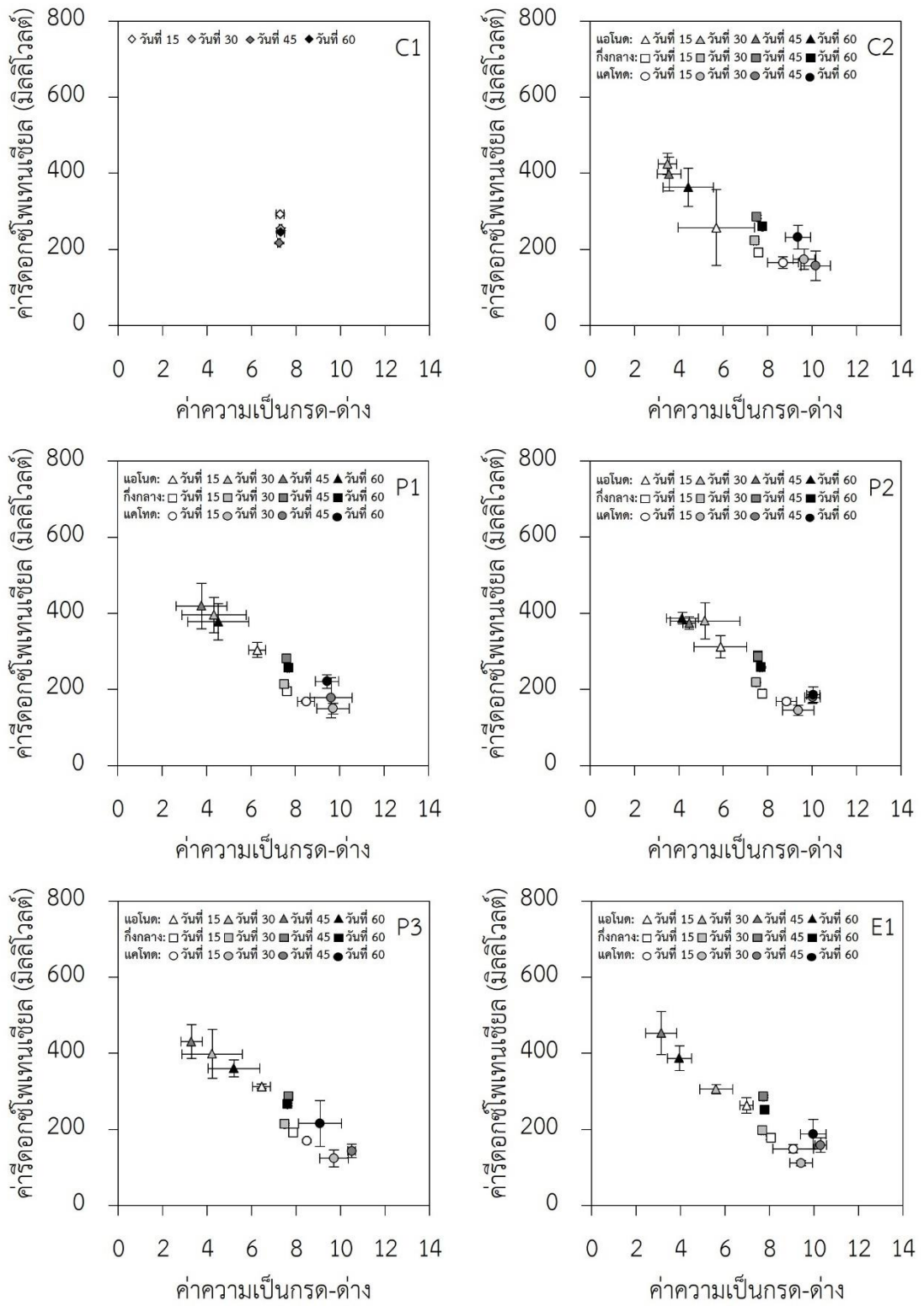
เวลา จุดเก็บ (วัน)	ค่ารีดออกซิโทเทนเซีย (มิลลิโวลต์)								
	C1	C2	P1	P2	P3	E1	E2	E3	
0	196.64±2.31 ^{ea*}	196.64±2.31 ^{cdeA}	196.64±2.31 ^{deA}	196.64±2.31 ^{deA}	196.64±2.31 ^{da}	196.64±2.31 ^{ea}	196.64±2.31 ^{ba}	196.64±2.31 ^{ba}	
15	292.43±3.35 ^{ab}	257.50±99.94 ^{bcA}	303.93±19.36 ^{ba}	311.90±29.03 ^{ba}	312.77±5.71 ^{ca}	263.67±20.75 ^{cdAB}	250.03±4.92 ^{ab}	221.03±14.60 ^{ab}	
	292.43±3.35 ^{aA}	192.10±3.56 ^{cdeb}	195.93±3.71 ^{deb}	189.23±1.97 ^{deb}	192.07±2.06 ^{deb}	178.07±5.05 ^{efc}	164.10±6.14 ^{cd}	150.30±6.06 ^{ce}	
	292.43±3.35 ^{aA}	165.67±14.96 ^{deb}	168.33±3.50 ^{deb}	168.47±7.82 ^{efB}	170.23±4.24 ^{deB}	149.33±10.63 ^c	143.53±0.49 ^{dcd}	130.20±6.72 ^{cd}	
30	253.50±3.62 ^{bb}	424.30±27.85 ^A	396.07±46.60 ^A	379.70±47.57 ^A	398.07±64.12 ^{abA}	306.13±12.10 ^{cb}	N/A ^{**}	N/A	
	253.50±3.62 ^{ba}	223.30±3.80 ^{bcddeb}	213.43±1.89 ^{cdc}	218.40±1.30 ^{bc}	213.80±2.69 ^{bc}	198.03±2.33 ^{ed}	N/A	N/A	
	253.50±3.62 ^{ba}	174.30±27.09 ^{deb}	150.10±14.16 ^{ebc}	145.37±13.50 ^{bc}	124.03±21.91 ^{cd}	111.80±6.84 ^{gd}	N/A	N/A	
45	217.30±1.65 ^{db}	398.00±44.71 ^{aA}	419.40±59.50 ^{aA}	374.10±16.47 ^{aA}	430.87±45.04 ^{aA}	453.00±56.93 ^{aA}	N/A	N/A	
	217.30±1.65 ^{db}	285.13±4.36 ^{ba}	280.93±3.70 ^{ba}	286.67±13.76 ^{bca}	287.17±4.37 ^{ca}	286.70±3.53 ^{cdA}	N/A	N/A	
	217.30±1.65 ^{ca}	157.10±39.98 ^B	178.67±52.80 ^{deAB}	179.03±15.55 ^{caB}	143.67±17.63 ^{efB}	158.93±19.06 ^{efB}	N/A	N/A	
60	244.87±1.79 ^{cb}	363.17±50.47 ^{aA}	377.90±47.81 ^{aA}	387.13±15.61 ^{aA}	360.23±21.92 ^{ba}	386.87±32.34 ^{ba}	N/A	N/A	
	244.87±1.79 ^{cd}	259.87±1.53 ^{cb}	257.30±5.40 ^{bcb}	257.93±2.04 ^{cb}	265.90±3.55 ^{ca}	251.60±1.22 ^{dc}	N/A	N/A	
	244.87±1.79 ^{ca}	231.93±30.80 ^{bcdA}	221.27±17.88 ^{cdA}	186.17±20.34 ^{deA}	215.90±60.19 ^{dA}	187.73±38.61 ^{efA}	N/A	N/A	

หมายเหตุ: * ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

** N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล (Not Available) เนื่องจากดูผลการทดลองจากการที่หญ้าเนเปียร์และแสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายลง

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง และคาร์ดิออกซีโพเทนเชียลของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C2 ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากระแสตรง (Reddy & Cameselle, 2009) ส่งผลโดยตรงต่อสารหนูในรูปที่ละลายได้ (Labile Arsenic) รวมทั้งรูปของเหล็กซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บสารหนูที่สำคัญในกากโลหกรรม โดยเมื่อคาร์ดิออกซีโพเทนเชียลในสิ่งแวดล้อมมีค่ามากกว่า 100 มิลลิโวลต์ สามารถทำให้ สารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซเนตที่ถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อรูปของอาร์เซเนต โดยจะอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ในสัดส่วนที่แตกต่างกันเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 0 - 4, 0 - 9, 4 - 14 และ 9 - 14 ตามลำดับ (Khalid et al., 2017) ในขณะที่เหล็กจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในสภาวะกรด และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7 (Brookins, 1988; Kim et al., 2014; Wang et al., 2018b) โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และคาร์ดิออกซีโพเทนเชียลของกากโลหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า สารหนูในรูปที่ละลายได้ของกากโลหกรรมเริ่มต้นส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $HAsO_4^{2-}$ ที่ถูกดูดซับด้วยเหล็กในรูปของ $Fe(OH)_3$ (Kim et al., 2005; Wang et al., 2018b)

โดยกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเล็กน้อย และมีคาร์ดิออกซีโพเทนเชียลเพิ่มขึ้น ทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูป $HAsO_4^{2-}$ เช่นเดียวกับกากโลหกรรมเริ่มต้น ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ในชุดการทดลอง C2 ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และคาร์ดิออกซีโพเทนเชียลที่บริเวณไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณขั้วแอโนดซึ่งเป็นบริเวณที่ปลุกต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดที่ลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เหล็กในรูปของ $Fe(OH)_3$ ถูกชะละลายและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และส่งผลทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกมาได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม พบว่า ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าสารหนูในรูปที่ละลายได้อยู่ในรูปที่มีความเป็นประจุลดลงของ $H_2AsO_4^-$ ที่เวลา 15 และ 60 วัน ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.68 และ 4.42 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) และมีสารหนูในรูปที่ละลายได้บางส่วนอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของ H_3AsO_4 ที่เวลา 30 และ 45 วัน ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3.49 และ 3.57 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ทำให้ในระหว่างการทดลองมีความเป็นไปได้ที่สารหนูในรูปที่ละลายได้บางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรากพืชที่บริเวณขั้วแอโนดไปยังบริเวณขั้วแคโทดได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส ซึ่งจะทำให้สารหนูถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กได้อีกครั้งในสภาวะความเป็นกรด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหกรรม ในชุดการทดลอง C1, C2, P1, P2, P3 และ E1 ตามระยะเวลาของการทดลองที่เปลี่ยนไป

ในขณะที่การเติมสารฟอสเฟตทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง C2 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในทุกจุดของการเก็บตัวอย่างในชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 ยกเว้น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างชั่วโมงไฟฟ้าที่เวลา 15 และ 45 วัน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตเพิ่มขึ้น โดยที่ชุดการทดลอง P3 มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างชั่วโมงไฟฟ้าที่เวลา 15 และ 45 วัน สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 7.87 ± 0.03 และ 7.66 ± 0.09 ตามลำดับ และมีความแตกต่างกับชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Isosaari and Sillanpää (2012) ที่รายงานถึงสมบัติของสารฟอสเฟตในการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่ช่วยต้านทานการลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่ทำการบำบัดด้วยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้า นอกจากนี้จากยังพบว่า ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในทุกจุดของการเก็บตัวอย่างในชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 ยกเว้น ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่กึ่งกลางระหว่างชั่วโมงไฟฟ้าที่เวลา 30 วัน ในชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 ที่มีค่าเท่ากับ 213.43 ± 1.89 , 218.40 ± 1.30 และ 213.80 ± 2.69 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณชั่วโมงแคโทดที่เวลา 30 วัน ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตเพิ่มขึ้น โดยที่ชุดการทดลอง P3 มีค่าต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 124.03 ± 21.91 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

โดยการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการเติมสารฟอสเฟต ทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกมาได้ทั้งจากสภาวะกรดที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนด และการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างฟอสเฟตไอออนและอาร์เซเนตไอออน ซึ่งช่วยให้สารหนูเคลื่อนที่มาที่บริเวณรากพืชที่บริเวณขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชันได้เพิ่มขึ้น (Yang et al., 2014) นอกจากนี้สมบัติของสารฟอสเฟตในการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี (Isosaari & Sillanpää, 2012) ยังช่วยทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าชุดการทดลอง C2 โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า สารหนูในรูปที่ละลายได้ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P1 และ P3 เกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน โดยสารหนูในรูปที่ละลายได้ที่เวลา 15, 30 และ 60 วัน อยู่ในรูปของ $H_2AsO_4^-$ และมีสารหนูในรูปที่ละลายได้บางส่วนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีไม่มีประจุของ H_3AsO_4 ได้ ที่เวลา 45 วัน ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของ

กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2 ที่มีค่าอยู่ในช่วง 4.16 - 5.87 (ตารางที่ 4.9) ทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้อยู่ในรูปที่มีประจุของ $H_2AsO_4^-$ ตลอดระยะเวลาการทดลอง 60 วัน

สำหรับผลการทดลองในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอ พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ในแต่ละจุดของการเก็บตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับชุดการทดลอง C2 และชุดการทดลองสารฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่เวลา 15 วัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น โดยเฉพาะค่าความเป็นกรด-ด่างที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าของชุดการทดลอง E1, E2 และ E3 ที่มีค่าเท่ากับ 8.06 ± 0.15 , 8.36 ± 0.09 และ 8.52 ± 0.15 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยัง พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่เวลา 15 วัน มีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น โดยเฉพาะค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าความรีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง E1, E2 และ E3 ที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 178.07 ± 5.05 , 164.10 ± 6.14 และ 150.30 ± 6.06 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าเท่ากับ 149.33 ± 10.63 , 143.53 ± 0.49 และ 130.20 ± 6.72 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับความเป็นต่างของสารละลายอีดีทีเอ (pH 8) และความสามารถของสารอีดีทีเอในการชะละลายโลหะหนักไอออนบวก (Cationic Heavy Metal) ซึ่งสอดคล้องกับผลของการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในตะกอนดินทะเล (Dredged Marine Sediment) ด้วยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้าของ Song et al. (2016) ที่รายงานว่า การเติมสารอีดีทีเอทำให้ตะกอนดินทะเลมีสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของไอออนในระบบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการชะละลายของสารอีดีทีเอ นอกจากนี้ยังรายงานถึงผลของปริมาณไอออนที่เพิ่มขึ้นในชั้นของเหลวระหว่างอนุภาค (Pore Fluid) ที่ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิสลดลง และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเป็นการเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด โดยสภาวะดังกล่าวส่งผลให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน และกลไกอิเล็กโทรออสโมซิสที่เกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งช่วยยับยั้งการขยายตัวของสภาวะกรด นอกจากนี้ OH^- ที่เกิดขึ้นยังทำให้โลหะหนักไอออนบวกที่ไม่ได้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอีดีทีเอเกิดการตกตะกอนอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้กากโลหะกรรมในชุดการทดลองสารอีดีทีเอ ที่เวลา 15 วัน มีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดและกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น

อย่างไรก็ตาม พบว่า หนูแอเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง E2 และ E3 แสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายลงในวันที่ 15 ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ค-1 (ภาคผนวก ค) ในขณะที่กากโลหะกรรมที่เวลา 30 วัน ของชุดการทดลอง E1 ยังคงได้รับอิทธิพลของ OH^- โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดสูงกว่าชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 5.61 ± 0.74 และที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 7.68 ± 0.06 ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในทุกจุดของการเก็บตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแคโทด ที่มีค่าเท่ากับ 111.80 ± 6.84 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแคโทดของชุดการทดลอง P3 อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในชุดการทดลอง E1 ที่เวลา 45 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับชุดการทดลอง P2 และ P3 และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง E1 สามารถอธิบายได้จากการที่สารอิตีทีโอเกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของไอออนลบ เมื่อความเป็นกรด-ด่าง มีค่ามากกว่า 2 และจะมีความเป็นประจุเพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น (Crisponi & Nurchi, 2016; Maketon et al., 2008; Wang et al., 2018b) โดยอิตีทีโอไอออนที่เกิดขึ้นจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่เกิดจากการชะละลายในสภาวะกรดและสภาวะออกซิเดชันที่บริเวณขั้วแอโนดได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าต่ำกว่า 7 (Kim et al., 2005; Kim et al., 2014; Wang et al., 2018b) ซึ่งจะช่วยยับยั้ง $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ไม่ให้ตกตะกอนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ได้ และทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกมาได้เพิ่มขึ้น (Ryu et al., 2017) โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง E1 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า สารหนูในรูปที่ละลายได้ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด ที่เวลา 15 วัน อยู่ในรูปของ HAsO_4^{2-} อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรม ที่มีค่าเท่ากับ 6.97 ± 0.29 (ตารางที่ 4.9) อาจทำให้มีสารหนูในรูปที่ละลายได้บางส่วนยังคงถูกดูดซับด้วยอนุภาค $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จากนั้นที่เวลา 30 วัน ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมมีค่าลดลง เท่ากับ 5.61 ± 0.74 ทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- ในขณะที่อนุภาค $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เปลี่ยนไปอยู่ในรูป Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอิตีทีโอได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสารหนูในรูปที่ละลายได้บางส่วนอาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของ H_3AsO_4 ได้ที่เวลา 45 และ 60 วัน เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่ลดลง เท่ากับ 3.13 และ 3.96 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณหัวแอนโอด (แอนโอด) กึ่งกลางระหว่างหัวไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณหัวแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

เวลา จุดเก็บ (วัน)	ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซิเมนต่อเมตร)								
	C1	C2	P1	P2	P3	E1	E2	E3	
0	ตัวอย่างผสม	4.41±0.04 ^{ab*}	4.41±0.04 ^{ba}	4.41±0.04 ^{abA}	4.41±0.04 ^{aA}	4.41±0.04 ^{ba}	4.41±0.04 ^{aA}	4.41±0.04 ^{ba}	4.41±0.04 ^{aA}
15	แอนโอด	3.11±0.12 ^{bd}	4.43±0.28 ^{bb}	5.08±0.15 ^{aA}	4.56±0.51 ^{aAB}	4.49±0.08 ^{abb}	3.79±0.07 ^{cc}	4.28±0.56 ^{abc}	4.17±0.33 ^{abc}
	กึ่งกลาง	3.11±0.12 ^{bb}	2.96±0.49 ^{cdeb}	2.88±0.13 ^{cdeb}	3.15±0.18 ^{bb}	3.00±0.41 ^{deb}	2.98±0.24 ^{defb}	3.43±0.15 ^{bb}	4.02±0.51 ^{aA}
	แคโทด	3.11±0.12 ^{bb}	2.12±0.39 ^{efc}	2.36±0.48 ^{defgc}	1.94±0.35 ^{cc}	2.33±0.46 ^{efc}	2.57±0.37 ^{efgbc}	3.19±0.15 ^{bb}	4.47±0.44 ^{aA}
30	แอนโอด	2.73±0.27 ^{bb}	5.55±1.15 ^{aA}	5.26±0.89 ^{aA}	4.56±0.39 ^{aA}	5.07±1.10 ^{aA}	4.81±0.34 ^{abA}	N/A ^{**}	N/A
	กึ่งกลาง	2.73±0.27 ^{bb}	3.14±0.14 ^{cdAB}	3.08±0.38 ^{cdAB}	3.21±0.35 ^{bAB}	3.32±0.27 ^{cdA}	3.38±0.25 ^{cdA}	N/A	N/A
	แคโทด	2.73±0.27 ^{ba}	1.76±0.10 ^{fb}	1.80±0.28 ^{fb}	1.72±0.28 ^b	1.81±0.18 ^{fb}	2.41±0.05 ^{fgA}	N/A	N/A
45	แอนโอด	3.08±0.23 ^{bb}	3.82±0.52 ^{bcB}	3.71±1.12 ^{bcB}	3.32±0.06 ^{bb}	3.96±1.04 ^{bcAB}	5.24±0.84 ^{aA}	N/A	N/A
	กึ่งกลาง	3.08±0.23 ^{ba}	2.82±0.25 ^{deAB}	2.55±0.01 ^{defB}	2.76±0.22 ^{bAB}	2.79±0.08 ^{deAB}	2.66±0.09 ^{efgB}	N/A	N/A
	แคโทด	3.08±0.23 ^{ba}	1.92±0.57 ^{fb}	2.02±0.24 ^{efgB}	1.73±0.23 ^{cb}	1.82±0.17 ^{fb}	2.12±0.27 ^{ghB}	N/A	N/A
60	แอนโอด	2.96±0.34 ^{ba}	2.80±0.70 ^{deA}	2.67±0.74 ^{defA}	3.32±0.69 ^{ba}	3.11±0.51 ^{cdeA}	3.50±0.30 ^{cdA}	N/A	N/A
	กึ่งกลาง	2.96±0.34 ^{ba}	3.04±0.47 ^{cdA}	2.92±0.48 ^{cdeA}	2.79±0.34 ^{ba}	3.23±0.30 ^{cdA}	3.15±0.42 ^{deA}	N/A	N/A
	แคโทด	2.96±0.34 ^{ba}	1.62±0.18 ^{fb}	1.63±0.38 ^{fb}	1.74±0.33 ^{cb}	1.78±0.17 ^{fb}	1.79±0.16 ^{hb}	N/A	N/A

หมายเหตุ: * ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

** N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล (Not Available) เนื่องจากดูผลการทดลองจากการที่ฐานเปเปอร์แครและแสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายลง

2) ค่าการนำไฟฟ้า

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมในแต่ละชุดการทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดยจากผลการทดลองในชุดการทดลอง C1 พบว่า กากโลหะกรรมมีค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 15 วัน ต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 4.41 ± 0.04 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง $2.73 \pm 0.27 - 3.11 \pm 0.12$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ในขณะที่อิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมในแต่ละจุดของการเก็บตัวอย่างของชุดการทดลอง C2 มีค่าแตกต่างกัน โดยค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มสูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 4.43 ± 0.28 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น และที่เวลา 30 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5.55 ± 1.15 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากนั้นมีแนวโน้มลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง โดยที่เวลา 60 วัน มีค่าลดลงต่ำที่สุด เท่ากับ 2.80 ± 0.70 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีค่าต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และบริเวณขั้วแคโทด มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $2.82 \pm 0.25 - 3.14 \pm 0.14$ และ $1.62 \pm 0.18 - 2.12 \pm 0.39$ เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม พบว่า ที่เวลา 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดมีค่าต่ำกว่าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง C2 เกี่ยวข้อง H^+ และ OH^- ที่เกิดจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดจากการชะละลายของโลหะหนักไอออนบวกภายใต้สภาวะความเป็นกรด และทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดเนื่องจากการตกตะกอนของโลหะหนักไอออนบวกภายใต้สภาวะความเป็นด่าง (Acar et al., 1995; Kim et al., 2005; Reddy & Cameselle, 2009)

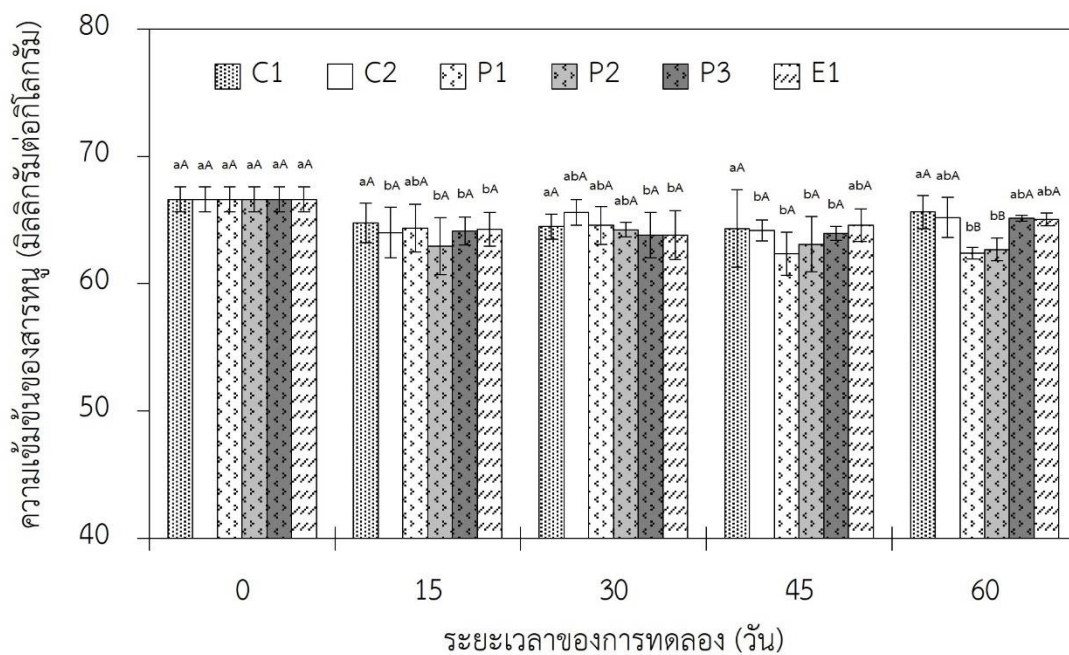
ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P1, P2, P3 และ E1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง C2 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง C2, P1, P2, P3 และ E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างเดียวกัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้น กากโลหะกรรมใน

ชุดการทดลอง P1 ที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 15 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 5.08 ± 0.15 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และภาคโลหกรรมในชุดการทดลอง E1 ที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 15 และ 45 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 3.79 ± 0.07 และ 2.41 ± 0.05 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ และที่บริเวณขั้วแคโทดที่เวลา 30 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 5.24 ± 0.84 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kim et al. (2005) ที่รายงานว่า สภาพการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูที่ทำการบำบัดด้วยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลอง โดยมีสาเหตุมาจากไอออนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า และไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของสารช่วยเร่ง อย่างไรก็ตามสภาพการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ไอออนบวกที่เกิดจากการชะละลายที่ขั้วแอโนดเกิดการเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด และสามารถเกิดการตกตะกอนได้ในสถานะความเป็นต่าง โดยจากผลการทดลองค่าการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง P1, P2, P3 และ E1 ทำให้มีความเป็นไปได้ที่ไอออนที่เกิดขึ้นในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม พบว่า ระดับของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง E2 และ E3 ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมในชุดการทดลอง E2 และ E3 ที่เวลา 15 วัน มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าชุดการทดลองอื่น โดยค่าการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า และที่บริเวณขั้วแคโทดในชุดการทดลอง E2 มีค่าเท่ากับ 4.28 ± 0.56 , 3.43 ± 0.15 และ 3.19 ± 0.15 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ และชุดการทดลอง E3 มีค่าเท่ากับ 4.17 ± 0.33 , 4.02 ± 0.51 และ 4.47 ± 0.44 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ โดยแนวโน้มของค่าการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง E2 และ E3 น่าจะมีสาเหตุมาจากไอออนในระบบปริมาณมากที่เกิดจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า การชะละลายไอออนบวกโดยสารอีดีทีเอ และการแตกตัวอยู่ในรูปของไอออนของสารอีดีทีเอ นอกจากนี้ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของภาคโลหกรรมที่เวลา 15 วัน ในชุดการทดลอง E2 และ E3 ที่มีแนวโน้มต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.10) ยังทำให้เกิดไอออนของเหล็กจากการชะละลายภายใต้สภาวะรีดิวซ์ของสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก (Kim et al., 2016) ส่งผลให้ภาคโลหกรรมมีความแรงของไอออน (Ionic Strength) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Song et al. (2016) ที่รายงานว่า สารอีดีทีเอทำให้ตะกอนดินทะเลที่บำบัดด้วยวิธีจลนศาสตร์ไฟฟ้ามีปริมาณไอออนในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าในระบบสูงที่สุดตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยค่าการนำไฟฟ้าของภาคโลหกรรมในชุดการทดลอง E2 และ E3 ที่มีแนวโน้มสูงกว่าชุดการทดลองอื่น น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง E2 และ E3 แสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายลงที่ระยะเวลาของการทดลอง 15 วัน

4.4.4 ผลของสารช่วยเร่งต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรม

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่มีผลต่อรูปของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลอง ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสารหนูในรูปที่ละลายได้ (Labile Arsenic) อาจอยู่ในรูปที่มีประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะกากโลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับและสะสมสารหนูของพืช โดยจากผลของระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรม พบว่า ในชุดการทดลอง C1 มีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง 64.33 ± 3.04 - 65.62 ± 1.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับระดับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นในกากโลหกรรม ที่มีค่าเท่ากับ 66.61 ± 0.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เนื่องจากสารหนูในกากโลหกรรมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์ (FeAsS) และอาร์เซเนต (As^{5+}) ที่ถูกดูดซับด้วยสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ซึ่งทำให้สารหนูมีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioavailability) ต่ำ (Gabarrón et al., 2018; Hammond et al., 2018; Isosaari & Sillanpää, 2012; Ko et al., 2008; Ono et al., 2016; Wang et al., 2016; Yang et al., 2009) และแม้ว่าบริเวณรากพืช (Rhizosphere) จะเกิดการหลั่งสารประกอบกรดอินทรีย์ (Root Exudates) เพื่อชะละลายธาตุอาหารที่สะสมอยู่บริเวณรากพืช และอาจส่งผลให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกมาได้ (Khalid et al., 2017; Punshon et al., 2017) นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมของชุดการทดลอง C1 ซึ่งเป็นชุดการทดลองควบคุมยังคงมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมของชุดการทดลอง C2 มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 64.01 ± 1.99 - 65.59 ± 1.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สำหรับระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมของชุดการทดลอง P1 และ P2 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 62.40 ± 0.47 และ 62.69 ± 0.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำกว่าระดับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นในกากโลหกรรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



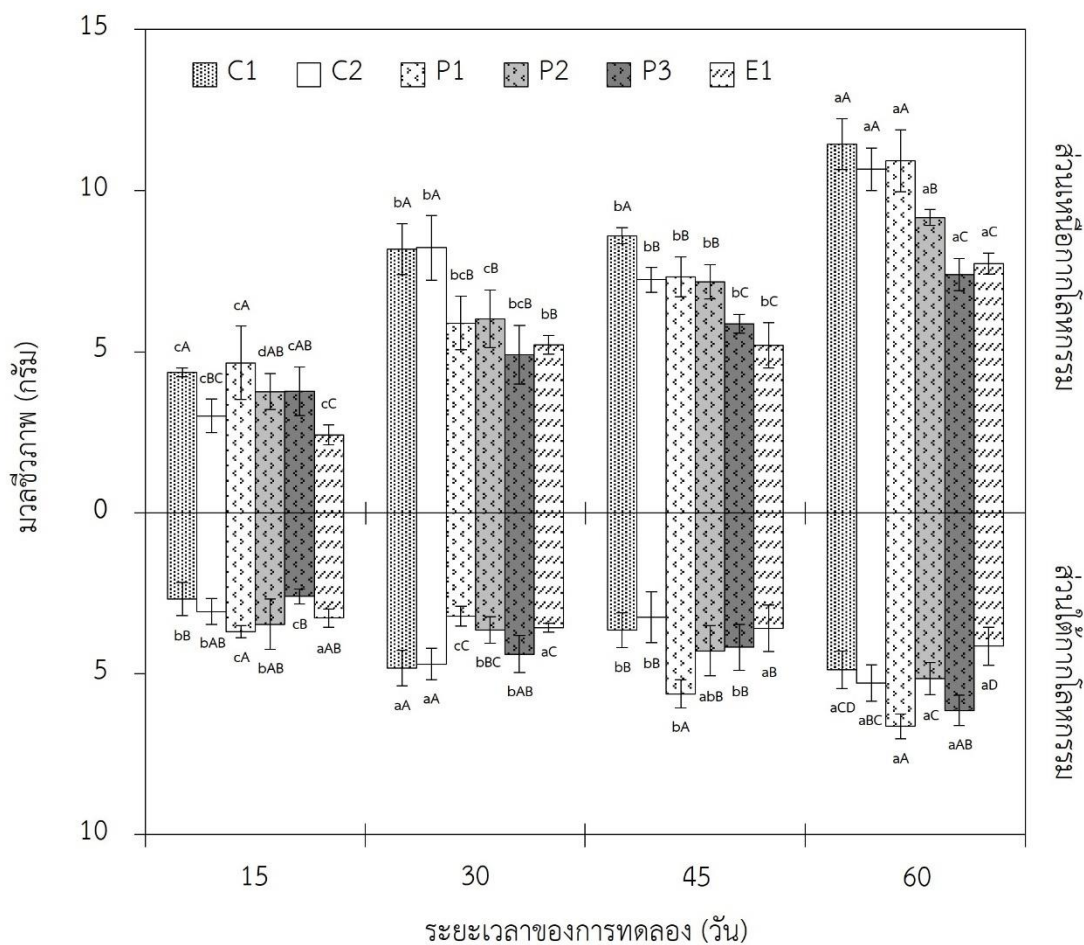
รูปที่ 4.8 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกาบโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลอง
ตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.4.5 ผลของสารช่วยเร่งต่อมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ

การบำบัดกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารช่วยเร่ง ได้แก่ สารฟอสเฟต และสารอิตีทีเอ สามารถสรุปผลการทดลองของมวลชีวภาพในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยจากผลการทดลอง พบว่า มวลชีวภาพของพืชในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง โดยมวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 และ C2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า พืชมีมวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรมเพิ่มขึ้นสูงที่สุด เท่ากับ 4.87 ± 0.59 และ 5.29 ± 0.57 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่มวลชีวภาพส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 และ C2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 11.44 ± 0.79 และ 10.66 ± 0.67 กรัม ตามลำดับ และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยผลการทดลองของมวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 และ C2 ที่มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยที่พบว่า การให้สนามไฟฟ้า กระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่ส่งผลกระทบต่อมวลชีวภาพที่ลดลงของผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี (Cang et al., 2011) และหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott.) ที่ปลูกในกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนู (Wanitsawatwichai & Sampanpanish, 2021) โดย Bi et al. (2011) และ Luo et al. (2018) รายงานว่า มวลชีวภาพของพืชที่เพิ่มขึ้นจากการให้สนามไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในดิน ดังนี้ 1) การเคลื่อนที่ของน้ำและไอออนในดินที่เพิ่มขึ้น ทำให้รากพืชมีโอกาสที่จะดูดซึมไอออนที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น 2) การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์บริเวณรากพืช (Hyperpolarization and Depolarization) ทำให้ช่องโปรตีนขนส่งไอออน (Ion Channels) บริเวณรากพืชได้รับการกระตุ้น และส่งผลให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมธาตุอาหารได้เพิ่มขึ้น และ 3) การเปลี่ยนแปลงปริมาณไอออนในพืชอาจทำให้กิจกรรมเมตาบอลิซึม (Metabolic Activity) ของพืชเพิ่มขึ้นได้

สำหรับผลการทดลองของชุดการทดลองที่มีการเติมสารฟอสเฟต พบว่า มวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรม ในชุดการทดลอง P1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรมที่เวลา 45 และ 60 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นที่ระยะเวลาของการทดลองเดียวกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 5.62 ± 0.44 และ 6.63 ± 0.39 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 มวลชีวภาพส่วนใต้กอกโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกอกโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

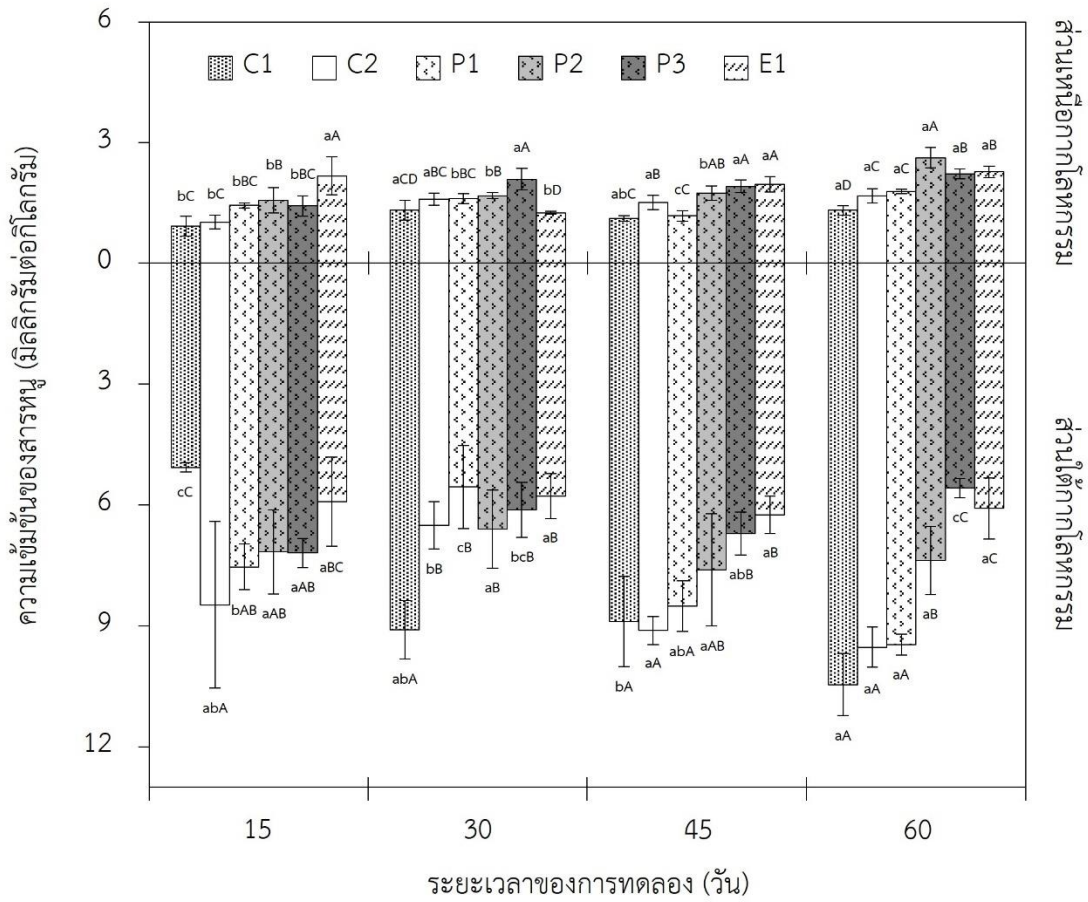
ในขณะที่มวลชีวภาพส่วนเหนืออากาศโลหกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C1 และ C2 โดยมีค่าเท่ากับ 10.92 ± 0.96 กรัม อย่างไรก็ตามมวลชีวภาพของพีชมีแวนโน้มลดลงเมื่อมีการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า มวลชีวภาพส่วนใต้กาลโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 มีค่าเท่ากับ 5.14 ± 0.50 กรัม โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง P1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หากแต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C1 และ C2 และในชุดการทดลอง P3 มีค่าเท่ากับ 6.14 ± 0.47 กรัม โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 และ P1 แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่มวลชีวภาพส่วนเหนืออากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 และ P3 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 9.16 ± 0.25 และ 7.39 ± 0.50 กรัม ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง P1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลการทดลองที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองสารฟอสเฟตน่าจะมีส่วนมาจากการดูดตั้งและสะสมสารหนูและโลหะหนักอื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารฟอสเฟต ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Niazi et al. (2017) ที่รายงานว่า การเติมสารฟอสเฟตส่งผลให้มวลชีวภาพของผักกาดก้านขาว (*Brassica napus*) และผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารหนูมีแวนโน้มต่ำกว่าที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารหนู และระดับความเข้มข้นของสารหนูในดินที่เพิ่มขึ้นทำให้มวลชีวภาพของพีชมีแวนโน้มลดลง

สำหรับผลการทดลองในชุดการทดลอง E1 พบว่า มวลชีวภาพส่วนใต้กาลโลหกรรมมีแวนโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง และไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.27 ± 0.28 - 4.14 ± 0.59 กรัม นอกจากนี้ยังพบว่า มวลชีวภาพส่วนเหนืออากาศโลหกรรมของชุดการทดลอง E1 มีแวนโน้มต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 7.74 ± 0.33 กรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้น ชุดการทดลอง P3 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง E1 ที่มีแวนโน้มต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น น่าจะมีสาเหตุมาจากการดูดตั้งและสะสมโลหะหนักไอออนบวกในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอ (Cation Metal-EDTA Complexes) รวมทั้งสารหนูที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการดังกล่าว ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Sampanpanish and Nanthavong (2019) ที่พบว่า การเติมสารอีดีทีเอในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมส่งผลให้ต้นไมยราบ (*Mimosa pudica* L.) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนูสามารถดูดตั้งและสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้น รวมทั้งยังพบการดูดตั้งและสะสมเหล็กที่รากและลำต้นที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และรายงานการวิจัยของ Abbas and Abdelhafez (2013) ที่พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลชีวภาพของข้าวโพด (*Zea mays* L.) ลดลงเนื่องจากระดับความเข้มข้นของสารหนูในราก (Root) และยอด (Shoot) ของต้นข้าวโพดที่เพิ่มขึ้น

4.4.6 ผลของสารช่วยเร่งต่อการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

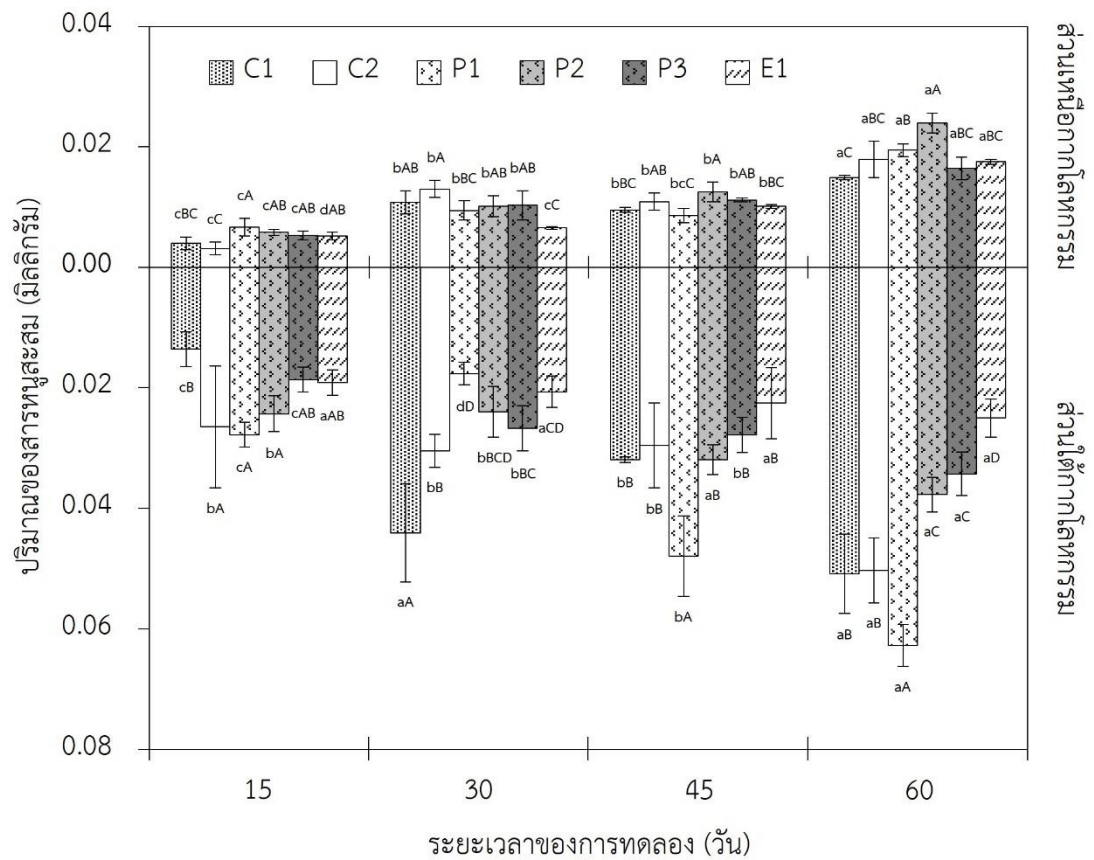
การบำบัดกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารช่วยเร่ง ได้แก่ สารฟอสเฟต และสารอีทีทีเอ สามารถสรุปผลการทดลองของปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถคิดเป็นปริมาณของสารหนูสะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยจากผลการทดลองของปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 10.45 ± 0.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ชุดการทดลอง C2 และ P1 มีแนวโน้มของระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 9.53 ± 0.50 และ 9.46 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C1 อย่างไรก็ตาม พบว่ามวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง P1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (รูปที่ 4.9) ส่งผลให้ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง P1 มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.0627 ± 0.0035 มิลลิกรัม โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยัง พบว่าระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C2 และ P1 มีแนวโน้มสูงกว่าชุดการทดลอง C1 โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 1.67 ± 0.18 และ 1.78 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรม โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ชุดการทดลอง C1 และ C2 มีค่าเท่ากับ 0.0149 ± 0.0004 และ 0.0179 ± 0.0030 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ชุดการทดลอง P1 มีค่าเท่ากับ 0.0194 ± 0.0011 มิลลิกรัม โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

นอกจากนี้ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนู และปริมาณของสารหนูสะสมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1 เกี่ยวข้องกับรูปของสารหนูในกากโลหกรรมที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซนไฟไรต์ (FeAsS) และอาร์เซนิต (As^{5+}) ที่ถูกดูดซับด้วยสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ซึ่งทำให้พืชสามารถดูดตั้งและสะสมสารหนูได้น้อย (Gabarrón et al., 2018; Hammond et al., 2018; Isosaari & Sillanpää, 2012; Ko et al., 2008; Ono et al., 2016; Wang et al., 2016; Yang et al., 2009) ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรเป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ในชุดการทดลอง C2 ส่งผลทำให้ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนู และ



รูปที่ 4.10 ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนุส่วนใต้กอกโลหกรรมและส่วนเหนือกอกโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน



รูปที่ 4.11 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กอกโลหกรรมและส่วนเหนือกอกโลหกรรมของ
หญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

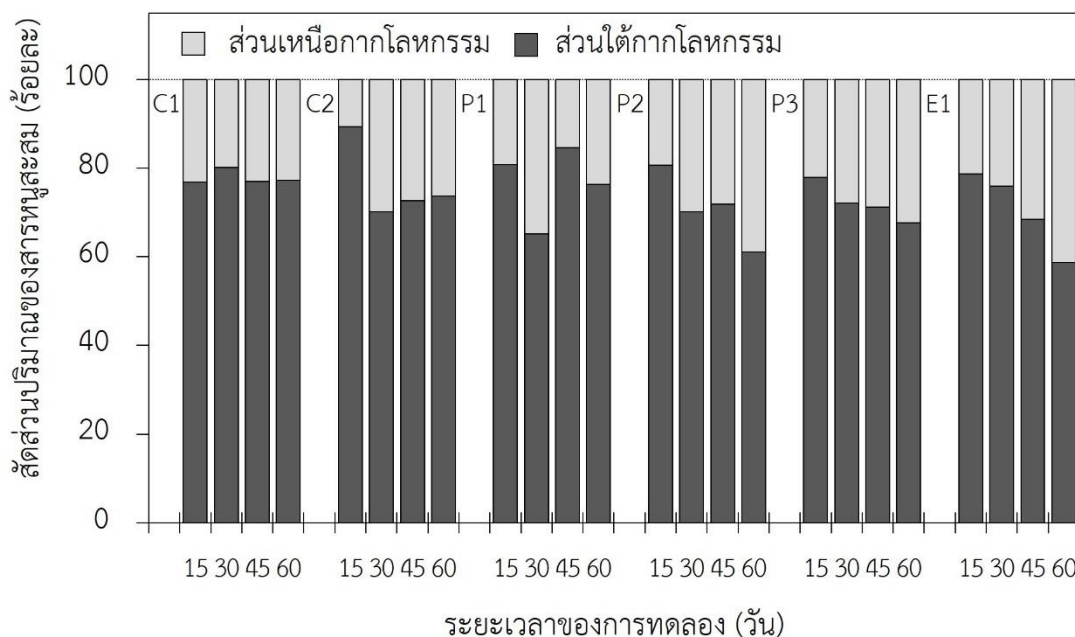
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนืออากาศโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยน่าจะมี ความเกี่ยวข้องกับการที่อิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและไอออนในอากาศโลหกรรม และการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์บริเวณรากพืชที่กระตุ้นให้รากพืชดูดติงและสะสมธาตุอาหารได้เพิ่มขึ้น (Bi et al., 2011; Luo et al., 2018) และสำหรับชุดการทดลอง P1 ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 0.7 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน มีปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้อากาศโลหกรรมสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลการทดลองที่เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange) ระหว่างฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และอาร์เซนเตไอออน (AsO_4^{3-}) ที่ทำให้สารหนูในอากาศโลหกรรมเปลี่ยนรูปและถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของอาร์เซนเตไอออนได้เพิ่มขึ้น และถูกพืชดูดติงไปใช้ประโยชน์ผ่านทางระบบรากได้เพิ่มขึ้น (Gillispie et al., 2015) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Couto et al. (2015) ที่รายงานผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารฟอสเฟต พบว่า หญ้าไรย์ (*Lolium perenne*) และผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ที่ปลูกในดินจากเหมืองแร่ที่ปนเปื้อนสารหนูมีแนวโน้มของมวลชีวภาพ และปริมาณการดูดติงและสะสมสารหนูเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนใต้อากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง C1, C2 และ P1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากหญ้าเนเปียร์แคระเป็นพืชที่ไม่มีความสามารถในการดูดติงและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก (Arsenic Non-hyperaccumulator) ทำให้สารหนูส่วนใหญ่จะถูกสะสมไว้ในแควคิวโอลในเซลล์รากได้มากกว่าการเคลื่อนย้ายเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำเพื่อขนส่งขึ้นไปสะสมอยู่ที่ใบพืช (Souri et al., 2017)

ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการดูดติงและสะสมสารหนูของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 และ P3 เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกับชุดการทดลอง P1 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนใต้อากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ชุดการทดลอง P3 มีแนวโน้มลดลง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนใต้อากาศโลหกรรมมีค่าลดลงตามระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยชุดการทดลอง P2 และ P3 มีค่าเท่ากับ 7.38 ± 0.84 และ 5.58 ± 0.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นปริมาณของสารหนูสะสม เท่ากับ 0.0377 ± 0.0029 และ 0.0343 ± 0.0036 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้ยัง พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนืออากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 และ P3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนืออากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 และ P3 มีค่า

เท่ากับ 2.62 ± 0.25 และ 2.22 ± 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1, C2 และ P1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม มวลชีวภาพส่วนเหนืออากาศโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง P3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (รูปที่ 4.9) ส่งผลทำให้ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนืออากาศโลหกรรมในชุดการทดลอง P2 มีค่าเท่ากับ 0.0240 ± 0.0017 มิลลิกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง P3 ที่มีค่าเท่ากับ 0.0164 ± 0.0019 มิลลิกรัม โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

โดยจากผลการทดลองการเติมสารฟอสเฟตในระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง P2 และ P3 พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กอกโลหกรรมขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนเหนืออากาศโลหกรรมได้เพิ่มขึ้น โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนใต้กอกโลหกรรมมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนืออากาศโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับสัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในชุดการทดลอง P2 และ P3 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 มีระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนืออากาศโลหกรรม และปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนืออากาศโลหกรรมสูงที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากระดับของสารฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนจะทำให้สารหนูในกอกโลหกรรมถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของอาร์เซเนตไอออนได้เพิ่มขึ้นด้วยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนลบ ซึ่งจะถูกพืชดูดตั้งไปใช้ประโยชน์ผ่านทางระบบรากได้เพิ่มขึ้น (Gillispie et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ฟอสเฟตไอออนที่เพิ่มขึ้นจะเกิดสภาวะแข่งขันกับอาร์เซเนตไอออน และถูกดูดตั้งเข้าสู่เซลล์ของรากพืชได้มากขึ้น (Anawar et al., 2018; Bolan et al., 2013; Farooq et al., 2016; Han et al., 2017; Punshon et al., 2017; Roy et al., 2015; Sourı et al., 2017) โดยในสภาวะที่ขาดแคลนฟอสฟอรัสพืชจะถูกกระตุ้นให้ดูดตั้งอาร์เซเนตไอออนได้เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันในสภาวะที่มีฟอสฟอรัสสูงการดูดตั้งอาร์เซเนตไอออนของพืชจะลดน้อยลงหรือเกิดการยับยั้งขึ้น (Anawar et al., 2018; Han et al., 2017) และทำให้สารหนูที่สะสมอยู่ที่เซลล์รากพืชเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนลำต้นและใบของพืชได้เพิ่มขึ้น (Bolan et al., 2013; Farooq et al., 2016; Sourı et al., 2017) ซึ่งเป็นกลไกการลดความเป็นพิษของสารหนูโดยทั่วไปของพืช



รูปที่ 4.12 สัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนได้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

สำหรับผลการทดลองในชุดการทดลอง E1 ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่งผลทำให้ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูของหญ้าเนเปียร์แคระส่วนได้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรม มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนได้กากโลหกรรม มีค่าเท่ากับ 6.08 ± 0.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นชุดการทดลอง P3 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตาม มวลชีวภาพส่วนได้กากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง E1 ที่มีแนวโน้มต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นตลอดระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 4.9) ส่งผลทำให้ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนได้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง E1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.0250 ± 0.0032 มิลลิกรัม ในขณะที่หญ้าเนเปียร์ส่วนเหนือกากโลหกรรมมีระดับความเข้มข้นของสารหนู และปริมาณของสารหนูสะสม เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ต่ำกว่าชุดการทดลอง P2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง P3 โดยมีค่าเท่ากับ 2.27 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.0175 ± 0.0004 มิลลิกรัม ตามลำดับ

โดยผลการทดลองในชุดการทดลอง E1 ที่ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กาคโลหกรรมขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนเหนือกาคโลหกรรมได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกับชุดการทดลอง P2 และ P3 รวมทั้งยังมีแนวโน้มของสัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (รูปที่ 4.12) ผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากการที่สารอิตีทีเอช่วยทำให้โลหะหนักไอออนบวกโดยเฉพาะ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่ถูกปลดปล่อยออกมาภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอิตีทีเอ โดยไม่เกิดการตกตะกอนและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง และมีความจำเพาะต่อสารหนู (Khalid et al., 2017; Kim et al., 2016; Kim et al., 2015; Kim et al., 2014; Ryu et al., 2017; Wang et al., 2018b) ซึ่งจะส่งผลให้รากพืชเกิดการดูดดึงสารหนูได้ลดลง อย่างไรก็ตามมวลชีวภาพส่วนใต้กาคโลหกรรมและส่วนเหนือกาคโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง E1 ที่มีแนวโน้มต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Abbas and Abdelhafez (2013) ที่พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารอิตีทีเอที่เพิ่มขึ้นทำให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูในราก (Root) และยอด (Shoot) ของต้นข้าวโพด (*Zea mays* L.) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และช่วยทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารหนูจากรากขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนยอดได้เพิ่มขึ้น โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้มวลชีวภาพ และปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของข้าวโพดมีแนวโน้มลดลง และพิจารณามวลชีวภาพส่วนเหนือกาคโลหกรรม ระดับความเข้มข้นของสารหนูทั้งในส่วนเหนือกาคโลหกรรมและส่วนใต้กาคโลหกรรม และปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกาคโลหกรรม พบว่า ชุดการทดลอง E1 และ P3 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ จึงมีความเป็นไปได้ว่าความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง E1 มีสาเหตุมาจากการดูดดึงและสะสมสารหนู รวมทั้งสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอิตีทีเอและโลหะไอออนบวก (Cation Metal-EDTA Complexes) (Luo et al., 2018) โดยรากพืชสามารถดูดดึงสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ผ่านเส้นทางอะโพลลาสติก (Apoplastic Pathway) ซึ่งเป็นการขนส่งที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม และสามารถลำเลียงสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ (Neutral Charge) เหล่านี้ผ่านแถบแคสพารีอัน (Casparian Strip) เข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) และถูกลำเลียงขึ้นไปสะสมอยู่ในที่ลำต้นและใบได้เพิ่มขึ้น (Hasan et al., 2019; Shahid et al., 2014) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Sampanpanish and Nanthavong (2019) ที่รายงานว่า การเติมสารอิตีทีเอในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมส่งผลให้ต้นไมยราบ (*Mimosa pudica* L.) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนูสามารถดูดดึงและสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้น โดยระดับความเข้มข้นของสารอิตีทีเอและระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ต้นไมยราบมีปริมาณการสะสมเหล็กที่รากลดลง แต่มีปริมาณการสะสมเหล็กที่ลำต้นและใบเพิ่มขึ้น

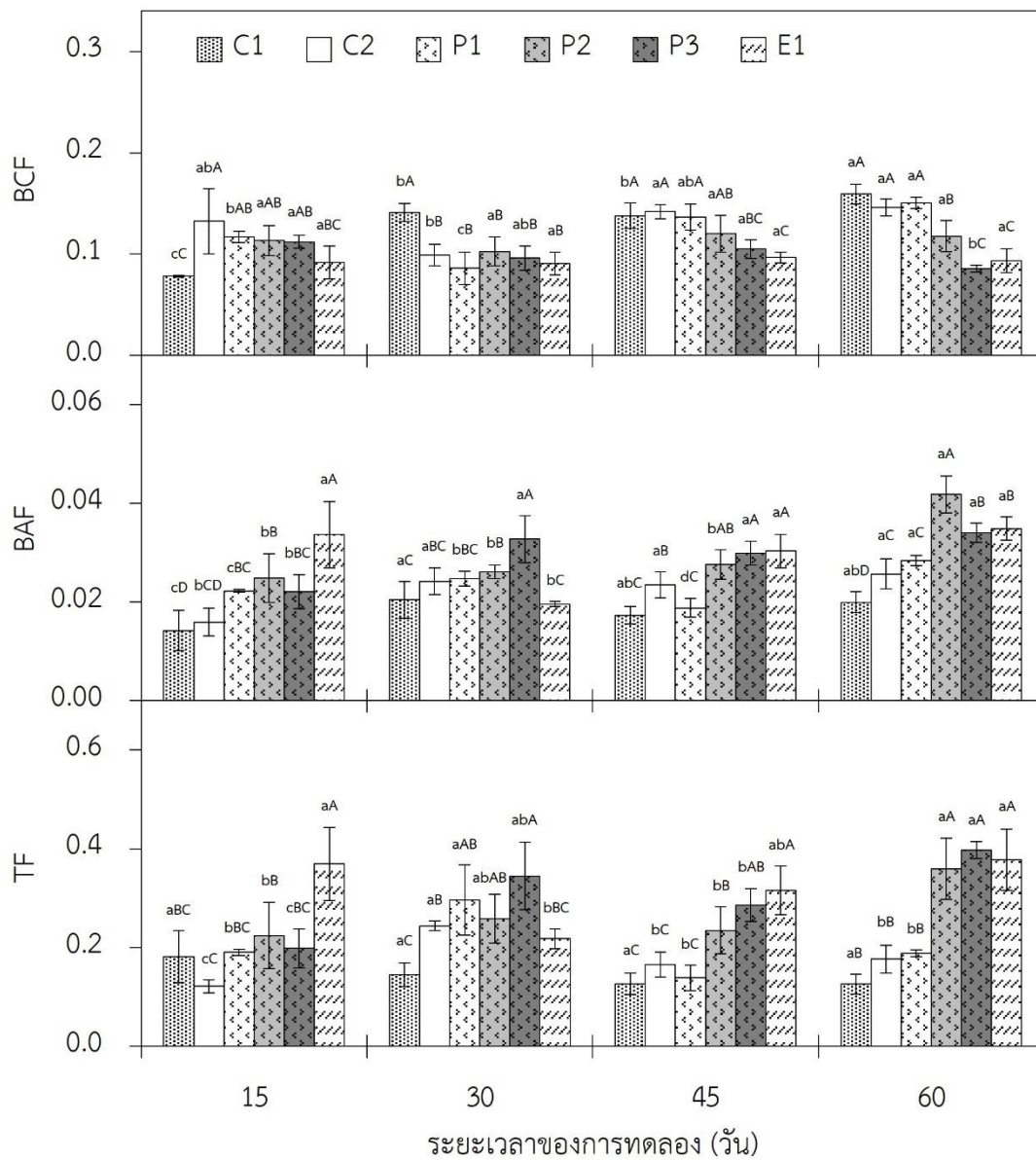
4.4.7 ผลของสารช่วยเร่งต่อปัจจัยการดูดซับและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

การบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารช่วยเร่ง ได้แก่ สารฟอสเฟต และสารอีดีทีเอ ส่งผลทำให้ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (Bioconcentration Factor, BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (Bioaccumulation Factor, BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (Translocation Factor, TF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่า BCF ในชุดการทดลอง C1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชุดการทดลองอื่นมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่าหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1, C2 และ P1 มีค่า BCF สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.1592 ± 0.0099 , 0.1461 ± 0.0083 และ 0.1507 ± 0.0055 ตามลำดับ และไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ รองลงมา คือ ชุดการทดลอง P2 ที่มีค่าเท่ากับ 0.1178 ± 0.0152 และชุดการทดลอง P3 และ E1 ที่มีค่าไม่มีแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.0856 ± 0.0035 และ 0.0935 ± 0.0117 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า BAF เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกับค่า BCF โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่า BAF ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นชุดการทดลอง E1 ที่มีแนวโน้มคงที่ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ชุดการทดลอง P2 มีค่า BAF สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.0418 ± 0.0037 รองลงมา คือ ชุดการทดลอง P3 และ E1 ที่มีค่าไม่มีแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 0.0340 ± 0.0019 และ 0.0349 ± 0.0024 ตามลำดับ และชุดการทดลอง C2 และ P1 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 0.0257 ± 0.0030 และ 0.0284 ± 0.0011 ตามลำดับ และชุดการทดลอง C1 ที่มีค่าเท่ากับ 0.0200 ± 0.0021 โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

โดยผลการทดลองของค่า BCF ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสารหนูเข้าสู่ส่วนใต้กากโลหกรรม และค่า BAF ที่แสดงถึงความสามารถในการสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลอง มีความสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 4.10) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการสะสมสารหนูส่วนใหญ่ไว้ในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) โดยการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารช่วยเร่งช่วยทำให้ให้หญ้าเนเปียร์แคระเกิดการสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดลองของค่า TF ที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ค่า TF ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการ

ทดลอง C1, C2 และ P1 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 0.1261 ± 0.0196 , 0.1767 ± 0.0279 และ 0.1886 ± 0.0066 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า TF ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2, P3 และ E1 มีค่าเท่ากับ 0.3599 ± 0.0620 , 0.3975 ± 0.0169 และ 0.3975 ± 0.0169 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลการทดลองของค่า TF เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีความสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนือกากโลหกรรม (รูปที่ 4.10) และค่า BAF ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2, P3 และ E1 ที่มีค่ามากกว่าชุดการทดลอง C1, C2 และ P1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในทุกชุดการทดลอง พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนใต้กากโลหกรรมมีค่ามากกว่าส่วนเหนือกากโลหกรรม (รูปที่ 4.10) รวมทั้งค่า BCF และค่า TF ที่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นได้ว่าหญ้าเนเปียร์แคระในทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมได้ด้วยกลไกการตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) (Reeves et al., 2018; Sourı et al., 2017) อย่างไรก็ตาม พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ในชุดการทดลอง P2 และ E1 ที่มีค่าเท่ากับ 2.62 ± 0.25 และ 2.27 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าระดับความเข้มข้นของสารหนูในใบพืชทั่วไป ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1 - 1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kabata-Pendias, 2010) แสดงให้เห็นว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารช่วยเร่งในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ สารฟอสเฟตที่ระดับ 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารฮีตที่เอที่ระดับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ช่วยกระตุ้นให้หญ้าเนเปียร์แคระเกิดการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นไปสะสมที่ส่วนเหนือกากโลหกรรมได้เพิ่มขึ้นสูงที่สุด



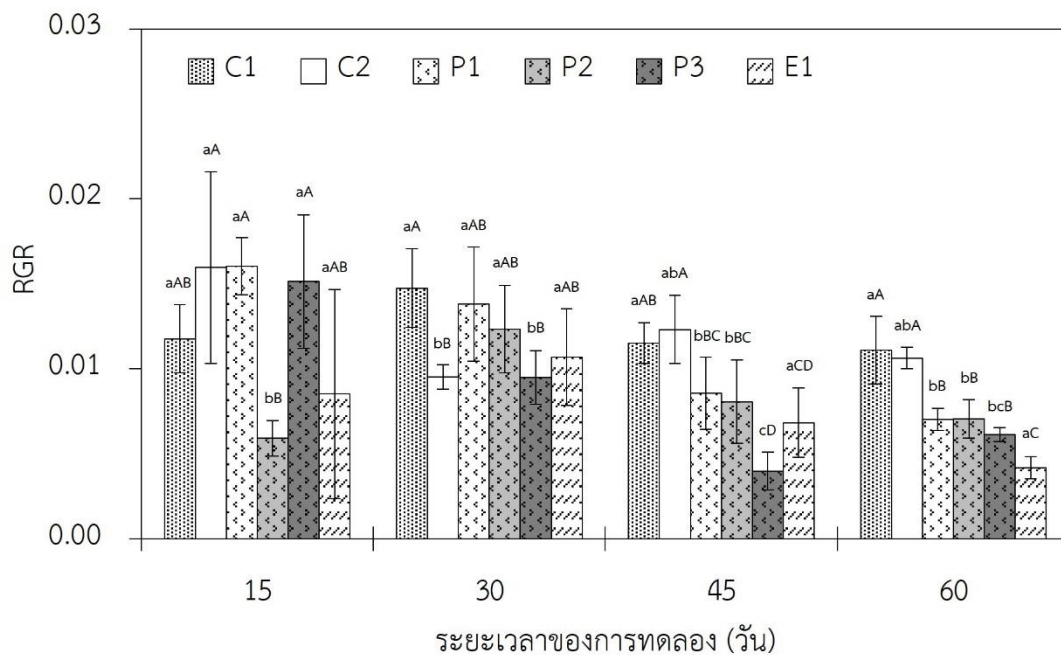
รูปที่ 4.13 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (TF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.4.8 ผลของสารช่วยเร่งต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate, RGR) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่คำนวณจากมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดลองแสดงในรูปที่ 4.14 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่า RGR ในชุดการทดลอง C1 และ C2 มีแนวโน้มคงที่และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาของการทดลอง ยกเว้นที่เวลา 30 วัน ที่ค่า RGR ในชุดการทดลอง C1 มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ค่า RGR ในชุดการทดลอง C1 และ C2 มีค่าเท่ากับ 0.0111 ± 0.0020 และ 0.0106 ± 0.0006 ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่ส่งผลทำให้มวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูลดลง ซึ่งสอดคล้องกับมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง C1 และ C2 ที่มีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 4.9) ในขณะที่ค่า RGR ในชุดการทดลองสารฟอสเฟตมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองและระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ค่า RGR ในชุดการทดลอง P1, P2 และ P3 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.0070 ± 0.0007 , 0.0071 ± 0.0011 และ 0.0061 ± 0.0004 ตามลำดับ สำหรับค่า RGR ในชุดการทดลอง E1 พบว่า มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 45 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ค่า RGR มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.0068 ± 0.0020 และ 0.0042 ± 0.0007 ตามลำดับ

โดยค่า RGR ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่มีการเติมสารช่วยเร่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) น่าจะมีสาเหตุมาจากสมบัติของกากโลหกรรมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช และมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (ตารางที่ 4.3) นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนือกากโลหกรรม (รูปที่ 4.10) ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารช่วยเร่งที่มีแนวโน้มสูงกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2, P3 และ E1 ที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนือกากโลหกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน สูงกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งส่งผลทำให้มวลชีวภาพส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2, P3 และ E1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน (รูปที่ 4.9) มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของหนุ่เนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

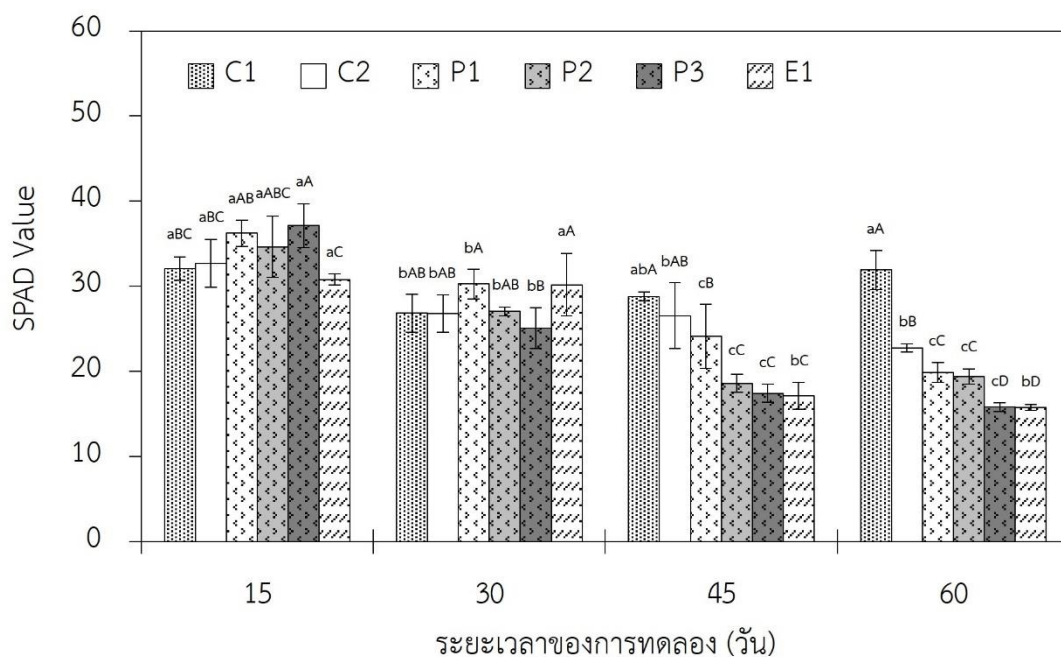
4.4.9 ผลของสารช่วยเร่งต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหญ้าเนเปียร์แคระเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่า SPAD Value ในชุดการทดลอง C1 มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 26.84 ± 2.22 - 32.07 ± 1.37 ในขณะที่ชุดการทดลอง C2 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 22.77 ± 0.48 สำหรับผลการทดลองในชุดการทดลองสารฟอสเฟต พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มของค่า SPAD Value ลดลงตามระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟตและระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ค่า SPAD Value ในชุดการทดลอง P1 และ P2 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 19.87 ± 1.17 และ 19.38 ± 0.90 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลอง P3 มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง P1 และ P2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 15.80 ± 0.51 นอกจากนี้ยัง พบว่า ค่า SPAD Value ในชุดการทดลอง E1 มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับชุดการทดลองสารฟอสเฟต และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ค่า SPAD Value ในชุดการทดลอง E1 มีค่าเท่ากับ 15.76 ± 0.35 โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง P3

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่มีบทบาทในการดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์ และทำหน้าที่ควบคุมการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Photosynthesis) ดังนั้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชจึงเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Shah et al., 2017) ทั้งนี้ พบว่า มีผลการวิจัยที่รายงานถึงปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่า SPAD Value ของหญ้าเนเปียร์หลายสายพันธุ์ โดย Kamwean et al. (2016) ได้รายงานว่ หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) สายพันธุ์ Chiang-Rai 2, Chiang-Rai 3, Taiwan A148 และ Tifton อายุ 90 วัน มีค่า SPAD Value อยู่ในช่วง 34.35 - 35.96 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Phakamas and Yampracha (2018) ที่รายงานว่ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum americanum* cv. Pakchong 1) ที่ปลูกในดินเพาะปลูกที่ไม่มีการเติมปุ๋ยเป็นเวลา 180 วัน และทำการเก็บเกี่ยวทุก 60 วัน มีค่า SPAD Value เฉลี่ยที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 31.0 ดังนั้น ผลการทดลองค่า SPAD Value ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1 ที่มีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง 26.84 ± 2.22 - 32.07 ± 1.37 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง 60 วัน จึงแสดงให้เห็นว่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถเจริญเติบโตได้ใ้ในสภาพโลกรวมปนเปื้อนสารหนู และมีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนูได้โดยไม่ส่งผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบลดลง

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารช่วยเร่ง ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มของค่า SPAD Value ลดลง

ซึ่งมีความสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของสารหนูล้วนส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (รูปที่ 4.10) รวมทั้งค่า BAF และค่า TF (รูปที่ 4.13) ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากกลไกการลดความเป็นพิษที่ทำให้พืชเคลื่อนย้ายสารหนูล้วนขึ้นไปสะสมในแวคคิวโอลที่บริเวณใบ (Souri et al., 2017) และทำให้พืชแสดงความเป็นพิษได้มากขึ้น โดยพืชจะเกิดการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ มีจำนวนใบลดลง เกิดอาการใบเหลือง (Chlorosis) การตายของเนื้อเยื่อ (Necrosis) การผลัดใบ (Defoliation) การเจริญเติบโตของยอดและรากลดลง การเปิด-ปิดของปากใบและการดูดดึงธาตุอาหารถูกจำกัด มีมวลชีวภาพลดลง และเกิดการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่มากเกินไป ส่งผลให้คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และดีเอ็นเอในเซลล์พืชเกิดความเสียหาย (Abbas et al., 2018; Moreno-Jiménez et al., 2012; พันธุ์ศัมพันธ์พานิช, 2558a) ดังแสดงในรูปที่ ค-2 (ภาคผนวก ค) และมีความสอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) (รูปที่ 4.14) ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารช่วยเร่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.15 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

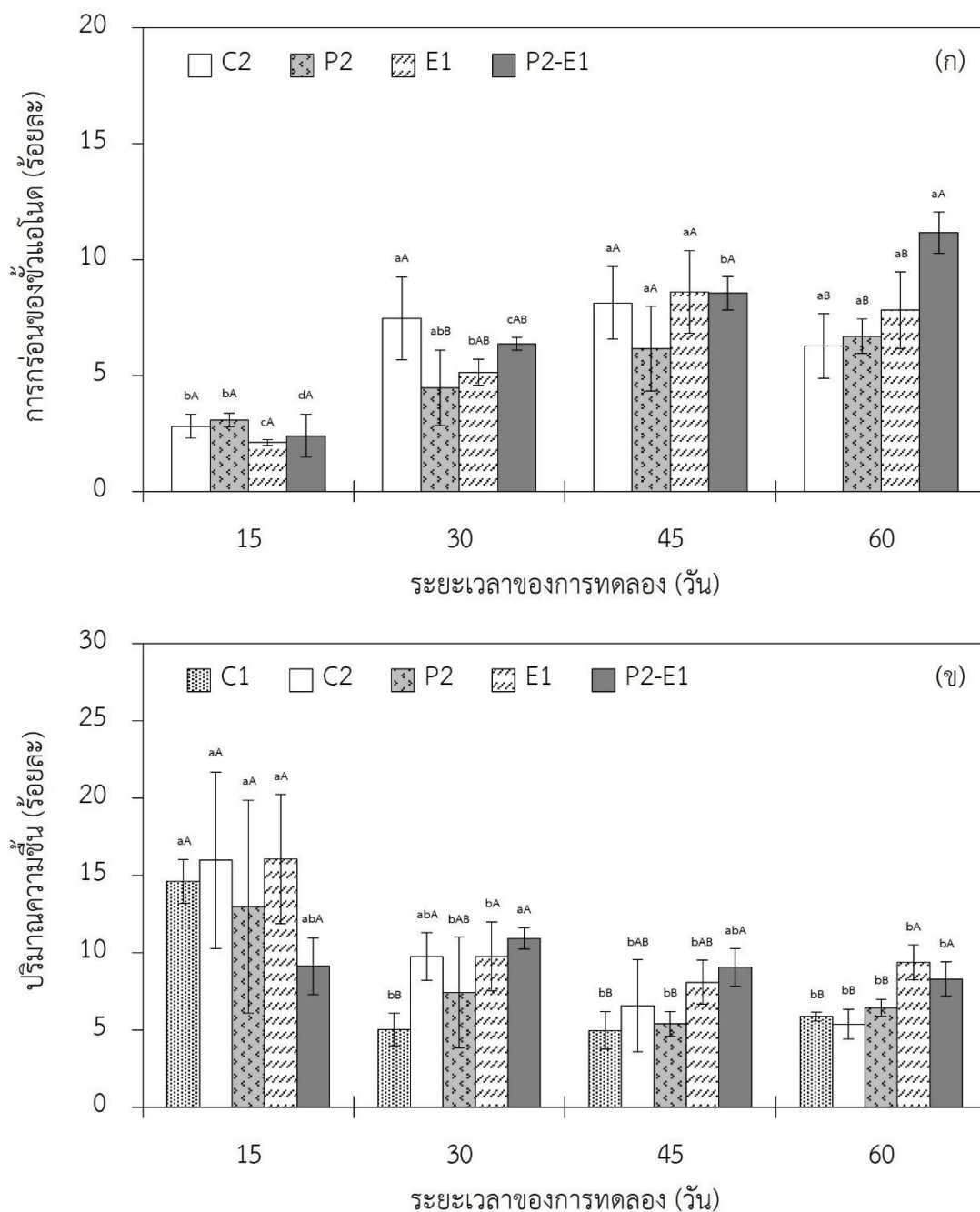
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.5 ผลของการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีทีทีเอในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลินศาสตร์ไฟฟ้า

จากผลการทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีทีทีเอในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจุลินศาสตร์ไฟฟ้า สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตที่ระดับ 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ในชุดการทดลอง P2 และสารอีทีทีเอที่ระดับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ในชุดการทดลอง E1 เป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นให้สารหนูเกิดการเคลื่อนย้ายขึ้นไปสะสมที่ส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระได้เพิ่มขึ้น โดยผลของการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตที่ระดับ 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีทีทีเอที่ระดับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ในชุดการทดลอง P2-E1 สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

4.5.1 ผลของสารผสมต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของข้าวไฟฟ้าและปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรม

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16(ก) และ 4.16(ข) พบว่า ภายใต้สภาวะการทดลองในชุดการทดลอง P2-E1 ส่งผลให้น้ำหนักของข้าวไฟฟ้าแคโทดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการทดลองเช่นเดียวกันกับชุดการทดลองอื่น ในขณะที่ร้อยละการกร่อนของข้าวแอโนดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแตกต่างจากร้อยละการกร่อนของข้าวแอโนดในชุดการทดลอง C2, P2 และ E1 ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง นอกจากนี้ยัง พบว่า ร้อยละการกร่อนของข้าวแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 11.17 ± 0.89 โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C2, P2 และ E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ $8.30 \pm 1.11 - 10.92 \pm 0.70$ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า ปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง E1 แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1, C2 และ P2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) การกร่อนของซัลไฟต์ และ (ข) ปริมาณความชื้นของ กากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

โดยผลการทดลองการกร่อนของขั้วแอโนดที่เกิดขึ้นในชุดการทดลอง P2-E1 เป็นผลมาจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Water Electrolysis) ที่ทำให้เกิดสภาวะกรด (Acidification) ขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนด (Choi et al., 2009) อย่างไรก็ตามร้อยละการกร่อนของขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลอง C2, P2 และ E1 ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากไอออนที่เกิดการแตกตัวของสารฟอสเฟต และสารอีดีทีเอ ส่งผลให้ชุดการทดลอง P2-E1 มีปริมาณไอออนในระบบมากกว่าชุดการทดลองอื่น และเกิดกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้กากโลหะกรรมบริเวณขั้วแอโนดเกิดสภาวะกรดได้รุนแรงกว่าชุดการทดลองอื่น นอกจากนี้กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลทำให้การระเหยของน้ำในระบบเพิ่มขึ้น (Kim et al., 2012a) ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีค่าเฉลี่ยลดลงต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นที่เวลา 15 วัน และมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง อย่างไรก็ตาม การทดลองครั้งนี้ได้ทำการควบคุมปริมาตรของน้ำประปาที่ใช้ในการรดน้ำหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละกระถางให้เท่ากัน โดยทำการรดน้ำวันละ 200 มิลลิลิตร ด้วยความถี่ 3 วันต่อสัปดาห์ ดังนั้น แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของกากโลหะกรรมยังเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารของพืชตามการเจริญเติบโตในแต่ละช่วงระยะเวลาของการทดลอง

4.5.2 ผลของสารผสมต่อสมบัติของกากโลหะกรรม

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า กากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่บริเวณขั้วแอโนดต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 5.09 ± 0.28 และมีแนวโน้มลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลอง โดยที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 2.06 ± 0.21 และ 1.91 ± 0.07 ตามลำดับ ในขณะที่ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าสูงกว่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 288.07 ± 14.23 มิลลิโวลต์ และที่เวลา 30 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แล้วมีค่าคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 553.10 ± 8.17 - 563.33 ± 5.98 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแตกต่างจากที่บริเวณขั้วแคโทดที่ พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 9.42 ± 0.95 และที่เวลา 30 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์ (แอนด์) กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณข้าวแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

เวลา จุดเก็บ (วัน) ตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง				
	C1	C2	P2	E1	P2-E1
0 ตัวอย่างผสม	7.71±0.07 ^{aA}	7.71±0.07 ^{cdA}	7.71±0.07 ^{CA}	7.71±0.07 ^{deA}	7.71±0.07 ^{CA}
15 แอนด์	7.28±0.17 ^{ba}	5.68±1.71 ^{eAB}	5.87±1.18 ^{dAB}	6.97±0.29 ^{eA}	5.09±0.28 ^{dB}
กึ่งกลาง	7.28±0.17 ^{bc}	7.57±0.07 ^{cb}	7.75±0.11 ^{cb}	8.06±0.15 ^{da}	7.73±0.01 ^{cb}
แคโทด	7.28±0.17 ^{bb}	8.69±0.70 ^{bcA}	8.84±0.45 ^{ba}	9.07±0.91 ^{ca}	9.42±0.95 ^{ba}
30 แอนด์	7.31±0.06 ^{ba}	3.49±0.41 ^{fc}	5.18±1.56 ^{deB}	5.61±0.74 ^{fb}	2.39±0.23 ^{ec}
กึ่งกลาง	7.31±0.06 ^{bc}	7.42±0.07 ^{db}	7.48±0.01 ^{cb}	7.68±0.06 ^{deA}	7.69±0.01 ^{ca}
แคโทด	7.31±0.06 ^{bc}	9.64±0.49 ^{abB}	9.37±0.70 ^{abB}	9.43±0.50 ^{bcB}	10.74±0.01 ^{aA}
45 แอนด์	7.25±0.07 ^{ba}	3.57±0.53 ^{fbC}	4.47±0.28 ^{eb}	3.13±0.69 ^{hc}	2.06±0.21 ^{ed}
กึ่งกลาง	7.25±0.07 ^{bd}	7.51±0.01 ^{cdC}	7.56±0.02 ^{bcB}	7.74±0.04 ^{deA}	7.59±0.04 ^{cb}
แคโทด	7.25±0.07 ^{bc}	10.16±0.67 ^{aAB}	10.02±0.34 ^{abB}	10.31±0.27 ^{aAB}	10.79±0.17 ^{aA}
60 แอนด์	7.31±0.18 ^{ba}	4.42±1.14 ^{fb}	4.16±0.72 ^{eb}	3.96±0.55 ^{gb}	1.91±0.07 ^{ec}
กึ่งกลาง	7.31±0.18 ^{bc}	7.75±0.03 ^{cdA}	7.69±0.06 ^{ca}	7.79±0.05 ^{deA}	7.50±0.04 ^{cb}
แคโทด	7.31±0.18 ^{bc}	9.36±0.57 ^{abB}	10.04±0.29 ^{abB}	9.97±0.58 ^{abB}	10.87±0.02 ^{aA}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

ตารางที่ 4.13 ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

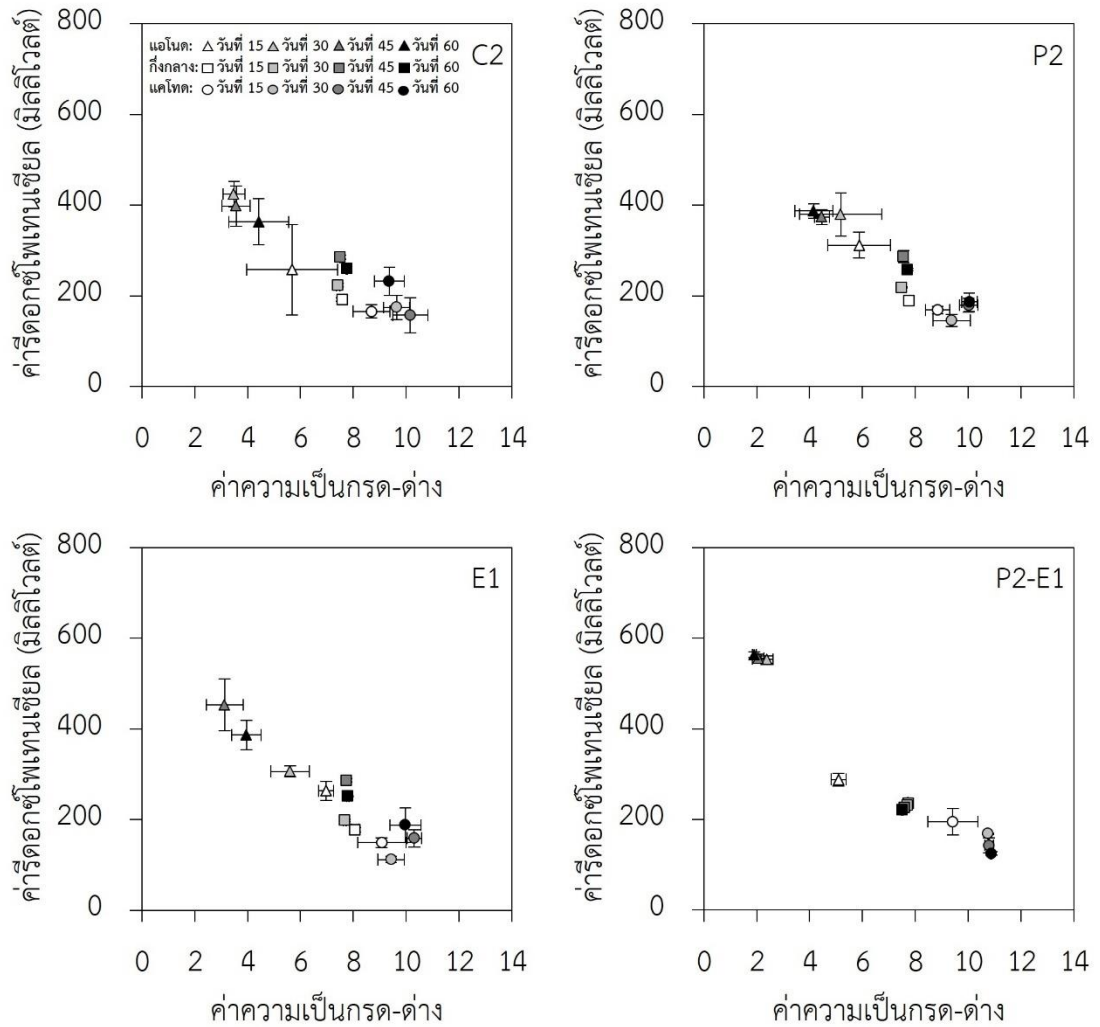
เวลาจุดเก็บ (วัน) ตัวอย่าง	ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)				
	C1	C2	P2	E1	P2-E1
0 ตัวอย่างผสม	196.64±2.31 ^{aA}	196.64±2.31 ^{cdeA}	196.64±2.31 ^{deA}	196.64±2.31 ^{eA}	196.64±2.31 ^{dA}
15 แอโนด	292.43±3.35 ^{aA}	257.50±99.94 ^{bcA}	311.90±29.03 ^{ba}	263.67±20.75 ^{dA}	288.07±14.23 ^{ba}
กึ่งกลาง	292.43±3.35 ^{aA}	192.10±3.56 ^{cdeC}	189.23±1.97 ^{deC}	178.07±5.05 ^{efD}	236.00±4.81 ^{cB}
แคโทด	292.43±3.35 ^{aA}	165.67±14.96 ^{deBC}	168.47±7.82 ^{efBC}	149.33±10.63 ^{fC}	195.23±29.09 ^{deB}
30 แอโนด	253.50±3.62 ^{bdD}	424.30±27.85 ^{ab}	379.70±47.57 ^{ab}	306.13±12.10 ^{cC}	553.10±8.17 ^{aA}
กึ่งกลาง	253.50±3.62 ^{ba}	223.30±3.80 ^{bcdC}	218.40±1.30 ^{dC}	198.03±2.33 ^{eD}	231.53±3.24 ^{cB}
แคโทด	253.50±3.62 ^{ba}	174.30±27.09 ^{deB}	145.37±13.50 ^{fbC}	111.80±6.84 ^{gD}	168.43±0.90 ^{eBC}
45 แอโนด	217.30±1.65 ^{cdD}	398.00±44.71 ^{abC}	374.10±16.47 ^{aC}	453.00±56.93 ^{ab}	555.47±8.67 ^{aA}
กึ่งกลาง	217.30±1.65 ^{db}	285.13±4.36 ^{ba}	286.67±13.76 ^{bcA}	286.70±3.53 ^{cdA}	226.37±6.84 ^{cB}
แคโทด	217.30±1.65 ^{da}	157.10±39.98 ^{eb}	179.03±15.55 ^{eAB}	158.93±19.06 ^{efB}	142.90±16.58 ^{fb}
60 แอโนด	244.87±1.79 ^{cC}	363.17±50.47 ^{ab}	387.13±15.61 ^{ab}	386.87±32.34 ^{bb}	563.33±5.98 ^{aA}
กึ่งกลาง	244.87±1.79 ^{cC}	259.87±1.53 ^{bcA}	257.93±2.04 ^{cA}	251.60±1.22 ^{db}	220.93±4.94 ^{dD}
แคโทด	244.87±1.79 ^{ca}	231.93±30.80 ^{bcdA}	186.17±20.34 ^{deB}	187.73±38.61 ^{efB}	124.73±3.85 ^{gC}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

($p < 0.05$) แล้วมีค่าคงที่จลนศาสตร์การทดลองที่เวลา 60 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง $10.74 \pm 0.01 - 10.87 \pm 0.02$ ในขณะที่คาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลที่บริเวณขั้วแคโทดมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 195.23 ± 29.09 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้น และที่เวลา 30 วัน จลนศาสตร์การทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 124.73 ± 3.85 มิลลิโวลต์ ในขณะที่กากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีแนวโน้มคงที่ที่อยู่ในช่วง $7.50 \pm 0.04 - 7.73 \pm 0.01$ นอกจากนี้ยัง พบว่า คาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง $220.93 \pm 4.94 - 236.00 \pm 4.81$ มิลลิโวลต์

จากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง และคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรมในแต่ละจุดของการเก็บตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และที่ระยะเวลาของการทดลองเดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสารหนูในรูปที่ละลายได้ (Labile Arsenic) ในชุดการทดลอง P2-E1 มีความแตกต่างจากชุดการทดลอง C2, P2 และ E1 ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน ที่มีและไม่มีสารเติมสารช่วยเร่ง โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่ากากโลหะกรรมในทุกจุดของการเก็บตัวอย่างมีคาร์ดิออกซ์โพเทนเชียลมากกว่า 100 มิลลิโวลต์ ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้จะอยู่ในรูปของอาร์เซเนต และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด พบว่า ที่เวลา 15 วัน สารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $H_2AsO_4^-$ อย่างไรก็ตามแม้ว่าสภาวะกรดและสภาวะออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนดจะทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกมาได้เพิ่มขึ้น จากการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชัน (Oxidative Dissolution) ของสารประกอบเหล็ก และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) (Brookins, 1988; Kim et al., 2014; Wang et al., 2018b) แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่มีค่าลดลงต่ำกว่า 4 ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน จลนศาสตร์การทดลองที่เวลา 60 วัน ส่งผลทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของกรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) (Khalid et al., 2017) และทำให้ในระหว่างการทดลองสารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่อาจเกิดการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรากพืชที่บริเวณ

ข้าวแอนด์ไปย้งบริเวณข้าวแคโทตได้ด้วยกลไกอิเล็ทโทรออสโมซิส และถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอน ร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กได้อีกครั้งในสภาวะความเป็นด่าง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหกรรม ในชุดการทดลอง C2, P2, E1 และ P2-E1 ตามระยะเวลาของการทดลองที่เปลี่ยนไป

นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ในชุดการทดลอง P2-E1 ยังส่งผลทำให้สารฟอสเฟตไม่สามารถแสดงบทบาทของการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดได้ ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าในชุดการทดลอง P2-E1 ที่สามารถเกิดขึ้นได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น เนื่องจากไอออนในระบบปริมาณมากที่เกิดจากการแตกตัวของสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ รวมทั้งโลหะไอออนบวกที่ถูกปลดปล่อยออกมาภายใต้สภาวะกรดที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนดและการชะละลายของสารอีดีเอ สภาวะดังกล่าวทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรวดเร็ว และส่งผลต่อรูปร่างเคมีของสารฟอสเฟต ที่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ได้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าต่ำกว่า 4 นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 60 วัน ที่มีต่ำกว่าค่าคงที่การแตกตัวของกรด (pK_a) ของฟอสฟอรัส ที่มีค่าเท่ากับ 2.15 ทำให้สารฟอสเฟตส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของ H_3PO_4 (Brookins, 1988; Strawn, 2018) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะเทิน (Neutralization Reaction) กับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนดได้

2) ค่าการนำไฟฟ้า

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นและค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลองอื่นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยัง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 15 และ 30 วัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 5.54 ± 0.43 และ 5.87 ± 0.24 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ และที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 6.96 ± 0.55 และ 6.91 ± 1.50 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าในชุดการทดลอง P2-E1 พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น โดยมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง 3.52 ± 0.32 - 4.58 ± 0.15 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร นอกจากนี้ยัง พบว่า ที่เวลา 30, 45 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดในชุดการทดลอง P2-E1 พบว่า มีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง 1.67 ± 0.07 - 2.18 ± 0.56 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร โดยมีค่าต่ำกว่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$) และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2, P2 และ E1 ตลอดระยะเวลาการทดลอง ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าที่บริเวณขั้วแคโทดในชุดการทดลอง E1 ที่เวลา 30 วัน

ตารางที่ 4.14 ค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด (แอโนด) กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (กึ่งกลาง) และบริเวณขั้วแคโทด (แคโทด) ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

เวลา จุดเก็บ (วัน) ตัวอย่าง	ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนส์ต่อเมตร)				
	C1	C2	P2	E1	P2-E1
0 ตัวอย่างผสม	4.41±0.04 ^{aA}	4.41±0.04 ^{bA}	4.41±0.04 ^{aA}	4.41±0.04 ^{bA}	4.41±0.04 ^{cdA}
15 แอโนด	3.11±0.12 ^{bd}	4.43±0.28 ^{bb}	4.56±0.51 ^{ab}	3.79±0.07 ^{cc}	5.54±0.43 ^{ba}
กึ่งกลาง	3.11±0.12 ^{ba}	2.96±0.49 ^{cdeA}	3.15±0.18 ^{ba}	2.98±0.24 ^{defA}	3.52±0.32 ^{da}
แคโทด	3.11±0.12 ^{ba}	2.12±0.39 ^{efB}	1.94±0.35 ^{cb}	2.57±0.37 ^{efgAB}	2.18±0.56 ^{eB}
30 แอโนด	2.73±0.27 ^{bc}	5.55±1.15 ^{aAB}	4.56±0.39 ^{ab}	4.81±0.34 ^{abAB}	5.87±0.24 ^{ba}
กึ่งกลาง	2.73±0.27 ^{bc}	3.14±0.14 ^{cdBC}	3.21±0.35 ^{bb}	3.38±0.25 ^{cdB}	4.08±0.08 ^{cdA}
แคโทด	2.73±0.27 ^{ba}	1.76±0.10 ^{fb}	1.72±0.28 ^{cb}	2.41±0.05 ^{fgA}	1.67±0.07 ^{eB}
45 แอโนด	3.08±0.23 ^{bc}	3.82±0.52 ^{bcC}	3.32±0.06 ^{bc}	5.24±0.84 ^{ab}	6.96±0.55 ^{aA}
กึ่งกลาง	3.08±0.23 ^{bb}	2.82±0.25 ^{deB}	2.76±0.22 ^{bb}	2.66±0.09 ^{efgB}	4.08±0.34 ^{cdA}
แคโทด	3.08±0.23 ^{ba}	1.92±0.57 ^{fb}	1.73±0.23 ^{cb}	2.12±0.27 ^{ghB}	2.12±0.18 ^{eB}
60 แอโนด	2.96±0.34 ^{bb}	2.80±0.70 ^{deB}	3.32±0.69 ^{bb}	3.50±0.30 ^{cdB}	6.91±1.50 ^{aA}
กึ่งกลาง	2.96±0.34 ^{bb}	3.04±0.47 ^{cdB}	2.79±0.34 ^{bb}	3.15±0.42 ^{deB}	4.58±0.15 ^{ca}
แคโทด	2.96±0.34 ^{ba}	1.62±0.18 ^{fb}	1.74±0.33 ^{cb}	1.79±0.16 ^{hb}	1.98±0.31 ^{eB}

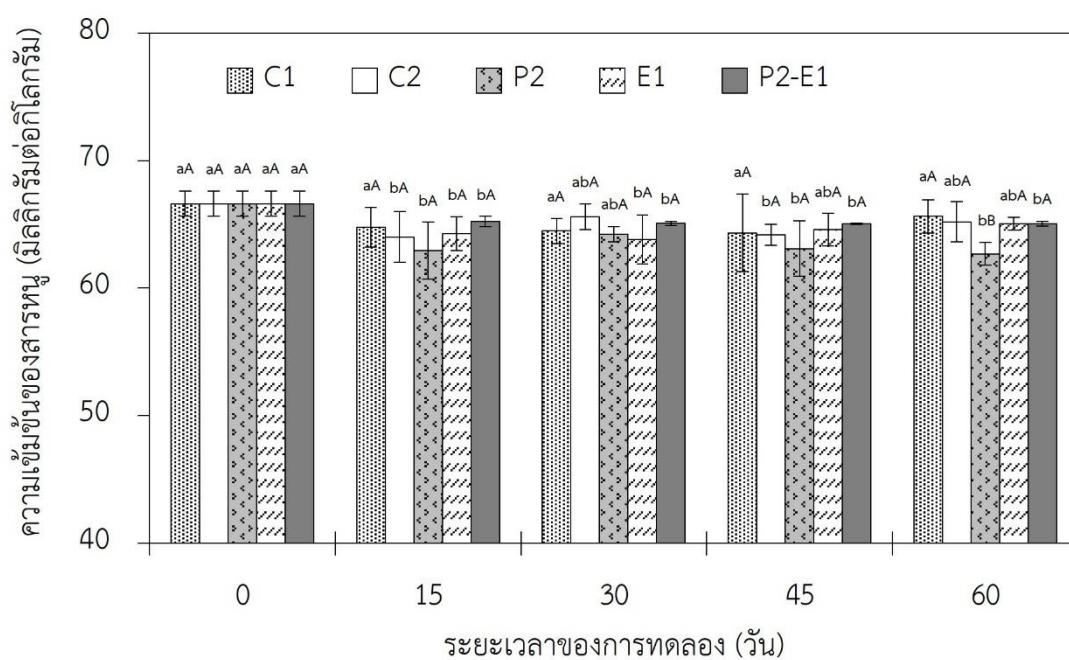
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองและจุดของการเก็บตัวอย่างต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

โดยค่าการนำไฟฟ้าของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด และกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีแนวโน้มสูงกว่าชุดการทดลองอื่น น่าจะมีสาเหตุมาจากความแรงของไอออน (Ionic Strength) ในระบบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการแตกตัวของสารฟอสเฟตและสารอิตีทีเอ ที่ส่งผลทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าปริมาณมาก รวมทั้งการปลดปล่อยไอออนจากทั้งการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การคายซับ (Desorption) และการชะละลาย (Dissolution) ที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า และสารช่วยเร่ง (Kim et al., 2005; Song et al., 2016) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (ตารางที่ 4.12) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (ตารางที่ 4.13) ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 ที่เวลา 30, 45 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสถานะที่เกิดขึ้นทำให้โลหะไอออนบวก โดยเฉพาะเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส เกิดการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชัน และเกิดการเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส ซึ่งส่งผลทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด และกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามโลหะไอออนบวกเหล่านี้จะสามารถเกิดการตกตะกอนได้อีกครั้งในสภาวะความเป็นด่างที่บริเวณขั้วแคโทด และเป็นสาเหตุทำให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแคโทดในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มไม่แตกต่างกับกากโลหะกรรมในชุดการทดลองอื่นที่มีการให้สนามไฟฟ้า

4.5.3 ผลของสารผสมต่อระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรม

จากผลของระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.18 พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมที่เวลา 15 วัน มีค่าต่ำกว่าระดับความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากนั้นมีแนวโน้มคงที่และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $65.03 \pm 0.18 - 65.23 \pm 0.41$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาการทดลอง ยกเว้นระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.17 ที่ทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของ H_3AsO_4 (Khalid et al., 2017) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง และเกิดการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรากพืชที่บริเวณขั้วแอโนดไปยัง

บริเวณขั้วแคโทดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส โดยสารหนูที่เคลื่อนที่ มาสะสมอยู่ที่บริเวณขั้วแคโทดจะถูกดูดซับ และ/หรือ ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของ เหล็กภายใต้สภาวะความเป็นด่างที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้เปลี่ยนกลับไป อยู่ในรูปที่รากพืชดูดดึงสารหนูไปใช้ประโยชน์ได้น้อย (Gabarrón et al., 2018; Hammond et al., 2018; Isoaari & Sillanpää, 2012; Ko et al., 2008; Ono et al., 2016; Wang et al., 2016; Yang et al., 2009)



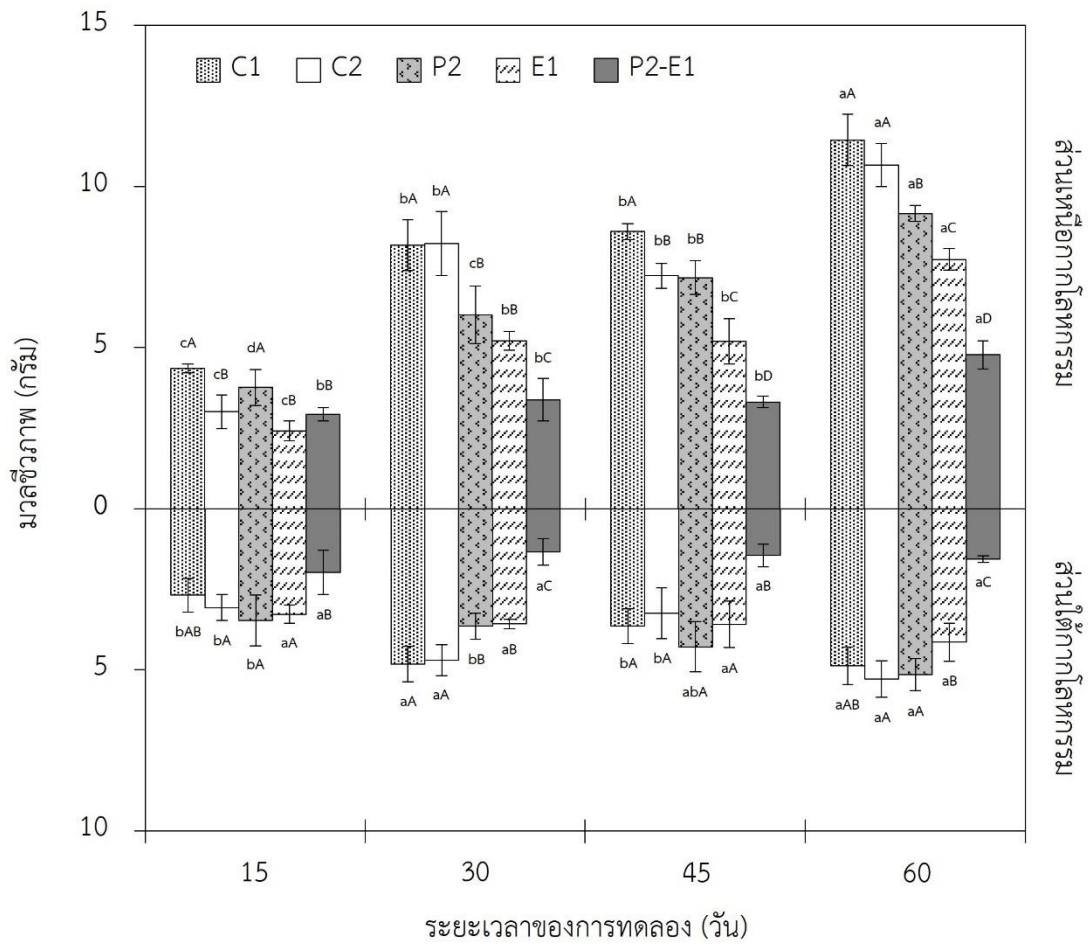
รูปที่ 4.18 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลอง ตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.5.4 ผลของสารผสมต่อมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ

การบำบัดกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ ในชุดการทดลอง P2-E1 สามารถสรุปผลการทดลองของมวลชีวภาพในส่วนได้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยจากผลการทดลอง พบว่า มวลชีวภาพส่วนได้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.55 ± 0.10 - 1.97 ± 0.69 กรัม อย่างไรก็ตาม พบว่า มวลชีวภาพส่วนได้กากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ยกเว้นที่เวลา 15 วัน ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C1 ในขณะที่มวลชีวภาพส่วนเหนือกากโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยในช่วงระยะเวลาเวลา 45 วันแรกของการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.94 ± 0.20 - 3.32 ± 0.18 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 4.78 ± 0.43 กรัม อย่างไรก็ตาม พบว่า มวลชีวภาพส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ยกเว้นที่เวลา 15 วัน ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 และ E1

โดยมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนได้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน น่าจะมีสาเหตุมาจากค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์ (ตารางที่ 4.12) ที่มีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.5 - 8.2 (Rahman et al., 2008) นอกจากนี้สภาวะความเป็นกรดที่เกิดขึ้นยังส่งผลให้เกิดการชะละลายของโลหะหนักที่มีความเป็นพิษและส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Matsumoto et al. (2019) ที่รายงานว่า สัดส่วนของไพไรต์ (Pyrite) ที่เพิ่มขึ้นในดินสังเคราะห์ส่งผลให้ปริมาณของเหล็กและซัลเฟอร์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้กระถินเทพา (*Acacia mangium*) ที่ปลูกในดินสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถดูดดึง และสะสมอลูมิเนียม เหล็ก และสังกะสี ได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างในดินสังเคราะห์มีค่าลดลงใกล้เคียง 2 เนื่องจากสัดส่วนของไพไรต์มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3 - 20 โดยน้ำหนัก ทำให้กระถินเทพาที่ปลูกในดินดังกล่าวแสดงความเป็นพิษและตายลงหลังจากวันที่ 56 ของการทดลอง



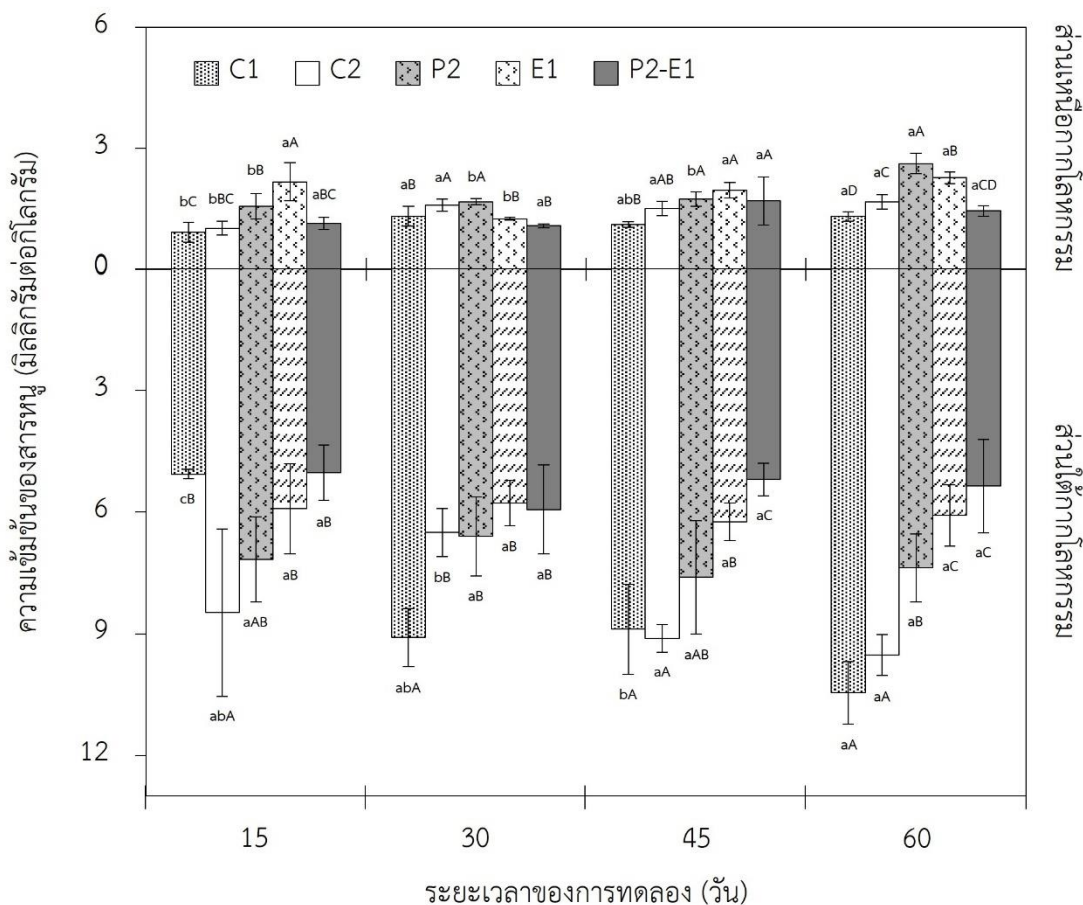
รูปที่ 4.19 มวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.5.5 ผลของสารผสมต่อการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

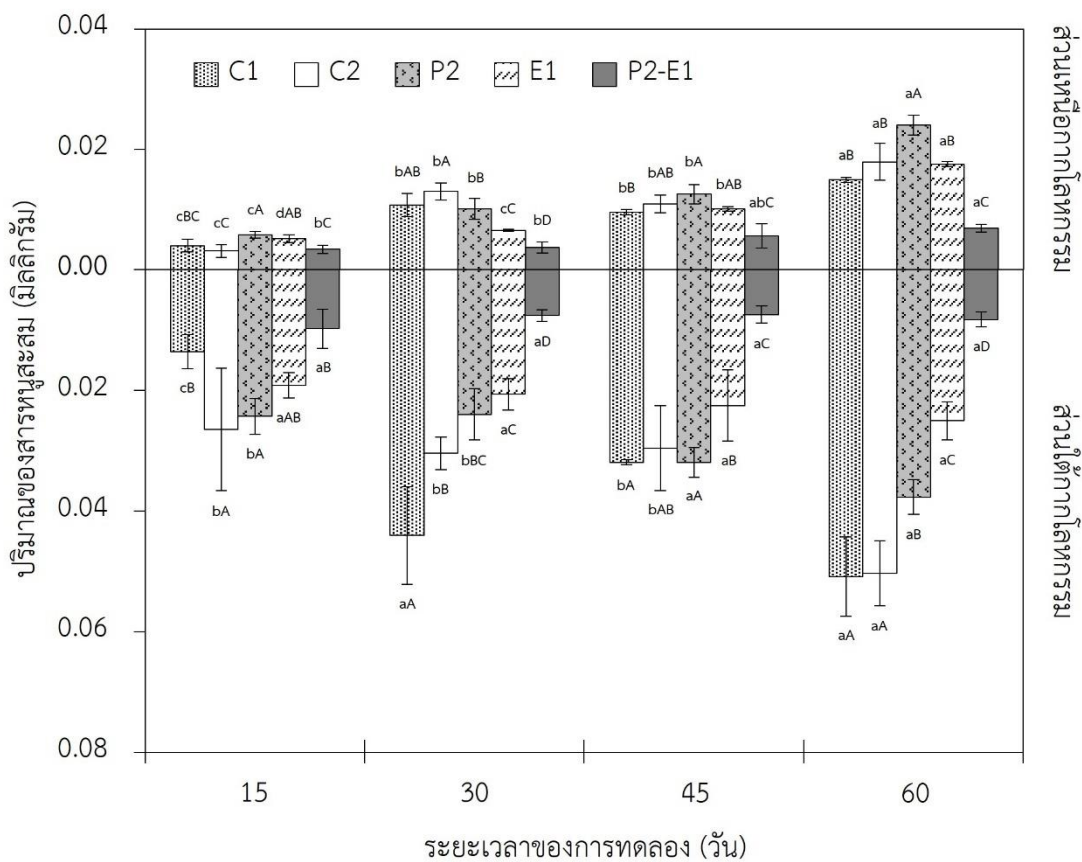
การบำบัดกากโลหกรรมปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีดีทีเอ ในชุดการทดลอง P2-E1 สามารถสรุปผลการทดลองของปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งสามารถคิดเป็นปริมาณของสารหนูสะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจากผลการทดลองของปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.03 ± 0.68 - 5.94 ± 1.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยัง พบว่า ที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นชุดการทดลอง E1 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระที่มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.08 ± 0.05 - 1.69 ± 0.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C1 และ C2 แต่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง P2 และ E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม มวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน (รูปที่ 4.19) ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มของปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรมคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.0074 ± 0.0014 - 0.0098 ± 0.0032 กรัม และมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน ในขณะที่ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง อย่างไรก็ตาม พบว่า ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรมมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ยกเว้นชุดการทดลอง C1 และ C2 ที่เวลา 15 วัน ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

โดยจากผลการทดลองในชุดการทดลอง P2-E1 แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีประสิทธิภาพในการดูดตั้งและสะสมสารหนูลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมมีแนวโน้มต่ำที่สุด ประกอบกับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์ที่มีค่าลดลงต่ำกว่า 4 ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน ยังทำให้สารหนูในรูปที่ละลายได้ส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุของ H_3AsO_4 และเกิดการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรากของหญ้าเนเปียร์แคระที่บริเวณข้าวแอนด์ไปยังบริเวณข้าวแอนด์โทดภายใต้อิทธิพลของ



รูปที่ 4.20 ปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนุส่วนใต้กอกโลหกรรมและส่วนเหนือกอกโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

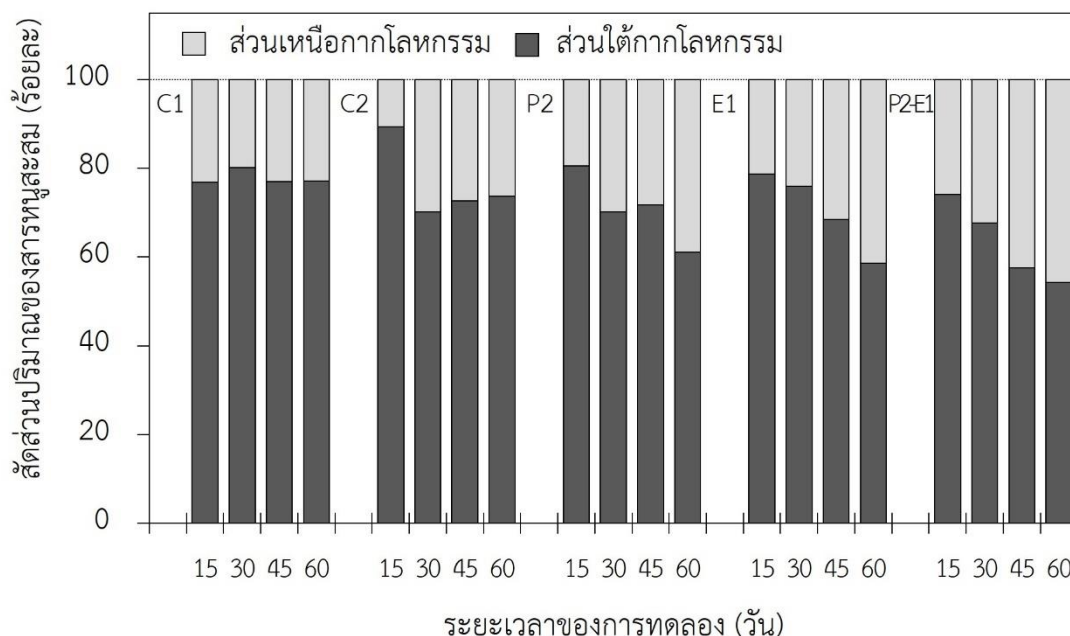
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ของหญ้าเนเปียร์แคระแต่ละส่วนที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน



รูปที่ 4.21 ปริมาณของสารหนุสะสมในส่วนใต้กอกโลหกรรมและส่วนเหนือกอกโลหกรรมของ
 หนุ้เนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันของหนุ้เนเปียร์แคะแต่ละส่วนในแต่ละชุดการ
 ทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของ
 การทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ของหนุ้เนเปียร์แคะแต่ละส่วนที่
 ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง
 สถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

สนามไฟฟ้าได้ด้วยกลไกอิเล็กโทรออสโมซิส นอกจากนี้สภาวะกรดที่เกิดขึ้นยังทำให้สารประกอบเหล็กออกไซด์เกิดตำแหน่งยึดเกาะ (Binding Site) ในปริมาณที่มากเกินไปต่อการดูดซับทั้งฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และอาร์เซนิตไอออน (AsO_4^{3-}) (Strawn, 2018) ซึ่งอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างฟอสเฟตไอออนและอาร์เซนิตไอออนลดลง อีกทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างของกาก โลหกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด ที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่มีค่าเข้าใกล้ 2 ยังส่งผลทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกจากสารประกอบเหล็กออกไซด์ได้ลดลง เนื่องจากสารประกอบอีดีทีที่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ คือ H_4EDTA และรูปของไอออนบวก คือ H_5EDTA^+ ได้เพิ่มขึ้น (Crisponi & Nurchi, 2016; Maketon et al., 2008) ซึ่งทำให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอีดีทีไอและโลหะไอออนบวก (Cation Metal-EDTA Complexes) มีแนวโน้มลดลง โดยสภาวะทั้งหมดที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้หญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลอง P2-E1 ดูดดึงและสะสมสารหนูได้ลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่า หญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลอง P2-E1 ยังคงมีสัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง P2 และ E1 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยมีสัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหะกรรม และส่วนเหนือกากโลหะกรรม อยู่ในช่วงร้อยละ 54.33 ± 5.88 - 74.04 ± 2.29 และร้อยละ 25.96 ± 2.29 - 45.67 ± 5.88 ตามลำดับ

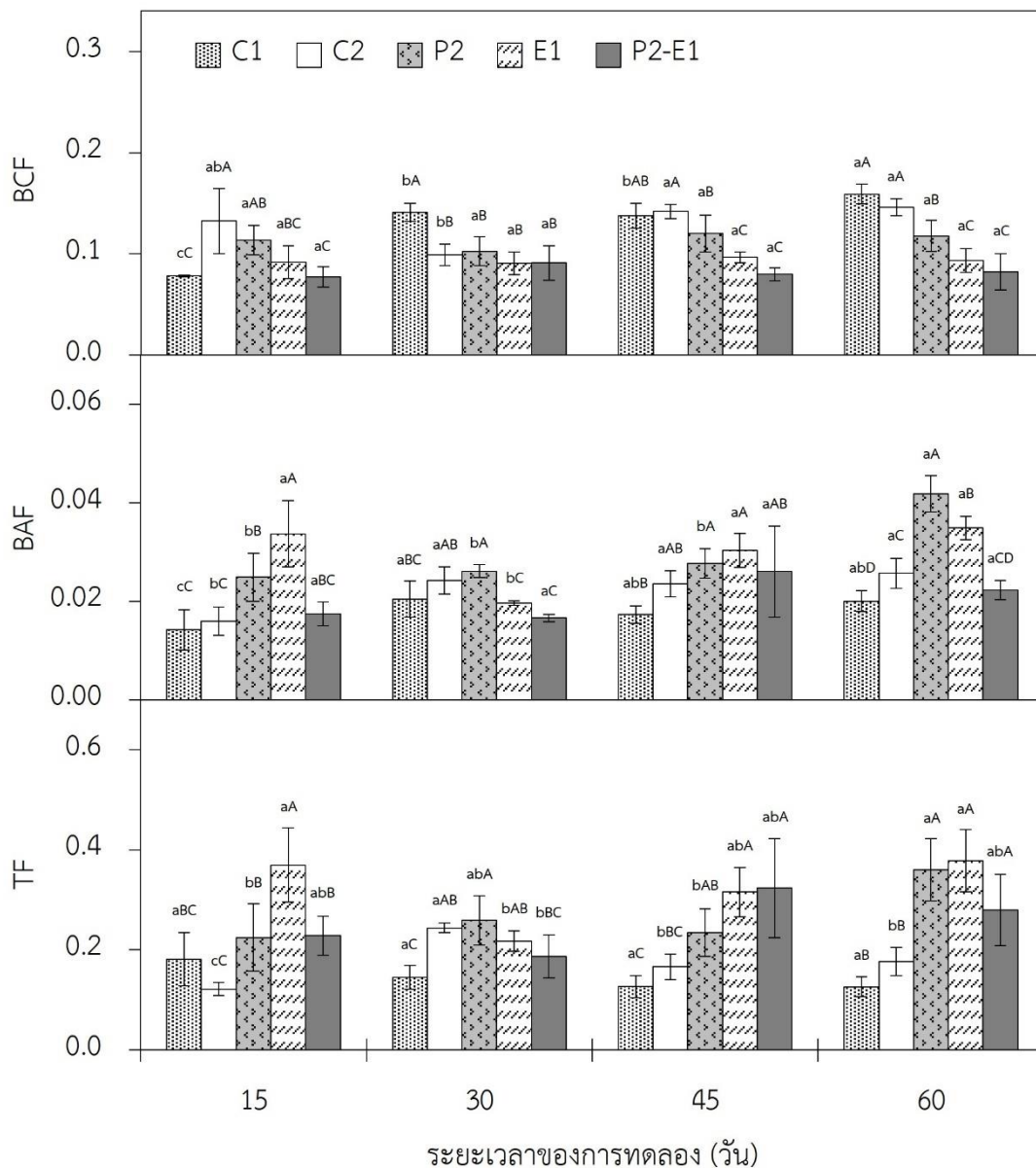


รูปที่ 4.22 สัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหะกรรมและส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาการทดลองที่แตกต่างกัน

4.5.6 ผลของสารผสมต่อปัจจัยการดูดซับและสะสมสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

การบำบัดกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้สนามไฟฟ้า และการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตและสารอีทีทีเอ ส่งผลทำให้ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (Bioconcentration Factor, BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (Bioaccumulation Factor, BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (Translocation Factor, TF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่า BCF, BAF และ TF ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่า BCF อยู่ในช่วง 0.0771 ± 0.0101 - 0.0912 ± 0.0171 และที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นชุดการทดลอง E1 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ค่า BAF มีค่าอยู่ในช่วง 0.0166 ± 0.0008 - 0.0260 ± 0.0093 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง C2 และ C1 แต่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง P2 และ E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่า TF ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.1869 ± 0.0434 - 0.3238 ± 0.0990 โดยที่เวลา 45 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง P2 และ E1 แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

โดยจากผลการทดลองของค่า BCF ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสารหนูเข้าสู่ส่วนใต้กากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 แสดงให้เห็นว่าสารอีทีทีเอมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารหนูผ่านทางระบบรากได้มากกว่าสารฟอสเฟต โดยมีความสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 และ E1 ที่มีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 4.20) ซึ่งทำให้หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ดูดซับและสะสมโลหะหนักไอออนบวกได้เพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้มวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยที่มวลชีวภาพและระบบรากที่สมบูรณ์ของพืชถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับและสะสมโลหะหนัก รวมทั้งการเคลื่อนย้ายโลหะหนักปริมาณมากที่สะสมอยู่ในเซลล์รากขึ้นไปสะสมในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน (Liu et al., 2021) อย่างไรก็ตามมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระส่วนเหนือกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ที่เวลา 15 ถึง 45 วัน จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน (รูปที่ 4.19) ประกอบกับระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรมที่มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลทำให้ค่า BAF ที่แสดง



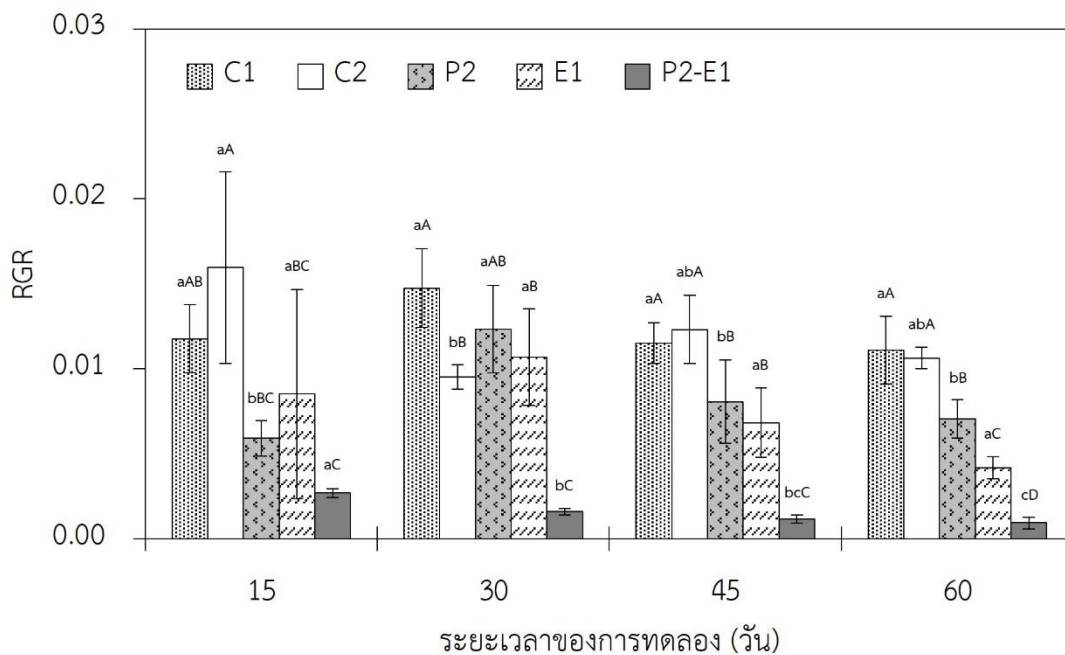
รูปที่ 4.23 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเนื้ออกาโลทกรรม (BAF) และปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กาทโลทกรรมขึ้นสู่ส่วนเนื้ออกาโลทกรรม (TF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

ถึงความสามารถในการสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มต่ำกว่าชุดการทดลอง P2 และ E1 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่า TF ที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์ในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับชุดการทดลอง P2 และ E1 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง และมีความสอดคล้องกับสัดส่วนปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหะกรรมและส่วนเหนือกากโลหะกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 และมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง P2 และ E1 (รูปที่ 4.22) แสดงให้เห็นว่าการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตที่ระดับ 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีทีทีเอที่ระดับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ในชุดการทดลอง P2-E1 ยังคงส่งผลให้หญ้าเนเปียร์แคระเกิดกลไกลดความเป็นพิษ (Detoxification) ของสารหนู โดยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนเหนือกากโลหะกรรมได้เช่นเดียวกับชุดการทดลอง P2 และ E1

4.5.7 ผลของสารผสมต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate, RGR) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่คำนวณจากมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการทดลองแสดงในรูปที่ 4.24 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่า RGR ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง และตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.0009 ± 0.0003 - 0.0027 ± 0.0003 ซึ่งมีความสอดคล้องกับมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนใต้กากโลหะกรรม และส่วนเหนือกากโลหะกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน โดยแนวโน้มของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 น่าจะมีสาเหตุมาจากความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity) ที่เพิ่มขึ้นของหญ้าเนเปียร์แคระจากการดูดดึงและสะสมโลหะหนักไอออนบวกที่เกิดการชะละลายภายใต้สภาวะความเป็นกรด (Matsumoto et al., 2019) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อแอนด

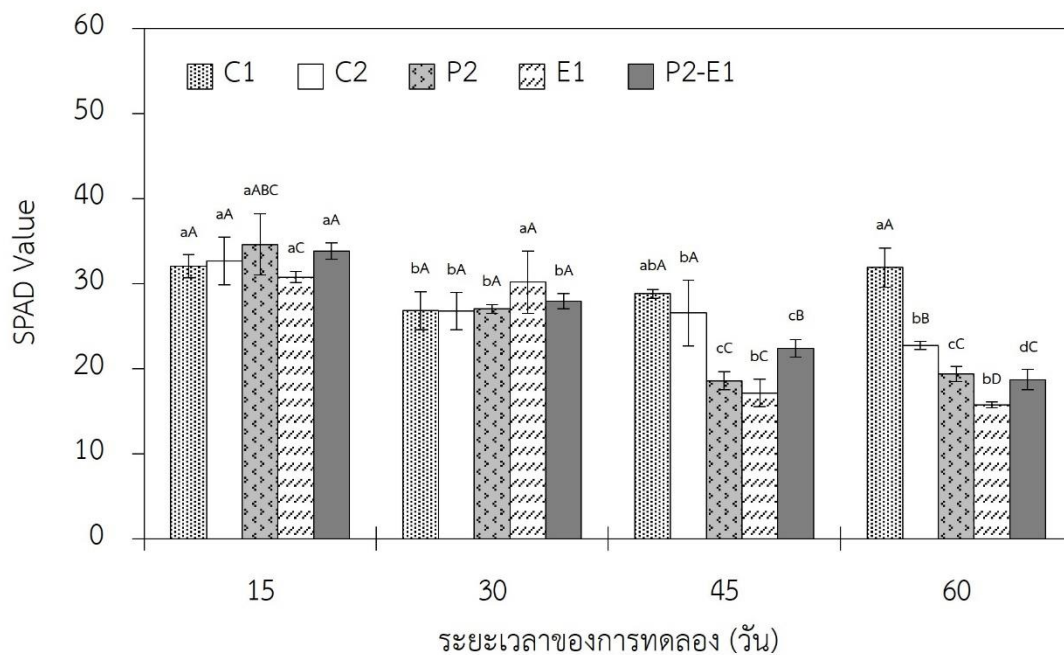


รูปที่ 4.24 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของหนุ่เนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.5.8 ผลของสารผสมต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหญ้าเนเปียร์แคระเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่า SPAD Value ในชุดการทดลอง P2-E1 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง E1 โดยที่เวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 33.83 ± 0.96 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน พบว่า มีค่าลดลงเท่ากับ 18.72 ± 1.21 โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง P2 แต่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลอง P2 และ E1 แต่พบว่าหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ยังคงแสดงความเป็นพิษได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น โดยเฉพาะมวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนใต้กอกโลทกรรม และส่วนเหนือกอกโลทกรรมที่มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่ที่เวลา 30 วัน (รูปที่ 4.19) รวมทั้งยังแสดงความเป็นพิษต่อพืชที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visual Phytotoxicity) ได้แก่ อาการใบเหลือง (Chlorosis) และการตายของเนื้อเยื่อ (Necrosis) อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ ค-3 และ ค-4 (ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในรูปของค่าดัชนีความเขียว (SPAD Value) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในแต่ละชุดการทดลองตามระยะเวลาของการทดลองที่แตกต่างกัน

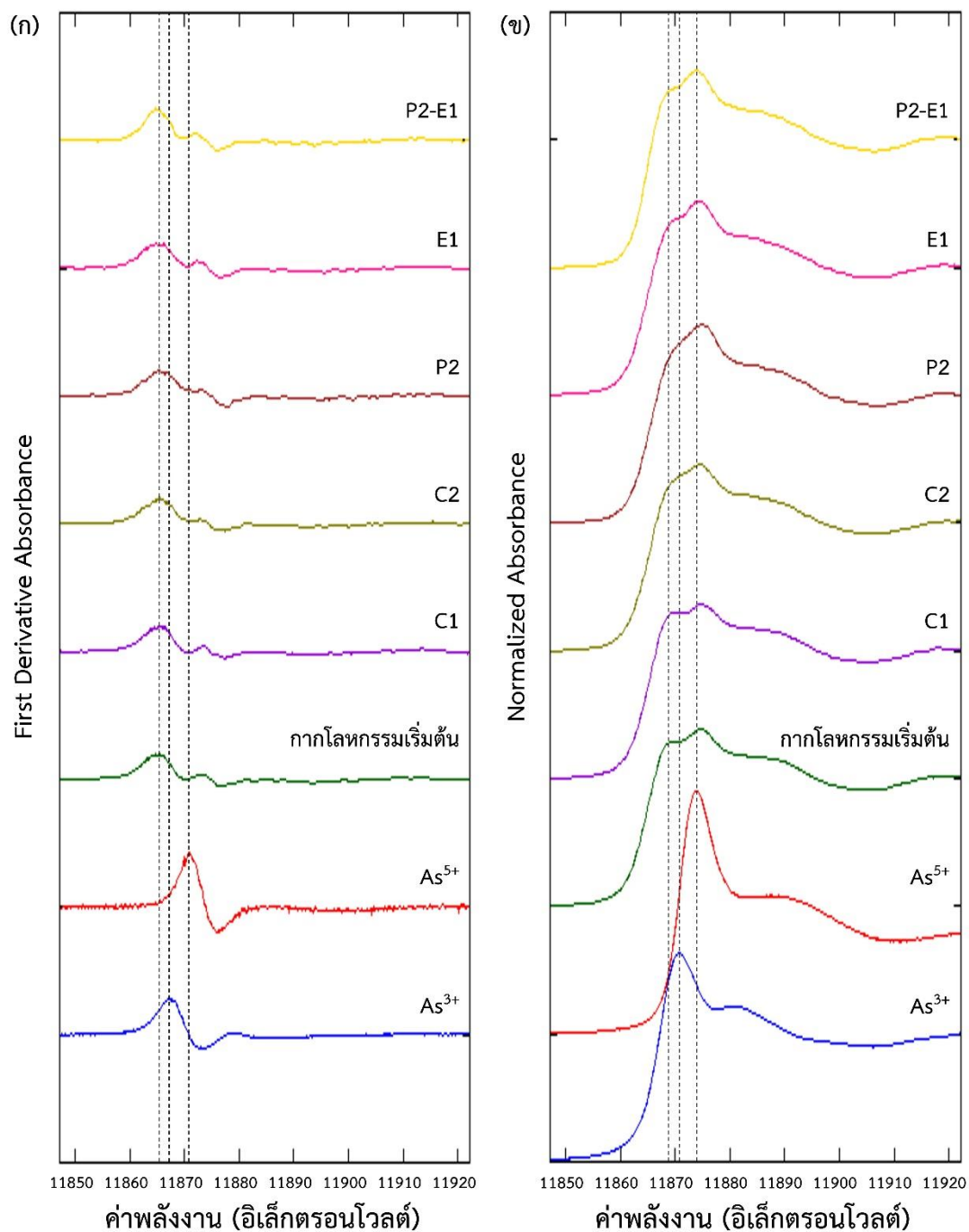
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาของการทดลองต่างกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละระยะเวลาของการทดลองแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

4.6 ผลการวิเคราะห์กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

รูปฟอร์มทางเคมี (Chemical Speciation) ของสารหนูในสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อพฤติกรรมทางชีวธรณีเคมี (Biogeochemical Behaviour) และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioavailability) ของสารหนูที่แตกต่างกัน (Craw & Bowell, 2014; Khalid et al., 2017) ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูของรากพืช รวมทั้งยังส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูเพื่อไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช โดยผลการวิเคราะห์กลไกการเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระในสภาวะการทดลองที่กระตุ้นให้หญ้าเนเปียร์แคระเกิดการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นไปสะสมที่ส่วนเหนืออากาศโลหกรรม มีรายละเอียด ดังนี้

4.6.1 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในอากาศโลหกรรม

รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในอากาศโลหกรรมที่เปลี่ยนไปสามารถพิจารณาจากผลการวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของสารหนูด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation Based Bulk-XANES (SR-Bulk-XANES) ที่ Beamline 1.1W สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ประเทศไทย โดยทำการวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างอากาศโลหกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ที่บริเวณข้าวแอนด์ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C2, P2, E1 และ P2-E1 เปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Reference Spectra) ของ อาร์เซไนต์ (As^{3+}) ในรูปอาร์เซนิกไดออกไซด์ (As_2O_3) และอาร์เซเนต (As^{5+}) ในรูปอาร์เซนิกเพนตะออกไซด์ (As_2O_5) รวมทั้งตัวอย่างอากาศโลหกรรมเริ่มต้น และตัวอย่างอากาศโลหกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ของชุดการทดลอง C1 โดยจากสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ใกล้ขอบพลังงานในชั้น K ของสารหนู (As K-Edge XANES Spectra) พบว่า สเปกตรัม First Derivative Absorbance ของอากาศโลหกรรมทุกตัวอย่างแสดงพีคหลัก (Major Peak) ที่มีค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (E_0) อยู่ในช่วง 11,865.20 ถึง 11,866.10 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีค่าต่ำกว่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอาร์เซไนต์ที่ 11,867.18 อิเล็กตรอนโวลต์ และอาร์เซเนตที่ 11,870.78 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.26(ก) และตารางที่ 4.15 ทั้งนี้ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งจะมีค่าต่างกันเมื่ออยู่ในสถานะออกซิเดชันที่ต่างกัน โดยค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอากาศโลหกรรมทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าอาร์เซไนต์และอาร์เซเนต แต่มีค่าสูงกว่าอาร์เซไนต์ (Arsenide, As^{-1}) ในรูปของอาร์เซโนไฟไรต์ ($FeAsS$) ที่ 11,865/11,865.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (Bia et al., 2017; Nieva et al., 2019; Wang et al., 2013) ทำให้สามารถระบุได้ว่าอากาศโลหกรรมมีองค์ประกอบของสารหนูที่มีสถานะออกซิเดชันเท่ากับ -1 ของอาร์เซโนไฟไรต์ร่วมอยู่ด้วย



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ใกล้ขอบพลังงานในชั้น K ของสารหนู (As K-Edge XANES Spectra); (ก) สเปกตรัม First Derivative Absorbance และ (ข) สเปกตรัม Normalized Absorbance ของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) อาร์เซเนต (As^{5+}) กากโลหะกรรมเริ่มต้น กากโลหะกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดการทดลอง C1 และกากโลหะกรรมที่บริเวณช่วงแอโนดเมื่อสิ้นสุดการทดลองของชุดการทดลอง C2, P2, E1 และ P2-E1

ตารางที่ 4.15 ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (E_0) และค่าพลังงานที่ยอดสูง (White Line) ของสารอ้างอิงและตัวอย่างกากโลหะกรรม

	รูปฟอร์มทางเคมี	E_0 (eV)	White Line (eV)
อาร์เซนไฟไรต์ (FeAsS)	As ¹⁻	11,865 ¹ /11,865.6 ^{3,4}	< 11,870 ^{1,2,4}
อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As ₂ O ₃)	As ³⁺	11,867.18	11,870.86
อาร์เซนิกเพนตะออกไซด์ (As ₂ O ₅)	As ⁵⁺	11,870.78	11,873.98
กากโลหะกรรมเริ่มต้น	-	11,865.20	11,868.73
กากโลหะกรรมเมื่อสิ้นสุดการทดลอง			
C1 (ตัวอย่างแบบผสมรวม)	-	11,865.30	11,869.26
C2 ที่บริเวณขั้วแอโนด	-	11,865.30	11,871.19
P2 ที่บริเวณขั้วแอโนด	-	11,866.10	11,873.55
E1 ที่บริเวณขั้วแอโนด	-	11,865.20	11,870.76
P2-E1 ที่บริเวณขั้วแอโนด	-	11,865.00	11,869.89

ที่มา: ¹ Wang et al. (2013), ² Root et al. (2015), ³ Bia et al. (2017) และ ⁴ Nieva et al. (2019)

นอกจากนี้ลักษณะเฉพาะ (Features) ของสเปกตรัม Normalized Absorbance ดังแสดงในรูป 4.26(ข) แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างกากโลหะกรรมส่วนใหญ่ประกอบด้วยพีคแรกที่มีค่าพลังงานต่ำกว่าพลังงานที่ยอดสูงของพีคในโครงสร้าง XANES หรือ White Line ของอาร์เซนไฟไรต์และอาร์เซนิต และพีคที่สองที่มีค่าพลังงานบริเวณ White Line ของอาร์เซนไฟไรต์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา ค่าพลังงานที่ White Line ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า กากโลหะกรรมเริ่มต้นและกากโลหะกรรมของชุดการทดลอง C1 มีค่าเท่ากับ 11,868.73 และ 11,869.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอาร์เซนไฟไรต์ที่มีค่าเท่ากับ 11,870.86 อิเล็กตรอนโวลต์ และอาร์เซนิตที่มีค่าเท่ากับ 11,873.98 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปปริติวซ์ของอาร์เซนไฟไรต์ โดยที่สารหนูบางส่วนถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซนไฟไรต์และอาร์เซนิต ในขณะที่กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลอง C2 ที่มีค่าพลังงานที่ White Line เท่ากับ 11,871.19 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม Normalized Absorbance อย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกากโลหะกรรมเริ่มต้นและกากโลหะกรรมของชุดการทดลอง C1 พบว่า พีคแรกเกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้พีคมีลักษณะกว้าง (Broad) โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้

กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดเกิดสภาวะกรดและสภาวะออกซิเดชัน ส่งผลให้อาร์เซนไนไฟไรต์เกิดการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชัน (Oxidative Dissolution) ปลดปล่อยเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) หลังจากนั้น Fe^{2+} และ H_3AsO_3 จะถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และไดไฮโดรเจนอาร์เซนเตไอออน (H_2AsO_4^-) ทำให้เกิดขึ้นของเฟอร์ริกอาร์เซนเตที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous Ferric Arsenate Layer) ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคอาร์เซนไนไฟไรต์ (Battistel et al., 2021; Henke & Hutchison, 2009; Nieva et al., 2019) ส่งผลให้เมื่ออาร์เซนไนไฟไรต์เกิดการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชันของจะสามารถตรวจพบสารหนูได้ทั้งในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{3-}) อาร์เซไนต์ (As^{3+}) และอาร์เซนเต (As^{5+}) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (Bia et al., 2017; Nieva et al., 2019; Wang et al., 2013)

การเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันเกิดขึ้นได้มากขึ้นในกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2 โดยเกิดการเลื่อนของพีคแรกไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้นจนทำให้เกิดการรวมตัวกับพีคที่สอง และทำให้ค่าพลังงานที่ White Line มีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุด เท่ากับ 11,873.55 อิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้พีคที่ปรากฏยังมีลักษณะแคบ (Sharp) และมีความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณของอาร์เซนเตที่เพิ่มขึ้นของกากโลหะกรรม และมีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลของกากโลหะกรรม (รูปที่ 4.10) ที่แสดงให้เห็นว่าสารหนูในรูปที่ละลายได้ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2 อยู่ในรูปที่มีประจุของ H_2AsO_4^- ซึ่งส่งผลให้เกิดการสะสมสารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ที่บริเวณขั้วแอโนดตลอดระยะเวลาการทดลอง 60 วัน โดย Wu et al. (2020) ได้ศึกษาผลของสารฟอสเฟตต่อการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชันของอาร์เซนไนไฟไรต์ พบว่า สารละลายที่มีการเติมสารฟอสเฟตมีความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการทดลอง หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่เนื่องจากสารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ถูกดูดซับด้วยสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ดังนั้น การสะสมของอาร์เซไนต์ไอออนที่บริเวณขั้วแอโนดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จึงส่งผลให้กากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2 มีค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์สูงกว่าตัวอย่างกากโลหะกรรมในชุดการทดลองอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 11,866.10 อิเล็กตรอนโวลต์ และสอดคล้องกับค่าพลังงานที่ White Line ที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 11,873.55 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานที่ White Line ของอาร์เซไนต์ที่มีค่าเท่ากับ 11,873.98 อิเล็กตรอนโวลต์

ในขณะที่ลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม Normalized Absorbance ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลอง E1 และ P2-E1 ที่มีการเติมสารอีดีทีเอ เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในลักษณะเดียวกัน โดยปรากฏให้เห็นพีคแรกที่มีลักษณะกว้างที่บริเวณใกล้เคียงกับค่าพลังงานที่ White Line ของกากโลหะกรรมเริ่มต้น (11,868.73 อิเล็กตรอนโวลต์) และกากโลหะกรรมของชุดการทดลอง C1 (11,869.26 อิเล็กตรอนโวลต์) และพีคที่สองที่บริเวณค่าพลังงานที่ White Line ของ

อาร์เซเนต (11,873.98 อิเล็กตรอนโวลต์) โดยมีความสูงของพีคที่สองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าพลังงานที่ White Line ของกากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนดของชุดการทดลอง E1 และ P2-E1 ที่มีค่าเท่ากับ 11,870.76 และ 11,869.89 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับ ค่าพลังงานที่ White Line ของอาร์เซไนต์ ที่มีค่าเท่ากับ 11,870.86 อิเล็กตรอนโวลต์ โดย Wang et al. (2018b) ได้ศึกษาผลของสารอีตีทีเอต่อรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูที่เกิดจากการชะละลาย ภายใต้สภาวะออกซิเดชันของอาร์เซโนไฟไรต์ พบว่า สารอีตีทีเอสามารถช่วยลดการเกิดสารประกอบ เพอร์ริคออกไซด์ได้จากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเพอร์ริสไอออน อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่ลดลง ของเพอร์ริสไอออนซึ่งมีบทบาทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซไนต์ ส่งผลให้อาร์เซไนต์ที่ถูก ปลดปล่อยออกมาจากการชะละลายภายใต้สภาวะออกซิเดชันของอาร์เซโนไฟไรต์ถูกออกซิไดส์ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนตได้ลดลง

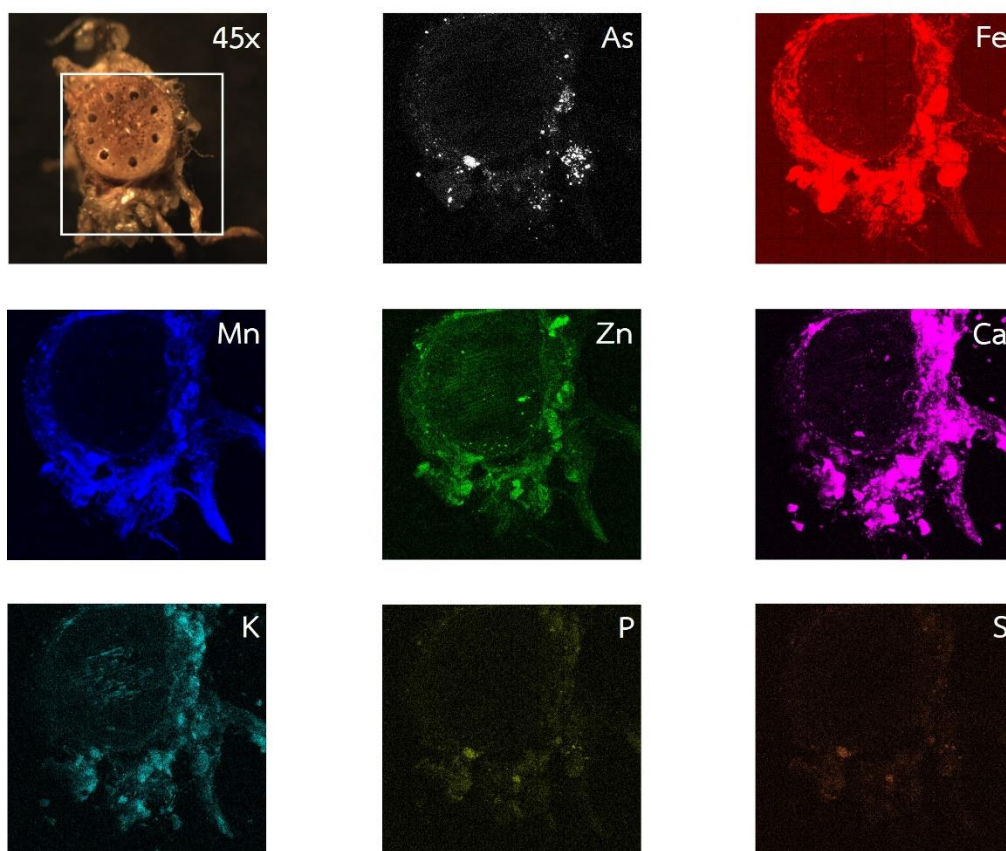
โดยจากสเปกตรัม First Derivative Absorbance (รูปที่ 4.26(ก)) และสเปกตรัม Normalized Absorbance (รูปที่ 4.26(ข)) แสดงให้เห็นว่า สารหนูในตัวอย่างกากโลหะกรรม ประกอบด้วยอาร์เซไนต์ (As^{1-}) อาร์เซไนต์ (As^{3+}) และอาร์เซเนต (As^{3+}) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์และค่าพลังงานที่ White Line บ่งชี้ถึงสัดส่วนที่ เพิ่มขึ้นของสารหนูที่มีสถานะออกซิเดชันสูงกว่า (Bia et al., 2017; Nieva et al., 2019; Root et al., 2015; Wang et al., 2013) โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากากโลหะกรรมที่บริเวณขั้วแอโนด ของชุดการทดลอง P2 ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซเนตได้มากกว่ากากโลหะกรรมในชุด การทดลองอื่น

4.6.2 การเคลื่อนย้ายและการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระ

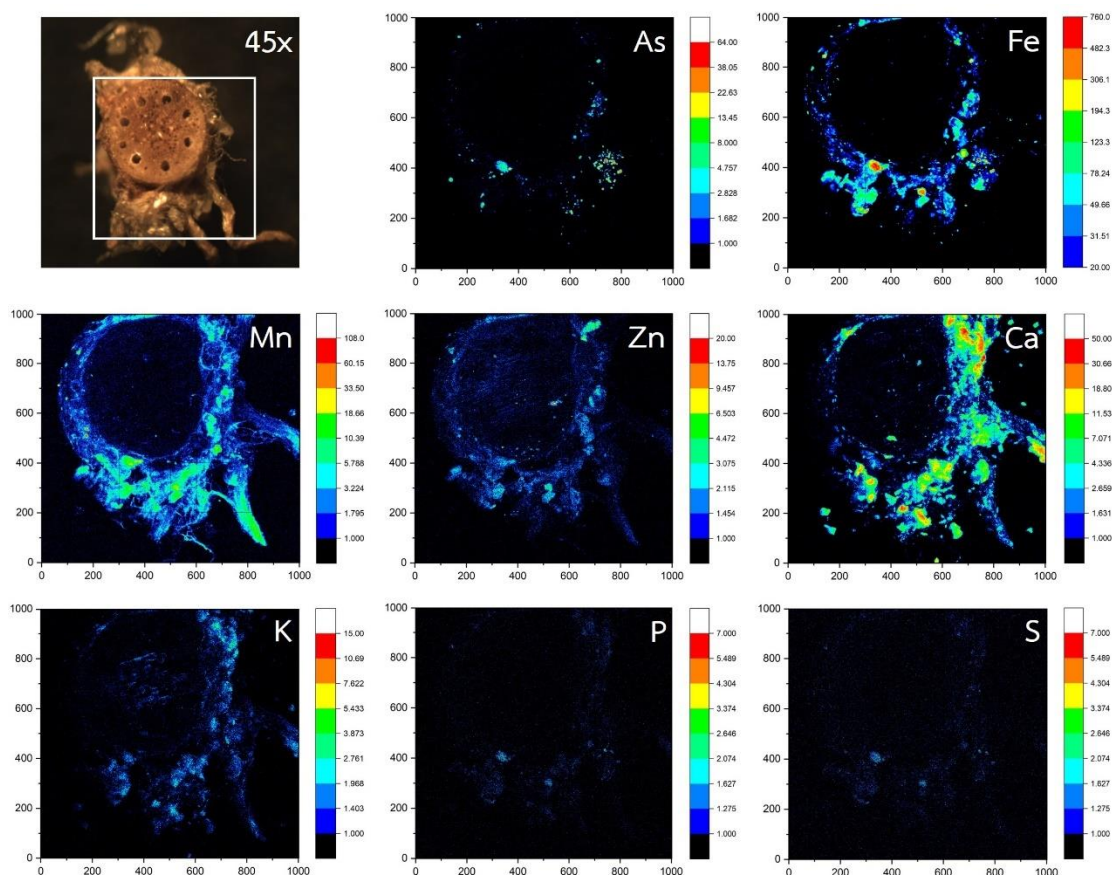
ตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวาง (Cross Section) ในส่วนของราก ลำต้น และใบ ของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ในชุดการทดลอง P2 ซึ่งมีระดับความเข้มข้น ของสารหนูส่วนเหนือกากโลหะกรรม (รูปที่ 4.10) และปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกาก โลหะกรรม (รูปที่ 4.11) สูงที่สุด เท่ากับ 2.62 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.0240 ± 0.0017 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ถูก นำมาวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุอื่นๆ ในระดับเนื้อเยื่อด้วยเทคนิค Synchrotron Based Micro-XRF Imaging (SR- μ -XRF Imaging) ที่ Beamline 23A ณ Taiwan Photon Source (TPS) ประเทศไต้หวัน โดยใช้แสงซินโครตรอนในช่วงของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงาน ครอบคลุมอยู่ในช่วง 4 - 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) และได้กำหนดให้มีการให้แสงที่ตำแหน่งของ ตัวอย่าง หรือที่จุดโฟกัส (Focused Spot Size) เท่ากับ 1,000 นาโนเมตร หรือ 1 ไมโครเมตร ในการ วิเคราะห์ตัวอย่างที่ขนาดพื้นที่ เท่ากับ 1 ตารางมิลลิเมตร (กว้าง 1 มิลลิเมตร และยาว 1 มิลลิเมตร)

และทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วยโปรแกรม XNP View (XNP View Software Version 0.55) ซึ่ง จะแสดงการสะสมและการกระจายตัวของธาตุแบบ 2 มิติ (2D) และโปรแกรม OriginPro (OriginPro Software Version 9.4) ซึ่งจะแสดงการสะสมและการกระจายตัวของธาตุแบบ 3 มิติ (3D)

โดยจากผลการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุอื่นๆ ใน ส่วนของราก (Root) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่า สารหนูและธาตุอื่นๆ เกิดการสะสมและ การกระจายตัวส่วนใหญ่ที่บริเวณเดียวกัน โดยที่สารหนู (As) และเหล็ก (Fe) มีการสะสมและการ กระจายตัวส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณขนราก (Root Hair) และเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) ในขณะที่แมงกานีส (Mn, สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ซึ่งเกิดการสะสมในรากได้น้อยกว่าเหล็ก สามารถที่จะเกิดการกระจายตัวเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นถัดไปได้ มากกว่าเหล็กและสารหนู ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Hammond et al. (2018) ที่ พบว่า กระจินหางกระรอก (*Prosopis juliflora*) ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูจาก อาร์เซนไฟไรต์ (FeAsS) เกิดการสะสมและการกระจายตัวของเหล็กในรูปของสารประกอบเฟอร์ริก (Ferric Compound) ที่เปลือกกราก (Bark) และเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) ส่งผลให้เกิด ชั้นของเหล็กเคลือบอยู่บริเวณผิวของรากพืช (Iron Plaque) และทำให้สารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ อาร์เซนเตที่ถูกลดด้วยสารประกอบเฟอร์ริก และเกิดการสะสมและการกระจายตัวอยู่ในบริเวณ เดียวกันกับเหล็ก นอกจากนี้ยังพบการสะสมและการกระจายตัวของโพแทสเซียมและซัลเฟอร์ใน เนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์ (Cortex) และสตีล (Stele) ได้มากกว่าเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส ในขณะที่ รายงานการวิจัยของ Kashiwabara et al. (2021) พบว่า กูดหมาก (*Pteris vittata*) ซึ่งเป็นพืชที่มี ความสามารถในการดูดซับและสะสมสารหนูได้ในปริมาณมาก (Arsenic Hyperaccumulator) จะ เกิดกลไกการดูดซับและสะสมสารหนูผ่านเส้นทางซิมพลาสติก (Symplastic Pathway) ที่บริเวณของ เนื้อเยื่อเจริญ (Meristematic Zone) ที่บริเวณปลายราก (Root Tip) และเส้นทางอะพลาสติก (Apoplatic Pathway) ในบริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ (Maturation Zone) โดยสามารถพบการ สะสมและการกระจายตัวของสารหนูและโพแทสเซียมในบริเวณที่เจริญเติบโตเต็มที่ทั้งในเนื้อเยื่อ ชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) คอร์เทกซ์ (Cortex) เอนโดเดอร์มิส (Endodermis) และสตีล (Stele) ซึ่ง มีสาเหตุมาจากการที่พืชใช้โพแทสเซียมไอออน (K^+) ในการสร้างสมดุลของไอออนภายในเซลล์จาก การสะสมสารหนูในรูปของไอออนลบ นอกจากนี้ยังพบการสะสมและการกระจายตัวของธาตุอาหารที่ จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ โพแทสเซียม แมงกานีส เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ที่บริเวณ ขนราก



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 45 เท่า (45x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging



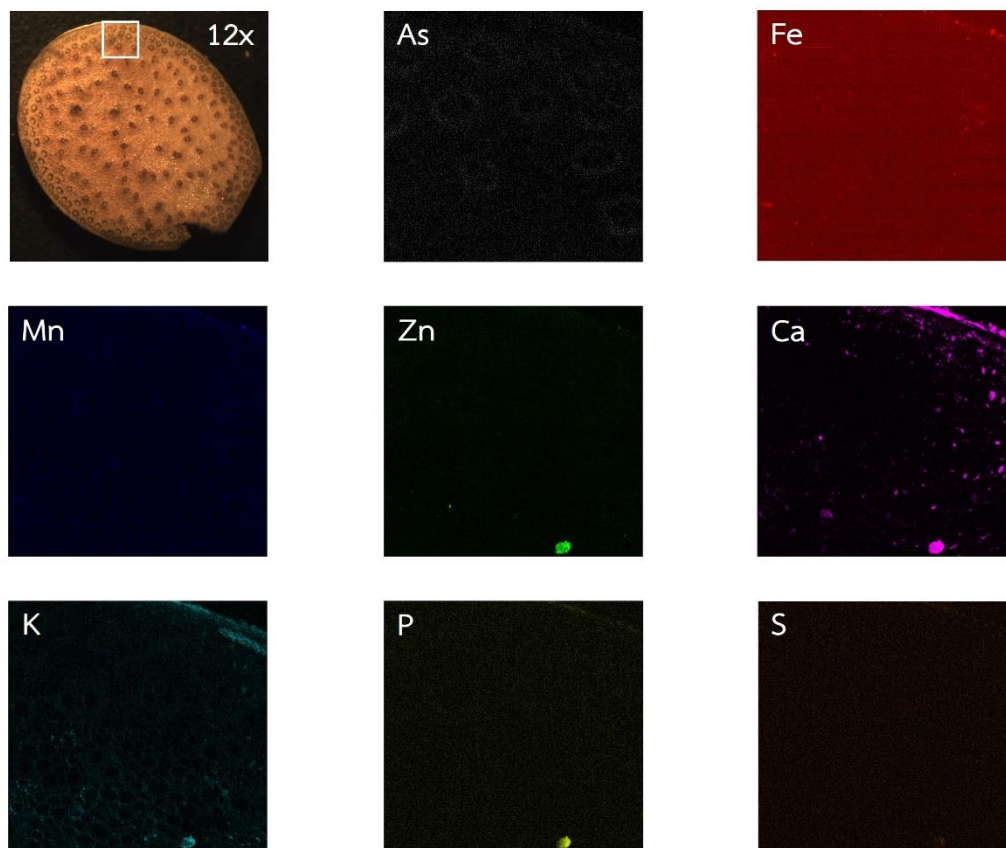
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 45 เท่า (45x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging

หมายเหตุ: แถบสีด้านข้างที่แตกต่างกันในแต่ละธาตุแสดงถึงความเข้ม (Intensity) ของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่แตกต่างกัน

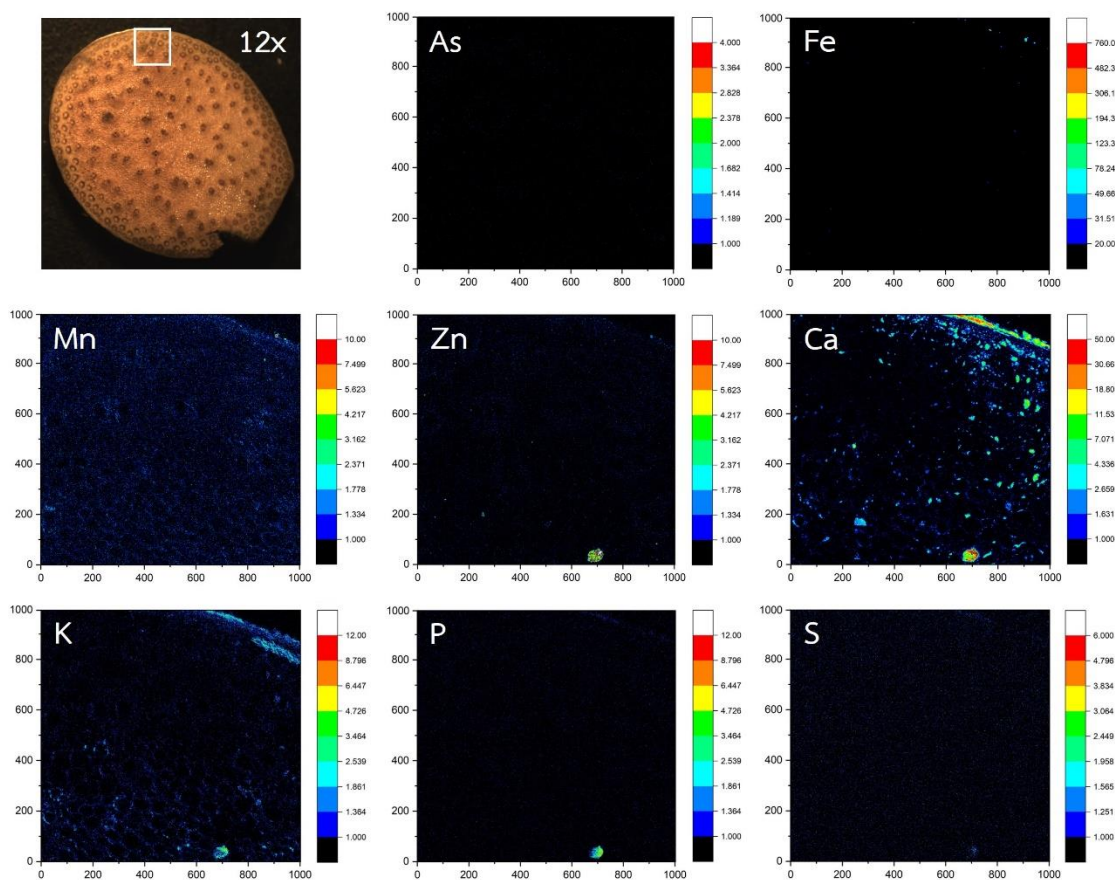
นอกจากนี้การสะสมและการกระจายตัวของซิลเฟอร์จากเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิสซึ่งเป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดไปยังเนื้อเยื่อชั้นถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงกลไกการลดความเป็นพิษของสารหนูที่เกิดขึ้นในรากพืชด้วยการเปลี่ยนสารหนูในรูปของอาร์เซเนต (As^{5+}) ให้อยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) โดยใช้กลูตาไธโอน (Glutathione (GSH), $C_{10}H_{17}N_3O_6S$) เป็นตัวรีดิวซ์ (Farooq et al., 2016; Han et al., 2017; Roy et al., 2015; Souri et al., 2017) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Hammond et al. (2018) ที่พบว่า สารหนูที่สะสมและกระจายตัวอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์และสตีลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ที่จับอยู่กับซิลไฟด์ ($As^{3+}-S$)

สำหรับการสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุอื่นๆ ในส่วนของลำต้น (Stem) ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่า สารหนูเกิดการสะสมและการกระจายตัวอยู่ที่บริเวณบันเดิลชีท (Bundle Sheath) ที่เรียงตัวอยู่โดยรอบมัดท่อลำเลียง (Vascular Bundle) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนรากขึ้นสู่ส่วนเหนืออากาศของลำต้นโดยผ่านทางอะโพลลาสติก (Apoplastic Pathway) ผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) อย่างไรก็ตามพบว่า สารหนูในส่วนของลำต้นมีปริมาณการสะสมและการกระจายตัวต่ำกว่าธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ เหล็ก สังกะสี แมงกานีส แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และซิลเฟอร์ ที่มีการสะสมและการกระจายตัวอยู่ทั้งในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) เนื้อเยื่อพื้น (Ground Tissue) และช่องว่างระหว่างเซลล์ โดยความแตกต่างของการสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชที่เกิดขึ้นในส่วนของลำต้นเกี่ยวข้องกับบันเดิลชีทที่นอกจากจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อลำเลียงแล้ว ยังมีบทบาทต่อการลำเลียงทางด้านข้าง (Lateral Transport) ในพืช โดยผนังเซลล์ (Cell Wall) ของบันเดิลชีทที่มีโครงสร้างคล้ายกับแถบแคสพาเรียน (Caspasian Strip) ส่งผลทำให้บันเดิลชีทมีบทบาทต่อการไหลเข้า-ออกของของเหลวในท่อลำเลียงน้ำ (Xylem Sap) และการเคลื่อนย้ายไอออนที่ขนส่งด้วยเส้นทางอะโพลลาสติก โดยทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นไอออนแบบเลือกผ่าน (Ion-selective Barrier) ระหว่างท่อลำเลียง และเนื้อเยื่อโดยรอบ (Aubry et al., 2019; Shatil-Cohen et al., 2011; Shatil-Cohen & Moshelion, 2012)

ในขณะที่การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุอื่นๆ ในส่วนของใบ (Leaf) ที่บริเวณเส้นกลางใบ (Midrib) ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32 พบว่า สารหนูส่วนใหญ่ยังคงเกิดการสะสมและการกระจายตัวอยู่ที่บริเวณบันเดิลชีท ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายสารหนูด้วยเส้นทางอะโพลลาสติกผ่านทางท่อลำเลียงน้ำที่เกิดขึ้นในส่วนของลำต้น และมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Lei et al. (2008) ที่พบว่า ต้นวีโอลา (*Viola principis* H. de Boiss) เกิดการสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและตะกั่วในเส้นกลางใบ (Midrib) สูงที่สุดที่บริเวณบันเดิลชีท ซึ่งต่างจากธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ เหล็ก สังกะสี แมงกานีส แคลเซียม โพแทสเซียม

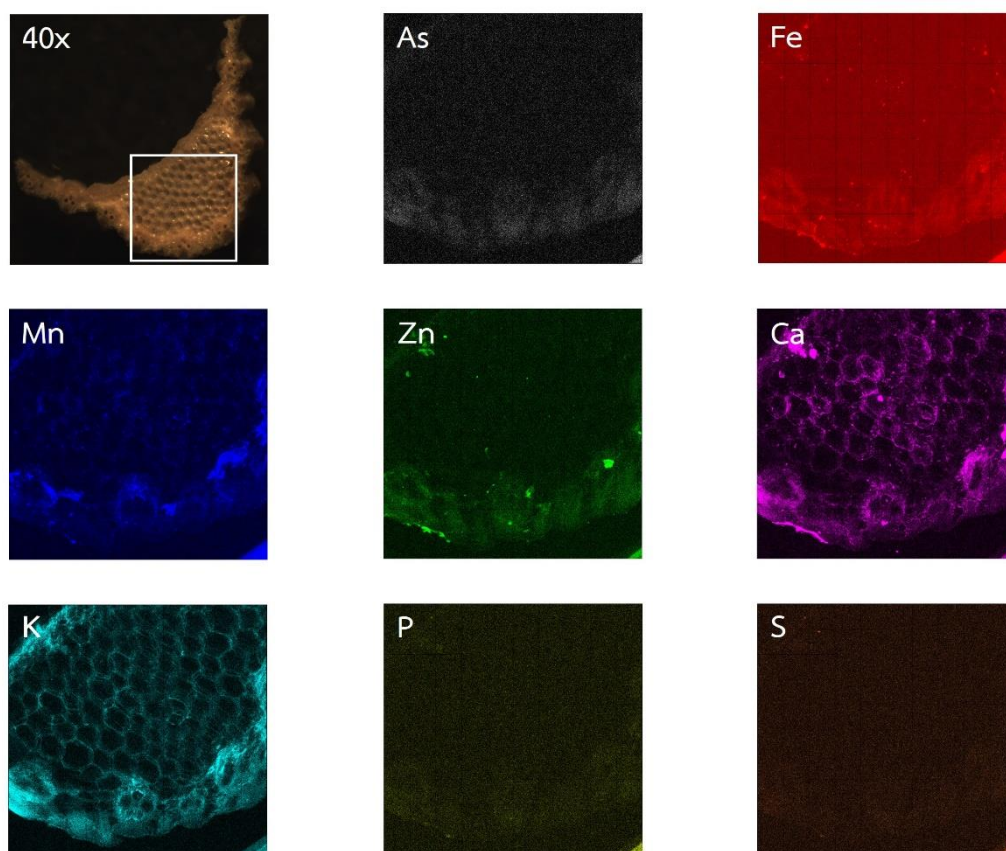


รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 12 เท่า (12x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนราก (Root) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging

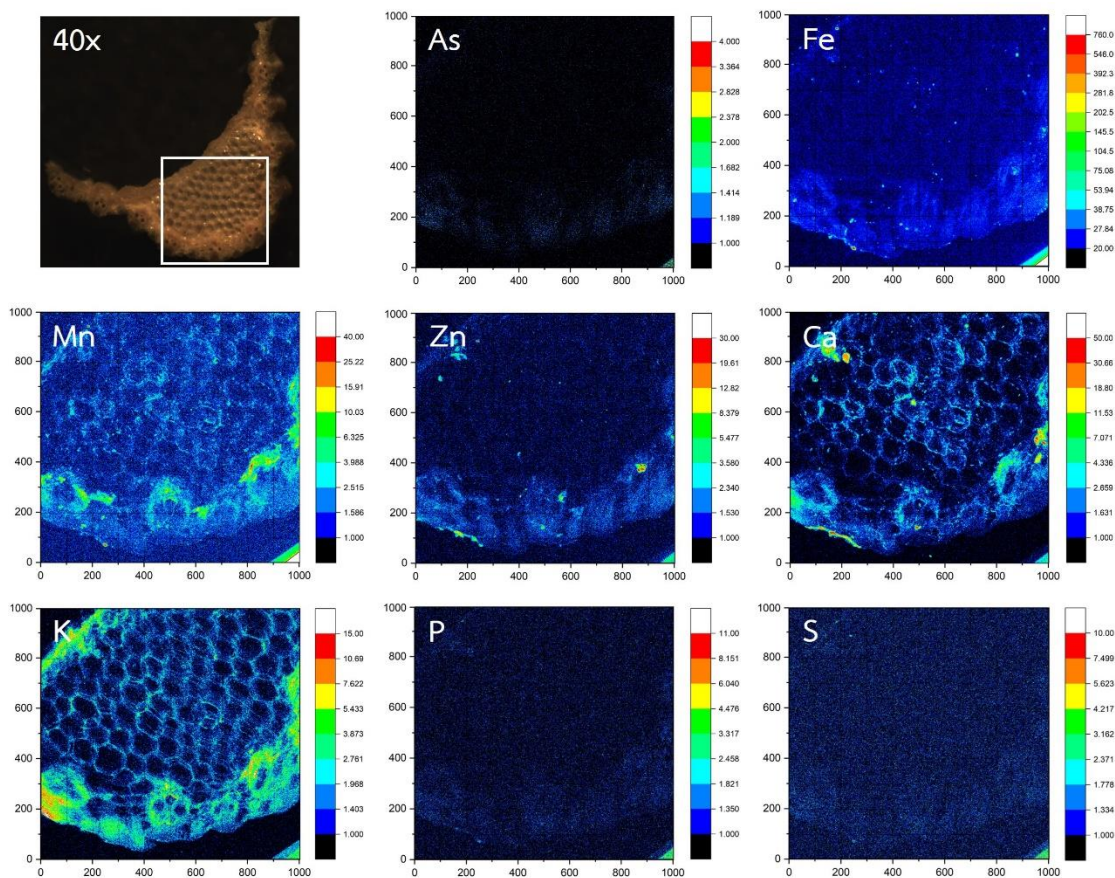


รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 12 เท่า (12x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนลำต้น (Stem) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่ที่สเลียมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging

หมายเหตุ: แถบสีด้านข้างที่แตกต่างกันในแต่ละธาตุแสดงถึงความเข้ม (Intensity) ของสัญญาณ ฟลูออเรสเซนซ์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (40x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนใบ (Leaf) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 2 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging



รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (40x) ของตัวอย่างเนื้อเยื่อตัดตามขวางในส่วนใบ (Leaf) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และการสะสมและการกระจายตัวแบบ 3 มิติ ของสารหนู (As) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในพื้นที่สี่เหลี่ยมกรอบสีขาวที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SR- μ -XRF Imaging

หมายเหตุ: แถบสีด้านข้างที่แตกต่างกันในแต่ละธาตุแสดงถึงความเข้ม (Intensity) ของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่แตกต่างกัน

ฟอสฟอรัส และซิลิเคต ที่เกิดการสะสมและการกระจายตัวอยู่ที่บริเวณบันเดิลชีท มัดท่อลำเลียง และเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ (Mesophyll) นอกจากนี้ยัง พบว่า สารหนูเกิดการสะสมและการกระจายตัวในเนื้อเยื่อชั้นเอพิเตอร์มิสที่ผิวใบด้านล่าง (Abaxial) ได้มากกว่าที่ผิวใบด้านบน (Adaxial) ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่บันเดิลชีทแสดงบทบาทในการเป็นตัวขวางกั้นไอออนแบบเลือกผ่านระหว่างท่อลำเลียงและเนื้อเยื่อโดยรอบ ทำให้สารหนูที่เคลื่อนย้ายจากลำต้นขึ้นสู่ใบผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ไม่สามารถกระจายตัวไปยังเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ได้ โดยการสะสมของสารหนูในบริเวณท่อลำเลียงน้ำที่ผิวใบด้านล่างที่ไม่เกิดการกระจายตัวไปยังเนื้อเยื่ออื่นๆ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่พืชจะขับสารหนูออกทางต่อมคายน้ำ (Hydathode) ที่อยู่บริเวณปลายของเส้นใบ (Vein Tip) ด้วยการคายน้ำในรูปของหยดน้ำ (Guttation) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Datta et al. (2017) ที่พบว่า สารหนูเกิดการกระจายตัวไปตามการไหลของน้ำในเส้นใบ (Veins) ซึ่งทำให้การสะสมของสารหนูในใบย่อย (Pinna) ของกูดหมาก (*Pteris vittata*) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบใบ (Margin) และมีปริมาณการสะสมสูงในบริเวณปลายของใบย่อย (Pinna Tip) โดยที่ปลายใบ (Apex) จะเกิดการสะสมของสารหนูที่เส้นกลางใบ (Midrib) และเกิดการกระจายตัวไปยังผิวใบด้านบน (Adaxial) ได้น้อยกว่าผิวใบด้านล่าง (Abaxial) ที่มีต่อมคายน้ำ (Hydathode) และปากใบ (Stomata) อยู่เป็นจำนวนมาก และสามารถทำให้สารหนูถูกขับออกทางต่อมคายน้ำและปากใบได้ โดยการเคลื่อนย้ายของสารหนูในใบย่อยของกูดหมากเกี่ยวข้องกับการขนส่งด้วยเส้นทางอะพอพลาสติคมากกว่าการนำสารหนูไปสะสมอยู่ในแวคคิวโอลจากการขนส่งด้วยเส้นทางซิมพลาสติค อย่างไรก็ตาม การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูปริมาณมากที่บริเวณขอบใบและบริเวณส่วนปลายของใบส่งผลทำให้ใบพืชเกิดภาวะการตายของเนื้อเยื่อ (Necrosis) ในบริเวณดังกล่าว และอาจเป็นสาเหตุทำให้สารหนูในรูปของอาร์เซนไนต์ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอาร์เซนเตตได้ โดยจากรายงานการวิจัยของ Hokura et al. (2006) ที่พบว่า ใบย่อย (Pinna) ของกูดหมาก (*Pteris vittata*) จะเกิดการสะสมและการกระจายตัวของสารหนูปริมาณมากที่บริเวณขอบใบและเส้นใบเมื่อเข้าสู่ระยะใบแก่ (Old Pinna) ซึ่งทำให้ที่บริเวณขอบใบเกิดภาวะใบแห้ง (Browning) ส่งผลทำให้สารหนูในรูปของอาร์เซนไนต์ถูกออกซิไดส์และเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของอาร์เซนเตต นอกจากนี้ยังพบการสะสมและการกระจายตัวของโพแทสเซียมในใบย่อยในบริเวณที่ไม่เกิดภาวะใบแห้งที่มีความสัมพันธ์กับสารหนูในรูปของอาร์เซนเตตในทุกระยะของการเจริญเติบโตของกูดหมาก เนื่องจากกูดหมากใช้โพแทสเซียมไอออนในการสร้างสมดุลไอออนภายในเซลล์ที่เกิดจากการสะสมไอออนลบของอาร์เซนเตตไอออน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในการทดลองครั้งนี้ที่ พบว่า โพแทสเซียมเกิดการสะสมในบริเวณเดียวกันกับธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชอื่นๆ แต่เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะการสะสมโพแทสเซียมปริมาณมากที่บริเวณบันเดิลชีทและผิวใบด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการสะสมของสารหนู

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระด้วย จลนศาสตร์ไฟฟ้าและสารช่วยเร่งในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับและสะสมสารหนู แบ่งการทดลอง ออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวัน 2) การทดลองการ เคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหกรรม 3) การทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอินทรีย์เอในการบำบัด สารหนูปนเปื้อนในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า และ 4) การศึกษา การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้า ร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1.1 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวัน

1) ผลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูในตัวกลางวันภายใต้อิทธิพลของ สนามไฟฟ้า ได้แก่ 1) ขนาดของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (1 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร) 2) ชนิดของ ขั้วแอโนดที่แตกต่างกัน (ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และขั้วไฟฟ้าสแตนเลสเกรด 316L) และ 3) ภาวะทดลองที่ แตกต่างกัน (ภาวะทดลองแบบทรงกลมและแบบทรงสี่เหลี่ยม) ถูกนำมาศึกษาภายใต้อิทธิพลของ สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal Two-Dimensional Electrode Configuration) โดยจากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ขนาดสนามไฟฟ้าที่ เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ ปนเปื้อน สารหนูของชุดการทดลองขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดการทดลองที่มีการ ติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสทั้งในภาวะทดลองแบบทรงกลมและแบบทรงสี่เหลี่ยม อย่างไรก็ตาม ความ เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงของขั้วไฟฟ้าสแตนเลส และพื้นที่ส่วนใหญ่ที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของ สนามไฟฟ้าในภาวะทดลองแบบทรงกลม ทำให้มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ และภาวะทดลองแบบทรงสี่เหลี่ยม โดยผลการทดลองที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ภายใต้ อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของสารหนูในรูปอาร์เซนเตอออนในแนวราบไปยังบริเวณขั้วแอโนดด้วย กลไกอิเล็กโทรไมเกรชัน และในแนวตั้งขึ้นไปสะสมอยู่ในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูจากการระเหยของน้ำ และก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด

2) ผลของสารช่วยเร่งต่อการเคลื่อนที่ของสารหนู

ผลของสารช่วยเร่ง 2 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 1) สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ระดับความเข้มข้นฟอสเฟต เท่ากับ 25, 50 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2) สารละลายอีดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรต ที่ระดับความเข้มข้นอีดีทีเอ เท่ากับ 25, 50 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ที่ทำการทดลองในสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ในภาชนะทดลองแบบทรงกลม โดยจากผลการศึกษารูปได้ว่าการเติมสารฟอสเฟตที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับอาร์เนตส่งผลให้ระดับความเข้มข้นสารหนูในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าสูงกว่าชั้นที่ปนเปื้อนสารหนู โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูในชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าสูงที่สุดเมื่อระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟต เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การเติมสารอีดีทีเอที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และมีมวลโมเลกุลสูงส่งผลให้ระดับความเข้มข้นสารหนูในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าสูงกว่าชั้นที่ไม่ปนเปื้อนสารหนู โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูในชั้นที่ปนเปื้อนสารหนูมีค่าสูงที่สุดเมื่อระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอ เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูในชั้นที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนสารหนูมีแนวโน้มใกล้เคียงกับชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง

5.1.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในภากลอการกรรม

ผลของสารช่วยเร่งที่แตกต่างกัน คือ น้ำปราศจากไอออน (ชุดการทดลองควบคุม) สารละลายฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดการทดลองสารฟอสเฟต) สารละลายอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ) และสารผสมระหว่างสารละลายฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (ชุดการทดลองสารผสม) ต่อการเคลื่อนที่ของสารหนูภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ที่ทำการทดลองในสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่มีการติดตั้งขั้วไฟฟ้าสแตนเลสแบบ 2 มิติ ในรูปแบบหกเหลี่ยม ในภาชนะทดลองแบบทรงกลม จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลองควบคุมมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าต่ำกว่าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าและบริเวณขั้วแคโทด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสภาวะกรดที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วแอโนด และส่งผลทำให้สารหนูสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณขั้วแคโทดได้

ด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่การเติมสารฟอสเฟตซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบกับอาร์เซเนตไอออน และมีสมบัติในการเป็นสารบัฟเฟอร์ที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี ส่งผลทำให้สารหนูในชุดการทดลองสารฟอสเฟตเกิดการเคลื่อนที่มายังบริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกรงชันได้เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณขั้วแอโนดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 72 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าที่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าและบริเวณขั้วแคโทด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่กากโลหะกรรมซึ่งมีระดับความเข้มข้นของโลหะไอออนบวกสูง โดยเฉพาะเหล็กที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดในกากโลหะกรรม (26,942.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารอีทีที่เอต่อโลหะไอออนบวกในชุดการทดลองสารอีทีเอมีค่าต่ำกว่า 1 ต่อ 1 และทำให้ระดับความเข้มข้นของสารหนูในชุดการทดลองสารอีทีเอมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง อย่างไรก็ตามการเติมสารอีทีเอแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยับยั้งการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแคโทดตามการไหลสุทธิของน้ำด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ของอาร์เซเนตไอออนได้ นอกจากนี้สารอีทีเอยังมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของสารหนูในชุดการทดลองสารผสมได้มากกว่าสารฟอสเฟต โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูในชุดการทดลองสารผสมมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชุดการทดลองสารอีทีเอ

5.1.3 การทดลองการเติมสารช่วยเร่งในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ผลของสารช่วยเร่งต่อการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 8 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองควบคุม 1 (C1) ที่ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าและไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง ชุดการทดลองควบคุม 2 (C2) ที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่ไม่มีการเติมสารช่วยเร่ง ชุดการทดลองสารฟอสเฟต ที่มีการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และการเติมสารฟอสเฟต ที่ระดับ 0.7 (P1), 1.4 (P2) และ 2.8 (P3) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองสารอีทีเอ ที่มีการให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และการเติมสารอีทีเอที่ระดับ 2.5 (E1), 5 (E2) และ 10 (E3) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม โดยจากผลการศึกษา พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1 มีปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในส่วนใต้กากโลหะกรรม แตกต่างจากหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C2 ที่มีแนวโน้มปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน หญ้าเนเปียร์แคระมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรมสูงกว่าชุดการทดลอง C1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารฟอสเฟตและสารอีทีเอ

ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนเหนือกากโลหกรรมได้เพิ่มขึ้น โดยสภาวะการทดลองในชุดการทดลอง P2 ส่งผลให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน หญ้าเนเปียร์แคระส่วนเหนือกากโลหกรรมมีระดับความเข้มข้นของสารหนูและปริมาณของสารหนูสะสมสูงสุด เท่ากับ 2.62 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.0240 ± 0.0017 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่สภาวะการทดลองในชุดการทดลอง E1 ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน หญ้าเนเปียร์แคระส่วนเหนือกากโลหกรรมมีระดับความเข้มข้นของสารหนูสูงกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 2.27 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม คิดเป็นปริมาณของสารหนูสะสมเท่ากับ 0.0175 ± 0.0004 มิลลิกรัม โดยระดับความเข้มข้นของสารหนูส่วนเหนือกากโลหกรรมของหญ้าเนเปียร์แคระที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง P2 และ E1 มีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง C1 คิดเป็น 2 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ และเป็นสาเหตุทำให้หญ้าเนเปียร์แคระแสดงความเป็นพิษได้เพิ่มขึ้น โดยมีมวลชีวภาพ อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C1 และ C2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม การให้สนามไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการเติมสารผสมระหว่างสารฟอสเฟตที่ระดับ 1.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และสารอีทีทีเอที่ระดับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรในชุดการทดลอง P2-E1 ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระแสดงความเป็นพิษได้เพิ่มขึ้น โดยมีมวลชีวภาพทั้งในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรม อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ ต่ำกว่าหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1, C2, P2 และ E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่เวลา 30 วัน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน และเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณของสารหนูสะสมทั้งในส่วนใต้กากโลหกรรมและส่วนเหนือกากโลหกรรมมีค่าต่ำกว่าหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง C1, C2, P2 และ E1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.1.4 การศึกษาการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของสารหนูในหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกกระตุ้นด้วยจลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการเติมสารช่วยเร่ง

ผลการวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของสารหนูในกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ด้วยเทคนิค Synchrotron Radiation Based Bulk-XANES (SR-Bulk-XANES) พบว่า สารหนูในกากโลหกรรมเริ่มต้นอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{-1}) อาร์เซไนต์ (As^{3+}) และอาร์เซเนต (As^{5+}) โดยสารหนูในกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์ในชุดการทดลอง P2 มีค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (E_0) เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น นอกจากนี้ยังมีค่าพลังงานที่ White Line ใกล้เคียงกับอาร์เซนิกเพนตะออกไซด์ (As_2O_5) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของ

อาร์เซนิตที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากาโลทรรวมในชุดการทดลองอื่น สอดคล้องกับปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูในชุดการทดลอง P2 ที่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น

สำหรับรูปทางเคมีของสารหนูในกาโลทรรวมที่บริเวณข้อแวนดในชุดการทดลอง P2 ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสาเหตุทำให้หญ้าเนเปียร์แคระดูดตั้งและสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้หญ้าเนเปียร์แคระเกิดการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กาโลทรรวมขึ้นสู่ส่วนเหนือกาโลทรรวมเพื่อลดความเป็นพิษต่อพืชที่เกิดขึ้น นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของสารหนูและธาตุอื่นๆ ในระดับเนื้อเยื่อด้วยเทคนิค Synchrotron Based Micro-XRF Imaging (SR- μ -XRF Imaging) สรุปได้ว่า สารหนูและเหล็กเกิดการสะสมและการกระจายตัวส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณเดียวกัน คือ ขนราก (Root Hair) และเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) โดยการสะสมและการกระจายตัวของซัลเฟอร์ที่พบในรากของหญ้าเนเปียร์แคระแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสารหนูในรูปของอาร์เซนิต (As^{5+}) ให้อยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) โดยใช้กลูตาไธโอน (Glutathione, GSH) เป็นตัวรีดิวซ์ จากนั้นจึงเกิดการเคลื่อนย้ายขึ้นสู่ส่วนเหนือกาโลทรรวมผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) และสามารถทำให้เกิดการสะสมของสารหนูได้ที่บริเวณบันเดิลชีท (Bundle Sheath) โดยไม่เกิดการกระจายตัวไปยังเนื้อเยื่อโดยรอบได้ทั้งในส่วนของลำต้นและใบ นอกจากนี้สารหนูที่เกิดการสะสมอยู่ในส่วนของใบยังสามารถเกิดการกระจายตัวไปยังบริเวณใกล้เคียง โดยเฉพาะที่ผิวใบด้านล่าง (Abaxial) ซึ่งมีต่อมคายน้ำ (Hydathode) และปากใบ (Stomata) อยู่เป็นจำนวนมาก และมีความสอดคล้องกับการสะสมและการกระจายตัวของโพแทสเซียม ทำให้มีความเป็นไปได้ที่หญ้าเนเปียร์จะใช้โพแทสเซียมไอออนในการสร้างสมดุลไอออนภายในเซลล์ที่เกิดจากการสะสมไอออนลบของอาร์เซนิตไอออนที่บริเวณใบ และอาจจะเกิดการขับสารหนูออกทางต่อมคายน้ำที่อยู่บริเวณปลายของเส้นใบ (Vein Tip) ด้วยการคายน้ำในรูปของหยดน้ำ (Guttation)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในพื้นที่ปนเปื้อนจริงภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ในระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งศึกษารูปแบบการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปนเปื้อนจริงที่มีความเหมาะสมต่อการดำเนินการและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวหญ้าเนเปียร์แคระเพื่อนำชีวมวลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ ต่ออัตราการงอกใหม่ มวลชีวภาพ และประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูของหญ้าเนเปียร์แคระในฤดูกาลถัดไป

3) ควรมีการศึกษานำหญ้าเนเปียร์แคระที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของวัตถุดิบในการผลิตพลังงานเพื่อหลีกเลี่ยงการถ่ายทอดตามลำดับของสารหนูผ่านทางห่วงโซ่อาหาร

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (1 ed.). นครราชสีมา: ศูนย์บริการข้อมูลโครงการศึกษาวิจัยต้นแบบวิสาหกิจชุมชนพลังงานสีเขียวจากพืชพลังงาน (ก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน).
- การประปานครหลวง. (2560). มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (อินเทอร์เน็ต). กรุงเทพฯ (เข้าถึงเมื่อ 19 ตุลาคม 2564). เข้าถึงได้จาก https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=33082
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา. (2557). การบำบัดสารหนูโดยวิธีพืชบำบัดในดินและตะกอนดิน: กลไกและการจัดการ. วารสารวิทยาศาสตร์ มช., 42(4), 730-747.
- พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2558a). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2558b). การฟื้นฟูพื้นที่เหมืองปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. In จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, อภิสสิทธิ์ ซาล่า, & ทรงวุฒิ อาทิตยทอง (Eds.), เหมืองสีเขียวเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน (pp. 303-330). กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรลดา เจริญมิตร. (2554). การแปลงและการขจัดพิษสารประกอบสารหนูโดยจุลินทรีย์ดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีวิทยา). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. (2537, 24 กุมภาพันธ์). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 111 ตอนที่ 16 ง.
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. (2564, 11 มีนาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 138 ตอนพิเศษ 54 ง.
- วันทนา คล้ายสุบรรณ. (2549). เทคนิคการทดลอง *X-ray Absorption Spectroscopy* ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม (1 ed.). นครราชสีมา: บริษัท สมบูรณ์การพิมพ์ จำกัด.
- ศีลาลุศ ดำรงศิริ. (2562). กระบวนการบำบัดโดยจลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic Treatment). In พันธวัศ สัมพันธ์พานิช & เพ็ญรัตน์ จันทร์ภักดิ์ (Eds.), การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนสารหนูจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ (1 ed., pp. 191-206). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). การให้บริการสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (อินเทอร์เน็ต). นครราชสีมา (เข้าถึงเมื่อ 20 ตุลาคม 2564). เข้าถึงได้จาก <http://dev.slri.or.th/slri/application/emediamedia/emediamedia.php>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). (2562). แสงซินโครตรอน...แสงไขความลับ (1 ed.). นครราชสีมา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน).
- สายสวาท สีลอ. (2554). เทคนิคการวิเคราะห์สารหนูและพลวงปริมาณน้อยโดยวิธีไฮโดรด์เจนเนอเรชัน (1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี, กรมทรัพยากรธรณี.
- อุดมศักดิ์ บุญมีรติ, & พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2563). การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและจลนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน. วารสารสิ่งแวดล้อม, 24(4). Retrieved from <http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6136/288>

ภาษาอังกฤษ

- Abad-Valle, P., Álvarez-Ayuso, E., Murciego, A., Muñoz-Centeno, L.M., Alonso-Rojo, P., & Villar-Alonso, P. (2018). Arsenic distribution in a pasture area impacted by past mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 228-237. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.08.031
- Abbas, G., et al. (2018). Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: Physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 59. doi:10.3390/ijerph15010059
- Abbas, M.H.H., & Abdelhafez, A.A. (2013). Role of EDTA in arsenic mobilization and its uptake by maize grown on an As-polluted soil. *Chemosphere*, 90(2), 588-594. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.08.042
- Aboughalma, H., Bi, R., & Schlaak, M. (2008). Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(8), 926-933. doi:10.1080/10934520801974459
- Acar, Y.B., et al. (1995). Electrokinetic remediation: Basics and technology status. *Journal of Hazardous Materials*, 40(2), 117-137. doi:10.1016/0304-3894(94)00066-P
- Acosta, J.A., Arocena, J.M., & Faz, A. (2015). Speciation of arsenic in bulk and

- rhizosphere soils from artisanal cooperative mines in Bolivia. *Chemosphere*, 138, 1014-1020. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.12.050
- Adiansyah, J.S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050-1062. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.139
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2019). *The ATSDR 2019 Substance Priority List*. Retrieved from: <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html#2019spl>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
- Alshawabkeh, A.N. (2009). Electrokinetic soil remediation: Challenges and opportunities. *Separation Science and Technology*, 44(10), 2171-2187. doi:10.1080/01496390902976681
- Alshawabkeh, A.N., Yeung, A.T., & Bricka, M.R. (1999). Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction. *Journal of Environmental Engineering*, 125(1), 27-35. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:1(27)
- Anawar, H.M., Rengel, Z., Damon, P., & Tibbett, M. (2018). Arsenic-phosphorus interactions in the soil-plant-microbe system: Dynamics of uptake, suppression and toxicity to plants. *Environmental Pollution*, 233, 1003-1012. doi:10.1016/j.envpol.2017.09.098
- Aubry, E., Dinant, S., Vilaine, F., Bellini, C., & Le Hir, R. (2019). Lateral transport of organic and inorganic solutes. *Plants*, 8(1). doi:10.3390/plants8010020
- Baek, K., Kim, D.-H., Park, S.-W., Ryu, B.-G., Bajargal, T., & Yang, J.-S. (2009). Electrolyte conditioning-enhanced electrokinetic remediation of arsenic-contaminated mine tailing. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 457-462. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.127
- Barberon, M., & Geldner, N. (2014). Radial transport of nutrients: The plant root as a polarized epithelium. *Plant Physiology*, 166(2), 528-537. doi:10.1104/pp.114.246124
- Battistel, M., Stolze, L., Muniruzzaman, M., & Rolle, M. (2021). Arsenic release and transport during oxidative dissolution of spatially-distributed sulfide minerals. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124651. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124651

- Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R., & Connolly, H. (2011). Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Chemosphere*, 83(3), 318-326. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.12.052
- Bia, G., García, M.G., & Borgnino, L. (2017). Changes in the As solid speciation during weathering of volcanic ashes: A XAS study on Patagonian ashes and Chacopampean loess. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 212, 119-132. doi:10.1016/j.gca.2017.06.016
- Bolan, N., Mahimairaja, S., Kunhikrishnan, A., & Choppala, G. (2013). Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. *Science of The Total Environment*, 463-464, 1154-1162. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.016
- Borišev, M., Pajević, S., Nikolić, N., Pilipović, A., Arsenov, D., & Župunski, M. (2018). Chapter 7 - Mine Site Restoration Using Silvicultural Approach. In M.N.V. Prasad, P.J.d.C. Favas, & S.K. Maiti (Eds.), *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 115-130): Elsevier.
- Bowell, R.J., Alpers, C.N., Jamieson, H.E., Nordstrom, D.K., & 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
- Brookins, D.G. (1988). *Eh-pH Diagrams for Geochemistry* (1 ed.): Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cameselle, C. (2015). 8 - Electrokinetic remediation and other physico-chemical remediation techniques for in situ treatment of soil from contaminated nuclear and NORM sites. In L. van Velzen (Ed.), *Environmental Remediation and Restoration of Contaminated Nuclear and Norm Sites* (pp. 161-184): Woodhead Publishing.
- Cameselle, C., Chirakkara, R.A., & 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
- Cang, L., Wang, Q.Y., Zhou, D.M., & 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
- Castillo-Michel, H.A., Larue, C., Pradas del Real, A.E., Cotte, M., & Sarret, G. (2017). Practical review on the use of synchrotron based micro- and nano- X-ray fluorescence mapping and X-ray absorption spectroscopy to investigate the interactions between plants and engineered nanomaterials. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 13-32. doi:10.1016/j.plaphy.2016.07.018
- Chang, P., Kim, J.-Y., & Kim, K.-W. (2005). Concentrations of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, 27(2), 109-119. doi:10.1007/s10653-005-0130-7
- Changul, C., Sutthirat, C., Padmanahban, G., & Tongcumpou, C. (2010). 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
- Chen, F., et al. (2015). Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands. *Journal of Geochemical Exploration*, 157, 27-35. doi:10.1016/j.gexplo.2015.05.011
- Chen, S.-J., Yan, X.-J., & Chen, Z. (2013). Arsenic in nature. In R.H. Kretsinger, V.N. Uversky, & E.A. Permyakov (Eds.), *Encyclopedia of Metalloproteins* (pp. 120-123). New York, NY: Springer New York.
- Chirakkara, R.A., Reddy, K.R., & Cameselle, C. (2015). Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed contaminated soil. *Electrochimica Acta*, 181, 179-191. doi:10.1016/j.electacta.2015.01.025
- Choi, J.-H., Maruthamuthu, S., Lee, H.-G., Ha, T.-H., & Bae, J.-H. (2009). Electrochemical studies on the performance of SS316L electrode in electrokinetics. *Metals and Materials International*, 15(5), 771-781. doi:10.1007/s12540-009-0771-z
- Choi, J.-H., Maruthamuthu, S., Lee, H.-G., Ha, T.-H., Bae, J.-H., & Alshwabkeh, A.N. (2010). Removal of phosphate from agricultural soil by electrokinetic remediation with iron electrode. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(6), 1101-1111. doi:10.1007/s10800-010-0073-2
- Cindy, L., & Lim, L.L.P. (2014). Application of electrokinetic in controlling heavy metals

- migration in sand: A feasibility study. *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*. Retrieved from <http://ir.unimas.my/id/eprint/5190>
- Corkhill, C.L., & Vaughan, D.J. (2009). Arsenopyrite oxidation – A review. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2342-2361. doi:10.1016/j.apgeochem.2009.09.008
- Corriveau, M.C., Jamieson, H.E., Parsons, M.B., Campbell, J.L., & Lanzirotti, A. (2011). Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: Particle size, mineralogy and texture. *Applied Geochemistry*, 26(9), 1639-1648. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.04.021
- Couto, N., Guedes, P., Zhou, D.-M., & Ribeiro, A.B. (2015). Integrated perspectives of a greenhouse study to upgrade an antimony and arsenic mine soil – Potential of enhanced phytotechnologies. *Chemical Engineering Journal*, 262, 563-570. doi:10.1016/j.cej.2014.09.021
- Craw, D., & Bowell, R.J. (2014). The characterization of arsenic in mine waste. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79(1), 473-505. doi:10.2138/rmg.2014.79.10
- Crisponi, G., & Nurchi, V.M. (2016). Chapter 2 - Chelating agents as therapeutic compounds-Basic principles. In J. Aaseth, G. Crisponi, & O. Andersen (Eds.), *Chelation Therapy in the Treatment of Metal Intoxication* (pp. 35-61). Boston: Academic Press.
- Datta, R., et al. (2017). Evidence for exocellular arsenic in fronds of *Pteris vittata*. *Scientific Reports*, 7(1), 2839. doi:10.1038/s41598-017-03194-x
- Day, P.A., Vlassopoulos, D., Root, R., & Rivera, N. (2004). The influence of sulfur and iron on dissolved arsenic concentrations in the shallow subsurface under changing redox conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(38), 13703. doi:10.1073/pnas.0402775101
- Dihrab, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2009). Membrane catalysts and bipolar plate materials for proton exchange membrane fuel cell. In T. Leon, D. Perkins, D.D. Dionysios, P. Leonid, D. Kent, L. David, A.M. Miguel, D.L. Russell, H.C. Steven, C. Marco, & W.L. John (Eds.), *Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment* (pp. 371-376). Wisconsin, United States: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- Dos Santos, J.V., et al. (2013). Soil biological attributes in arsenic-contaminated gold

- mining sites after revegetation. *Ecotoxicology*, 22 (10), 1526-1537. doi:10.1007/s10646-013-1139-9
- Drahota, P., & Filippi, M. (2009). Secondary arsenic minerals in the environment: A review. *Environment International*, 35(8), 1243-1255. doi:10.1016/j.envint.2009.07.004
- Dussadee, N., Unpaprom, Y., & Ramaraj, R. (2016). Grass silage for biogas production. In d.S. Thiago & M.S. Edson (Eds.), *Advances in Silage Production and Utilization* (pp. 153-171). Croatia: IntechOpen.
- Farooq, M.A., et al. (2016). Arsenic toxicity in plants: Cellular and molecular mechanisms of its transport and metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, 132, 42-52. doi:10.1016/j.envexpbot.2016.08.004
- Favas, P.J.C., Martino, L.E., & Prasad, M.N.V. (2018). Chapter 1 - Abandoned Mine Land Reclamation—Challenges and Opportunities (Holistic Approach). In M.N.V. Prasad, P.J.d.C. Favas, & S.K. Maiti (Eds.), *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 3-31): Elsevier.
- Flora, S.J.S. (2015). 1 - Arsenic: Chemistry, occurrence, and exposure. In S.J.S. Flora (Ed.), *Handbook of Arsenic Toxicology* (pp. 1-49). Oxford: Academic Press.
- Foster, A.L., & Kim, C.S. (2014). Arsenic speciation in solids using X-ray absorption spectroscopy. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79(1), 257-369. doi:10.2138/rmg.2014.79.5
- Gabarrón, M., Faz, A., Martínez-Martínez, S., & Acosta, J.A. (2018). Change in metals and arsenic distribution in soil and their bioavailability beside old tailing ponds. *Journal of Environmental Management*, 212, 292-300. doi:10.1016/j.jenvman.2018.02.010
- Gillispie, E.C., Sowers, T.D., Duckworth, O.W., & Polizzotto, M.L. (2015). Soil pollution due to irrigation with arsenic-contaminated groundwater: Current state of science. *Current Pollution Reports*, 1(1), 1-12. doi:10.1007/s40726-015-0001-5
- Gomes, H.I. (2012). Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 59-66. doi:10.1080/09593330.2012.696715
- Guha Mazumder, D.N. (2015). 6 - Health effects chronic arsenic toxicity. In S.J.S. Flora (Ed.), *Handbook of Arsenic Toxicology* (pp. 137-177). Oxford: Academic Press.
- Hammond, C.M., Root, R.A., Maier, R.M., & Chorover, J. (2018). Mechanisms of arsenic sequestration by *Prosopis juliflora* during the phytostabilization of metalliferous

- mine tailings. *Environmental Science & Technology*, 52(3), 1156-1164. doi:10.1021/acs.est.7b04363
- Han, Y.-H., Liu, X., Rathinasabapathi, B., Li, H.-B., Chen, Y., & Ma, L.Q. (2017). Mechanisms of efficient As solubilization in soils and As accumulation by As-hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Environmental Pollution*, 227, 569-577. doi:10.1016/j.envpol.2017.05.001
- Hasan, M.M., et al. (2019). Assisting phytoremediation of heavy metals using chemical amendments. *Plants*, 8(9). doi:10.3390/plants8090295
- Hauptvogel, M., Kotrla, M., Prčík, M., Pauková, Ž., Kováčik, M., & Lošák, T. (2020). Phytoremediation potential of fast-growing energy plants: Challenges and perspectives - a review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(1), 505-516. doi:10.15244/pjoes/101621
- Hendershot, W., Lalonde, H., & Duquette, M. (2007). Soil reaction and exchangeable acidity. In M. Carter & E. Gregorich (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed., pp. 173-178). Boca Raton: CRC Press.
- Henke, K.R., & Hutchison, A. (2009). Arsenic chemistry. In K.R. Henke (Ed.), *Arsenic* (pp. 9-68). New Jersey, NJ: John Wiley & Sons.
- Hokura, A., et al. (2006). Arsenic distribution and speciation in an arsenic hyperaccumulator fern by X-ray spectrometry utilizing a synchrotron radiation source. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 21(3), 321-328. doi:10.1039/B512792K
- Hu, L., et al. (2018). Cadmium phytoextraction potential of king grass (*Pennisetum sinense* Roxb.) and responses of rhizosphere bacterial communities to a cadmium pollution gradient. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21671-21681. doi:10.1007/s11356-018-2311-9
- Huang, J.H., Hu, K.N., & Decker, B. (2011). Organic arsenic in the soil environment: Speciation, occurrence, transformation, and adsorption behavior. *Water, Air, & Soil Pollution*, 219(1), 401-415. doi:10.1007/s11270-010-0716-2
- Iannelli, R., et al. (2015). Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design. *Electrochimica Acta*, 181, 146-159. doi:10.1016/j.electacta.2015.04.093
- IARC. (2012). *IARC Monographs: Arsenic, metals, fibres and dusts. Volume 100C. A*

review of human carcinogens [Online]. Retrieved from <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C.pdf>

- Isosaari, P., & 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
- Jamieson, H.E., Walker, S.R., & Parsons, M.B. (2015). Mineralogical characterization of mine waste. *Applied Geochemistry*, 57, 85-105. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.12.014
- Johnston, S.G., Bennett, W.W., Doriean, N., Hockmann, K., Karimian, N., & Burton, E.D. (2020). Antimony and arsenic speciation, redox-cycling and contrasting mobility in a mining-impacted river system. *Science of The Total Environment*, 710, 136354. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136354
- Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. (2019). General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed. In. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A.B. (2007). *Trace Elements from Soil to Human* (1st ed.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kamwean, P., Chaisan, T., Thobunluepop, P., Phumichai, C., & Bredemeier, M. (2016). Changing of morphological characteristic and biomass properties in *Pennisetum purpureum* by colchicine treatment. *Journal of Agronomy*, 16, 23-31. doi:10.3923/ja.2017.23.31
- Kashiwabara, T., et al. (2021). Synchrotron micro-X-ray fluorescence imaging of arsenic in frozen-hydrated sections of a root of *Pteris vittata*. *Metallomics*, 13(4). doi:10.1093/mtomcs/mfab009
- Kertulis-Tartar, G.M., Ma, L.Q., Tu, C., & Chirenje, T. (2006). Phytoremediation of an arsenic-contaminated site using *Pteris vittata* L.: A two-year study. *International Journal of Phytoremediation*, 8(4), 311-322. doi:10.1080/15226510600992873
- Keshavarzi, B., Moore, F., Rastmanesh, F., & Kermani, M. (2012). Arsenic in the Muteh gold mining district, Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 67(4), 959-970. doi:10.1007/s12665-012-1532-3

- Khalid, S., et al. (2017). Arsenic behaviour in soil-plant system: Biogeochemical reactions and chemical speciation influences. In N.A. Anjum, S.S. Gill, & N. Tuteja (Eds.), *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants: Volume 2 : Non-Biological Approaches* (pp. 97-140). Cham: Springer International Publishing.
- Kim, D.H., Jo, S.U., Choi, J.H., Yang, J.S., & Baek, K. (2012a). 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, E.J., Jeon, E.K., & Baek, K. (2016). Role of reducing agent in extraction of arsenic and heavy metals from soils by use of EDTA. *Chemosphere*, 152, 274-283. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.03.005
- Kim, E.J., Lee, J.C., & Baek, K. (2015). Abiotic reductive extraction of arsenic from contaminated soils enhanced by complexation: Arsenic extraction by reducing agents and combination of reducing and chelating agents. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 454-461. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.09.055
- Kim, S.O., Kim, W.S., & Kim, K.W. (2005). Evaluation of electrokinetic remediation of arsenic-contaminated soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 27(5), 443-453. doi:10.1007/s10653-005-2673-z
- Kim, W.S., et al. (2014). Field application of electrokinetic remediation for multi-metal contaminated paddy soil using two-dimensional electrode configuration. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6), 4482-4491. doi:10.1007/s11356-013-2424-0
- Kim, W.S., Park, G.Y., Kim, D.H., Jung, H.B., Ko, S.H., & Baek, K. (2012b). In situ field scale electrokinetic remediation of multi-metals contaminated paddy soil: Influence of electrode configuration. *Electrochimica Acta*, 86, 89-95. doi:10.1016/j.electacta.2012.02.078
- King, D.J., Doronila, A.I., Feenstra, C., Baker, A.J.M., & Woodrow, I.E. (2008). Phytostabilisation of arsenical gold mine tailings using four Eucalyptus species: Growth, arsenic uptake and availability after five years. *Science of The Total Environment*, 406(1), 35-42. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.07.054
- Ko, B.G., Anderson, C.W.N., Bolan, N.S., Huh, K.Y., & Vogeler, I. (2008). Potential for the phytoremediation of arsenic-contaminated mine tailings in Fiji. *Soil Research*,

- 46(7), 493-501. doi:10.1071/SR07200
- Ko, C.H., et al. (2017). Bioethanol production from recovered napier grass with heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 203, 1005-1010. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.049
- Kopittke, P.M., et al. (2018). Synchrotron-based X-ray fluorescence microscopy as a technique for imaging of elements in plants. *Plant physiology*, 178(2), 507-523. doi:10.1104/pp.18.00759
- Kopittke, P.M., Wang, P., Lombi, E., & Donner, E. (2017). Synchrotron-based X-Ray approaches for examining toxic trace metal(loid)s in soil-plant systems. *Journal of Environmental Quality*, 46(6), 1175-1189. doi:10.2134/jeq2016.09.0361
- Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., & Hudson-Edwards, K.A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.09.010
- Kravtsova, A.N. (2020). Synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy for the study of geological materials. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 14(1), 135-149. doi:10.1134/S1027451020020111
- Kumarathilaka, P., Seneweera, S., Meharg, A., & Bundschuh, J. (2018). Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: sources, physico-chemical, and biological factors - A review. *Water Research*, 140, 403-414. doi:10.1016/j.watres.2018.04.034
- Kumari, B., et al. (2017). Toxicology of arsenic in fish and aquatic systems. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 43-64. doi:10.1007/s10311-016-0588-9
- Lei, M., Chen, T.B., Huang, Z.C., Wang, Y.D., & Huang, Y.Y. (2008). Simultaneous compartmentalization of lead and arsenic in co-hyperaccumulator *Viola principis* H. de Boiss.: An application of SRXRF microprobe. *Chemosphere*, 72(10), 1491-1496. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.04.084
- Lim, J.M., Jin, B., & Butcher, D.J. (2012). A comparison of electrical stimulation for electrodic and EDTA-enhanced phytoremediation of lead using Indian Mustard (*Brassica juncea*). *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 33(8), 2737-2740. doi:10.5012/BKCS.2012.33.8.2737

- Lim, J.M., Salido, A.L., & Butcher, D.J. (2004). Phytoremediation of lead using Indian mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and electrodrugs. *Microchemical Journal*, 76(1), 3-9. doi:10.1016/j.microc.2003.10.002
- Liu, Y., Xu, W., Wang, Y., Hao, W., Zhou, Q., & Liu, J. (2021). Growth responses and accumulation characteristics of three ornamental plants to Sn contamination in soil. *Agriculture*, 11(3). doi:10.3390/agriculture11030205
- Lobo Bedmar, M.C., Pérez-Sanz, A., Martínez-Iñigo, M.J., & Plaza Benito, A. (2009). Influence of coupled electrokinetic-phytoremediation on soil remediation. *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*, 417-437. doi:10.1002/9780470523650.ch20
- Loredo-Portales, R., et al. (2017). Synchrotron based study of As mobility and speciation in tailings from a mining site in Mexico. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 1140-1149. doi:10.1016/j.jece.2017.01.019
- Lottermoser, B.G. (2010). Mine water. In B. Lottermoser (Ed.), *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (pp. 119-203). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Luo, J., Cai, L., Qi, S., Wu, J., & Sophie Gu, X. (2018). Influence of direct and alternating current electric fields on efficiency promotion and leaching risk alleviation of chelator assisted phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 149, 241-247. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.12.005
- Ma, C., Ming, H., Lin, C., Naidu, R., & Bolan, N. (2016). Phytoextraction of heavy metal from tailing waste using Napier grass. *CATENA*, 136, 74-83. doi:10.1016/j.catena.2015.08.001
- Maketon, W., Zenner, C.Z., & Ogden, K.L. (2008). Removal efficiency and binding mechanisms of copper and copper-EDTA complexes using polyethyleneimine. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2124-2129. doi:10.1021/es702420h
- Malekzadeh, M., & Sivakugan, N. (2017). One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5), 603-609. doi:10.1080/1064119X.2016.1213778
- Mandal, B.K., & Suzuki, K.T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201-235. doi:10.1016/S0039-9140(02)00268-0
- Mao, X., et al. (2016). Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to

- remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 125, 16-24. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.11.021
- Matschullat, J. (2000). Arsenic in the geosphere — a review. *Science of The Total Environment*, 249(1), 297-312. doi:10.1016/S0048-9697(99)00524-0
- Matsumoto, S., Hideki, S., Takashi, S., Ikuo, M., Ginting, K., & Rudy, G. (2019). Effects of acid soils on plant growth and successful revegetation in the case of mine site. In O. Suarau (Ed.), *Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance*: IntechOpen.
- Meharg, A.A., & Hartley-Whitaker, J. (2002). Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. *New Phytologist*, 154(1), 29-43. doi:10.1046/j.1469-8137.2002.00363.x
- Melato, F.A., Mokgalaka, N.S., & McCrindle, R.I. (2016). Adaptation and detoxification mechanisms of Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) growing on gold mine tailings. *International Journal of Phytoremediation*, 18(5), 509-520. doi:10.1080/15226514.2015.1115963
- Miller, J., & Curtin, D. (2007). Electrical conductivity and soluble ions. In M. Carter & E. Gregorich (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed., pp. 161-171). Boca Raton: CRC Press.
- Moreno-Jiménez, E., Esteban, E., & Peñalosa, J.M. (2012). The fate of arsenic in soil-plant systems. In D.M. Whitacre (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 1-37). New York, NY: Springer New York.
- Morin, G., & Calas, G. (2006). Arsenic in soils, mine tailings, and former industrial sites. *Elements*, 2(2), 97-101. doi:10.2113/gselements.2.2.97
- Ngole-Jeme, V.M., & Fantke, P. (2017). Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil. *PLOS ONE*, 12(2), e0172517. doi:10.1371/journal.pone.0172517
- Niazi, N.K., et al. (2017). Phosphate-assisted phytoremediation of arsenic by *Brassica napus* and *Brassica juncea*: Morphological and physiological response. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 670-678. doi:10.1080/15226514.2016.1278427
- Niazi, N.K., Singh, B., Van Zwieten, L., & Kachenko, A.G. (2011). Phytoremediation potential

- of *Pityrogramma Calomelanos* Var. *Austroamericana* and *Pteris Vittata* L. Grown at a highly variable arsenic contaminated site. *International Journal of Phytoremediation*, 13(9), 912-932. doi:10.1080/15226514.2011.568023
- Niazi, N.K., Singh, B., Van Zwieten, L., & Kachenko, A.G. (2012). Phytoremediation of an arsenic-contaminated site using *Pteris vittata* L. and *Pityrogramma calomelanos* var. *austroamericana*: a long-term study. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(8), 3506-3515. doi:10.1007/s11356-012-0910-4
- Nieva, N.E., Bia, G., Garcia, M.G., & Borgnino, L. (2019). Synchrotron XAS study on the As transformations during the weathering of sulfide-rich mine wastes. *Science of The Total Environment*, 669, 798-811. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.160
- Nunes, L.M., Gomes, H.I., Teixeira, M.R., Dias-Ferreira, C., & Ribeiro, A.B. (2016). Life cycle assessment of soil and groundwater remediation: groundwater impacts of electrokinetic remediation. In A.B. Ribeiro, E.P. Mateus, & N. Couto (Eds.), *Electrokinetics Across Disciplines and Continents: New Strategies for Sustainable Development* (pp. 173-202). Cham: Springer International Publishing.
- O'Day, P. (2006). Chemistry and mineralogy of arsenic. *Elements*, 2, 77-83.
- Oduo, B.O., Nanos, N., Carbonell, G., Torrijos, M., Patel, J.P., & Rodríguez Martín, J.A. (2018). Artisanal gold-mining in a rural environment: Land degradation in Kenya. *Land Degradation & Development*, 29(10), 3285-3293. doi:10.1002/ldr.3078
- Ono, F.B., Tappero, R., Sparks, D., & Guilherme, L.R.G. (2016). Investigation of arsenic species in tailings and windblown dust from a gold mining area. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1), 638-647. doi:10.1007/s11356-015-5304-y
- Ortega, R., Carmona, A., Llorens, I., & Solari, P.L. (2012). X-ray absorption spectroscopy of biological samples. A tutorial. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(12), 2054-2065. doi:10.1039/C2JA30224A
- Ottosen, L.M., Hansen, H.K., & Jensen, P.E. (2009). Electrokinetic removal of heavy metals. *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*, 95-126. doi:10.1002/9780470523650.ch4
- Paikaray, S. (2015). Arsenic geochemistry of acid mine drainage. *Mine Water and the Environment*, 34(2), 181-196. doi:10.1007/s10230-014-0286-4
- 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
- Panagiotaras, D., Papoulis, D., & Stathatos, E. (2016). Geochemistry of arsenic and toxic response. In N. Chakrabarty (Ed.), *Arsenic Toxicity* (1st ed., pp. 79-109). Boca Raton: CRC Press.
- Pandey, V.C., Bajpai, O., & Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58-73. doi:10.1016/j.rser.2015.09.078
- Paz-Garcia, J.M., Baek, K., Alshawabkeh, I.D., & Alshawabkeh, A.N. (2012). A generalized model for transport of contaminants in soil by electric fields. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(2), 308-318. doi:10.1080/10934529.2012.640911
- Phakamas, N., & Yampracha, S. (2018). Application of soil test kit for evaluating nitrogen fertilizer requirement of Napier Pakchong 1 grass in Thailand. *International Journal of Agricultural Technology*, 14, 1599-1610.
- Punshon, T., Jackson, B.P., Meharg, A.A., Warczack, T., Scheckel, K., & Guerinot, M.L. (2017). Understanding arsenic dynamics in agronomic systems to predict and prevent uptake by crop plants. *Science of The Total Environment*, 581-582, 209-220. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.111
- Putra, R.S., Ohkawa, Y., & 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
- Rahman, M.M., Ishii, Y., Niimi, M., & Kawamura, O. (2008). Effect of salinity stress on dry matter yield and oxalate content in Napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumach). *Asian-Australas J Anim Sci*, 21(11), 1599-1603. doi:10.5713/ajas.2008.80217
- Ramasamy, S., & Lee, J.S. (2015). Arsenic risk assessment. In S.J.S. Flora (Ed.), *Handbook of Arsenic Toxicology* (pp. 95-120). Oxford: Academic Press.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., & Richards, K. (2009). Arsenic pollution: A global synthesis. *RGS-IBG Book Series*, 1. doi:10.1002/9781444308785

- Reddy, K.R., & Cameselle, C. (2009). Overview of electrochemical remediation technologies. In *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater* (pp. 1-28).
- Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Jaffré, T., Erskine, P.D., Echevarria, G., & van der Ent, A. (2018). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 218(2), 407-411. doi:10.1111/nph.14907
- Root, R.A., Hayes, S.M., Hammond, C.M., Maier, R.M., & Chorover, J. (2015). Toxic metal(loid) speciation during weathering of iron sulfide mine tailings under semi-arid climate. *Applied Geochemistry*, 62, 131-149. doi:10.1016/j.apgeochem.2015.01.005
- Roy, M., Giri, A.K., Dutta, S., & Mukherjee, P. (2015). Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water. *Environment International*, 75, 180-198. doi:10.1016/j.envint.2014.11.010
- Ryu, S.-R., Jeon, E.-K., & Baek, K. (2017). A combination of reducing and chelating agents for electrolyte conditioning in electrokinetic remediation of As-contaminated soil. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 70, 252-259. doi:10.1016/j.jtice.2016.10.058
- Sampanpanish, P. (2018). Arsenic, manganese, and cyanide removal in a tailing storage facility for a gold mine using phytoremediation. *Remediation Journal*, 28(3), 83-89. doi:10.1002/rem.21563
- Sampanpanish, P., & Nanthavong, K. (2019). Effect of EDTA and NTA on arsenic bioaccumulation and translocation using phytoremediation by *Mimosa pudica* L. from contaminated soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102(1), 140-145. doi:10.1007/s00128-018-2502-6
- Sampanpanish, P., & 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 and Environment*, 36(2), 114-119. doi:10.25252/SE/17/51183
- Sarwar, N., et al. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710-721. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.12.116
- Shah, S.H., Houborg, R., & McCabe, M.F. (2017). Response of chlorophyll, carotenoid and

- SPAD-5 0 2 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 7(3). doi:10.3390/agronomy7030061
- Shahid, M., et al. (2014). EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A review. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 23(4), 389-416. doi:10.1080/15320383.2014.831029
- Shatil-Cohen, A., Attia, Z., & Moshelion, M. (2011). Bundle-sheath cell regulation of xylem-mesophyll water transport via aquaporins under drought stress: a target of xylem-borne ABA? *The Plant Journal*, 67(1), 72-80. doi:10.1111/j.1365-313X.2011.04576.x
- Shatil-Cohen, A., & Moshelion, M. (2012). Smart pipes: the bundle sheath role as xylem-mesophyll barrier. *Plant signaling & behavior*, 7(9), 1088-1091. doi:10.4161/psb.21162
- Smedley, P.L., & Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568. doi:10.1016/S0883-2927(02)00018-5
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual* (C. Ditzler, K. Scheffe, & H.C. Monger Eds.). Washington D.C.: Government Printing Office.
- Song, Y., Ammami, M.-T., Benamar, A., Mezazigh, S., & Wang, H. (2016). Effect of EDTA, EDDS, NTA and citric acid on electrokinetic remediation of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn contaminated dredged marine sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10577-10586. doi:10.1007/s11356-015-5966-5
- Souri, Z., Karimi, N., & Sandalio, L.M. (2017). Arsenic hyperaccumulation strategies: An overview. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 5(67). doi:10.3389/fcell.2017.00067
- Strawn, D.G. (2018). Review of interactions between phosphorus and arsenic in soils from four case studies. *Geochemical Transactions*, 19(1), 10. doi:10.1186/s12932-018-0055-6
- Tahmasbian, I., & Safari Sinegani, A.A. (2014). Chelate-assisted phytoextraction of cadmium from a mine soil by negatively charged sunflower. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(3), 695-702. doi:10.1007/s13762-013-0394-x

- Tahmasbian, I., & Safari Sinegani, A.A. (2016). Improving the efficiency of phytoremediation using electrically charged plant and chelating agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2479-2486. doi:10.1007/s11356-015-5467-6
- Tancharakorn, S., et al. (2012). The first microbeam synchrotron X-ray fluorescence beamline at the Siam Photon Laboratory. *Journal of Synchrotron Radiation*, 19(4), 536-540. doi:10.1107/S090904951201789X
- Terzano, R., Denecke, M.A., Falkenberg, G., Miller, B., Paterson, D., & Janssens, K. (2019). Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by X-ray based techniques (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 91(6), 1029-1063. doi:10.1515/pac-2018-0605
- Tomkins, A.G., & Morgan, B. (2018). Sulfide minerals. In W.M. White (Ed.), *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth* (pp. 1394-1396). Cham: Springer International Publishing.
- Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., Orr, R., & Campbell, N.A. (2020). *Campbell Biology* (12th ed.). New York: Pearson Education, Inc.,
- USEPA. (1996). *Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (Method 3052)*. Washington D.C., USA
- USEPA. (2007a). *Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts (Method 3015A)*. Washington D.C., USA
- USEPA. (2007b). *Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and oils (Method 3051A)*. Washington D.C., USA
- Ventura-Lima, J., Bogo, M.R., & Monserrat, J.M. (2011). Arsenic toxicity in mammals and aquatic animals: A comparative biochemical approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(3), 211-218. doi:10.1016/j.ecoenv.2010.11.002
- Visoottiviseth, P., Francesconi, K., & Sridokchan, W. (2002). The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. *Environmental Pollution*, 118(3), 453-461. doi:10.1016/S0269-7491(01)00293-7
- Wang, J., et al. (2018a). Effect of exogenous phosphate on the lability and phytoavailability of arsenic in soils. *Chemosphere*, 196, 540-547. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.12.191
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine

- tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.06.025
- Wang, P., et al. (2016). Ferric minerals and organic matter change arsenic speciation in copper mine tailings. *Environmental Pollution*, 218, 835-843. doi:10.1016/j.envpol.2016.08.007
- Wang, S., Jiao, B., Zhang, M., Zhang, G., Wang, X., & Jia, Y. (2018b). Arsenic release and speciation during the oxidative dissolution of arsenopyrite by O₂ in the absence and presence of EDTA. *Journal of Hazardous Materials*, 346, 184-190. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.12.038
- Wang, Y., Jiao, J.J., Zhu, S., & Li, Y. (2013). Arsenic K-edge X-ray absorption near-edge spectroscopy to determine oxidation states of arsenic of a coastal aquifer-aquitard system. *Environmental Pollution*, 179, 160-166. doi:10.1016/j.envpol.2013.04.005
- Wanitsawatwichai, K., & Sampanpanish, P. (2021). The combination of phytoremediation and electrokinetics remediation technology on arsenic contaminated remediation in tailing storage facilities from gold mine. *Heliyon*, 7(8), e07736. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e07736
- WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.
- Wiangkham, N., & Prapagdee, B. (2018). Potential of Napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoremediation and its possibility to use as biomass fuel. *Chemosphere*, 201, 511-518. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.03.039
- Williams, K.J. (2009). The introduction of 'chemotherapy' using arsphenamine - the first magic bullet. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 102(8), 343-348. doi:10.1258/jrsm.2009.09k036
- Wu, X., et al. (2020). Effects of phosphate, silicate, and bicarbonate on arsenopyrite dissolution and secondary mineral precipitation. *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(4), 515-525. doi:10.1021/acsearthspacechem.9b00273
- Xiao, X., et al. (2008). Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: The tolerance and accumulation. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 62-67. doi:10.1016/S1001-0742(08)60009-1
- Xie, L., & Van Zyl, D. (2020). Distinguishing reclamation, revegetation and

- phytoremediation, and the importance of geochemical processes in the reclamation of sulfidic mine tailings: A review. *Chemosphere*, 252, 126446. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126446
- Xu, Y., Fang, Y., Wang, K., Xia, W., & Qian, G. (2022). Remediation of As/Cr co-contaminated soil by electrokinetic coupled with permeable reactive barrier. *Environmental Engineering Research*, 27(3), 210017-210010. doi:10.4491/eer.2021.017
- Yang, J.S., Kwon, M.J., Choi, J., Baek, K., & O'Loughlin, E.J. (2014). The transport behavior of As, Cu, Pb, and Zn during electrokinetic remediation of a contaminated soil using electrolyte conditioning. *Chemosphere*, 117, 79-86. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.05.079
- Yang, J.S., Lee, J.Y., Baek, K., Kwon, T.S., & Choi, J. (2009). Extraction behavior of As, Pb, and Zn from mine tailings with acid and base solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1), 443-451. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.021
- Yang, W.J., et al. (2020). Effect of three Napier grass varieties on phytoextraction of Cd and Zn-contaminated cultivated soil under mowing and their safe utilization. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), 16134-16144. doi:10.1007/s11356-020-07887-1
- Yeung, A.T., & Gu, Y.Y. (2011). A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 11-29. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.08.047
- Zhang, L. (2019). X-ray absorption spectroscopy of metalloproteins. In Y. Hu (Ed.), *Metalloproteins: Methods and Protocols* (pp. 179-195). New York, NY: Springer New York.
- Zhou, D.M., Chen, H.F., Cang, L., & Wang, Y.J. (2007). Ryegrass uptake of soil Cu/Zn induced by EDTA/EDDS together with a vertical direct-current electrical field. *Chemosphere*, 67(8), 1671-1676. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.11.042



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สถานที่ดำเนินการทดลอง



รูปที่ ก-1 โรงเรือนทดลอง บริเวณชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการดำเนินการติดตั้งขั้วไฟฟ้าและการย้ายต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ ลงกระถางทดลองในการทดลองการบำบัดกากโลหะกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการให้ สนามไฟฟ้าและการเติมสารช่วยเร่ง

ภาคผนวก ข
ข้อมูลทางสถิติ

1) การทดลองการเคลื่อนที่ของสารหนูในกากโลหะกรรม

ตารางที่ ข-1 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลองควบคุม

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลองควบคุม	N	Subset of alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
บริเวณขั้วแอโนด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	53.60				
บริเวณขั้วแอโนด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3		57.52			
บริเวณขั้วแคโทด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	6		59.04	59.04		
กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3			60.92	60.92	
บริเวณขั้วแคโทด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	6			61.33	61.33	61.33
กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3				62.43	62.43
บริเวณขั้วแอโนด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3				62.51	62.51
กากโลหะกรรมเริ่มต้น	5				62.60	62.60
กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3				63.07	63.07
บริเวณขั้วแคโทด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	6					64.15

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.704

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-2 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลองสารฟอสเฟต
Duncan^{a,b}

ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	55.05		
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3	55.72		
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	6	56.36		
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	6	57.94	57.94	
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3	58.08	58.08	
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3		59.79	59.79
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	6		60.64	60.64
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3		60.70	60.70
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3			61.54
กากโลหะกรรมเริ่มต้น	5			62.60

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.704

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-3 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในชุดการทดลองสารอีดีทีเอ
Duncan^{a,b}

ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3	59.90	
บริเวณข้าวแอนด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3	60.41	
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	6	60.52	
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	6	60.73	
บริเวณข้าวแอนด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	60.81	
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	60.96	
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	6	61.57	
บริเวณข้าวแอนด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3	61.88	
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3	62.07	
กากโลหะกรรมเริ่มต้น	5	62.60	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.704

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-4 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในชุดการทดลองสารผสม
Duncan^{a,b}

ชุดการทดลองสารผสม	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	59.16			
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3	60.38	60.38		
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 168 ชั่วโมง	3	60.44	60.44	60.44	
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	6	60.55	60.55	60.55	
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3	60.75	60.75	60.75	
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	6	61.03	61.03	61.03	61.03
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	6	61.16	61.16	61.16	61.16
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 72 ชั่วโมง	3		61.67	61.67	61.67
กากโลหกรรมเริ่มต้น	5			62.60	62.60
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 120 ชั่วโมง	3				63.00

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.704

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-5 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแอนด์

Duncan^a

บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 72 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3	55.72	
ชุดการทดลองสารผสม	3		61.67
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3		61.88
ชุดการทดลองควบคุม	3		62.51
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 120 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองควบคุม	3	57.52	
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3	59.79	59.79
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3	60.41	60.41
ชุดการทดลองสารผสม	3		63.00
บริเวณข้าวแอนด์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองควบคุม	3	53.60	
ชุดการทดลองสารผสม	3		59.16
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3		60.70
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3		60.81

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-6 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมที่กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า

Duncan^a

กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 72 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
ชุดการทดลองสารผสม	3	60.75		
ชุดการทดลองควบคุม	3	60.92		
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3	61.54		
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3	62.07		
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 120 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3	58.08		
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3	59.90	59.90	
ชุดการทดลองสารผสม	3		60.38	
ชุดการทดลองควบคุม	3			63.07
กึ่งกลางระหว่างข้าวไฟฟ้า ที่เวลา 168 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	3	55.05		
ชุดการทดลองสารผสม	3		60.44	
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	3		60.96	
ชุดการทดลองควบคุม	3		62.43	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-7 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมที่บริเวณข้าวแคโทด

Duncan^a

บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 72 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	6	60.64	
ชุดการทดลองสารผสม	6	61.16	
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	6	61.57	
ชุดการทดลองควบคุม	6		64.15
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 120 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	6	57.94	
ชุดการทดลองควบคุม	6	59.04	
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	6		60.52
ชุดการทดลองสารผสม	6		61.03
บริเวณข้าวแคโทด ที่เวลา 168 ชั่วโมง	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลองสารฟอสเฟต	6	56.36	
ชุดการทดลองสารผสม	6		60.55
ชุดการทดลองสารอีดีทีเอ	6		60.73
ชุดการทดลองควบคุม	6		61.33

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 6.000

2) การทดลองการเติมสารฟอสเฟตและสารอีทีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรม
ด้วยหญ้าเนเปียร์แคร่ร่วมกับจุลนศาสตร์ไฟฟ้า

ตารางที่ ข-8 การกร่อนของขั้วแอโนดในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน
Duncan^a

ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	2.81		
เวลา 30 วัน	3		6.27	
เวลา 60 วัน	3		7.47	
เวลา 45 วัน	3		8.13	
ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	2.92		
เวลา 30 วัน	3	4.52	4.52	
เวลา 60 วัน	3		7.70	
เวลา 45 วัน	3		8.62	
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	3.08		
เวลา 30 วัน	3	4.48	4.48	
เวลา 45 วัน	3		6.16	
เวลา 60 วัน	3		6.69	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	2.63		
เวลา 30 วัน	3		5.66	
เวลา 60 วัน	3		5.69	
เวลา 45 วัน	3			8.35

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-8 การกร่อนของข้าวแอนด์ในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)
Duncan^a

ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	2.11	5.15	7.82
เวลา 30 วัน	3			
เวลา 60 วัน	3			7.82
เวลา 45 วัน	3			8.61

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-9 การกร่อนของข้าวแอนด์ในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน
Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง E1	3	2.11	2.81
ชุดการทดลอง P3	3	2.63	
ชุดการทดลอง C2	3	2.81	
ชุดการทดลอง P1	3	2.92	
ชุดการทดลอง P2	3	3.08	
ชุดการทดลอง E2	3	3.08	
ชุดการทดลอง E3	3	4.76	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-9 การกร่อนของซีเมนต์ในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)
Duncan^a

เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง P2	3	4.48	
ชุดการทดลอง P1	3	4.52	
ชุดการทดลอง E1	3	5.15	5.15
ชุดการทดลอง P3	3	5.66	5.66
ชุดการทดลอง C2	3		7.47
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P2	3		6.16
ชุดการทดลอง C2	3		8.13
ชุดการทดลอง P3	3		8.35
ชุดการทดลอง E1	3		8.61
ชุดการทดลอง P1	3		8.62
เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P3	3		5.69
ชุดการทดลอง C2	3		6.27
ชุดการทดลอง P2	3		6.69
ชุดการทดลอง P1	3		7.70
ชุดการทดลอง E1	3		7.82

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-10 ปริมาณความชื้นของกากโถงกรรมในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 45 วัน	3	4.96	14.60
เวลา 30 วัน	3	5.02	
เวลา 60 วัน	3	5.86	
เวลา 15 วัน	3		
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	5.37	9.75
เวลา 45 วัน	3	6.56	
เวลา 30 วัน	3	9.75	
เวลา 15 วัน	3	15.99	
ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	5.93	7.48
เวลา 45 วัน	3	6.01	
เวลา 30 วัน	3	7.48	
เวลา 15 วัน	3	10.48	
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
เวลา 45 วัน	3	5.39	
เวลา 60 วัน	3	6.43	
เวลา 30 วัน	3	7.43	
เวลา 15 วัน	3	12.98	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-10 ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 45 วัน	3	4.74	12.01
เวลา 60 วัน	3	6.11	
เวลา 30 วัน	3	8.07	
เวลา 15 วัน	3		
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 45 วัน	3	8.08	16.07
เวลา 60 วัน	3	9.37	
เวลา 30 วัน	3	9.75	
เวลา 15 วัน	3		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-11 ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P1	3	10.48	
ชุดการทดลอง P3	3	12.01	
ชุดการทดลอง P2	3	12.98	
ชุดการทดลอง C1	3	14.60	
ชุดการทดลอง E3	3	15.05	
ชุดการทดลอง C2	3	15.99	
ชุดการทดลอง E1	3	16.07	
ชุดการทดลอง E2	3	17.33	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-11 ปริมาณความชื้นของกากโถงกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C1	3	5.02	
ชุดการทดลอง P2	3	7.43	7.43
ชุดการทดลอง P1	3	7.48	7.48
ชุดการทดลอง P3	3	8.07	8.07
ชุดการทดลอง C2	3		9.75
ชุดการทดลอง E1	3		9.75
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง P3	3	4.74	
ชุดการทดลอง C1	3	4.96	4.96
ชุดการทดลอง P2	3	5.39	5.39
ชุดการทดลอง P1	3	6.01	6.01
ชุดการทดลอง C2	3	6.56	6.56
ชุดการทดลอง E1	3		8.08
เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C2	3	5.37	
ชุดการทดลอง C1	3	5.86	
ชุดการทดลอง P1	3	5.93	
ชุดการทดลอง P3	3	6.11	
ชุดการทดลอง P2	3	6.43	
ชุดการทดลอง E1	3		9.37

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-12 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
เวลา 45 วัน	3	64.33	
เวลา 30 วัน	3	64.48	
เวลา 15 วัน	3	64.76	
เวลา 60 วัน	3	65.62	
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5	66.61	
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	64.01	65.20
เวลา 45 วัน	3	64.19	
เวลา 60 วัน	3	65.20	
เวลา 30 วัน	3	65.59	
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5	66.61	
ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 45 วัน	3	62.34	64.34
เวลา 60 วัน	3	62.40	
เวลา 15 วัน	3	64.34	
เวลา 30 วัน	3	64.57	
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5	66.61	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.261

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-12 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	62.69	
เวลา 15 วัน	3	62.95	
เวลา 45 วัน	3	63.09	
เวลา 30 วัน	3	64.24	64.24
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5		66.61
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 30 วัน	3	63.82	
เวลา 45 วัน	3	63.95	
เวลา 15 วัน	3	64.14	
เวลา 60 วัน	3	65.14	65.14
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5		66.61
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 30 วัน	3	63.83	
เวลา 15 วัน	3	64.29	
เวลา 45 วัน	3	64.60	64.60
เวลา 60 วัน	3	65.05	65.05
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5		66.61

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.261

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-13 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P2	3		62.95
ชุดการทดลอง C2	3		64.01
ชุดการทดลอง P3	3		64.14
ชุดการทดลอง E1	3		64.29
ชุดการทดลอง P1	3		64.34
ชุดการทดลอง C1	3		64.76
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P3	3		63.82
ชุดการทดลอง E1	3		63.83
ชุดการทดลอง P2	3		64.24
ชุดการทดลอง C1	3		64.48
ชุดการทดลอง P1	3		64.57
ชุดการทดลอง C2	3		65.59
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P1	3		62.34
ชุดการทดลอง P2	3		63.09
ชุดการทดลอง P3	3		63.95
ชุดการทดลอง C2	3		64.19
ชุดการทดลอง C1	3		64.33
ชุดการทดลอง E1	3		64.60

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-13 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง P1	3	62.40	
ชุดการทดลอง P2	3	62.69	
ชุดการทดลอง E1	3		65.05
ชุดการทดลอง P3	3		65.14
ชุดการทดลอง C2	3		65.20
ชุดการทดลอง C1	3		65.62

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-14 มวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	2.68	
เวลา 45 วัน	3	3.64	
เวลา 30 วัน	3		4.82
เวลา 60 วัน	3		4.87
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	3.06	
เวลา 45 วัน	3	3.25	
เวลา 30 วัน	3		4.70
เวลา 60 วัน	3		5.29

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-14 มวลชีวภาพส่วนใต้กากลอกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลอง
ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 30 วัน	3	3.21		
เวลา 15 วัน	3	3.69		
เวลา 45 วัน	3		5.62	
เวลา 60 วัน	3			6.63
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	3.46		
เวลา 30 วัน	3	3.64		
เวลา 45 วัน	3	4.28	4.28	
เวลา 60 วัน	3		5.14	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	2.60		
เวลา 45 วัน	3		4.18	
เวลา 30 วัน	3		4.39	
เวลา 60 วัน	3			6.14
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 15 วัน	3		3.27	
เวลา 45 วัน	3		3.57	
เวลา 30 วัน	3		3.58	
เวลา 60 วัน	3		4.14	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-15 มวลชีวภาพส่วนใต้กอกโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P3	3	2.60		
ชุดการทดลอง C1	3	2.68		
ชุดการทดลอง C2	3	3.06	3.06	
ชุดการทดลอง E1	3	3.27	3.27	
ชุดการทดลอง P2	3	3.46	3.46	
ชุดการทดลอง P1	3		3.69	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P1	3	3.21		
ชุดการทดลอง E1	3	3.57		
ชุดการทดลอง P2	3	3.63	3.63	
ชุดการทดลอง P3	3		4.39	4.39
ชุดการทดลอง C2	3			4.70
ชุดการทดลอง C1	3			4.82
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง C2	3	3.25		
ชุดการทดลอง E1	3	3.58		
ชุดการทดลอง C1	3	3.64		
ชุดการทดลอง P3	3	4.18		
ชุดการทดลอง P2	3	4.28		
ชุดการทดลอง P1	3		5.62	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-15 มวลชีวภาพส่วนใต้กากลอหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง E1	3	4.14			
ชุดการทดลอง C1	3	4.87	4.87		
ชุดการทดลอง P2	3		5.14		
ชุดการทดลอง C2	3		5.29	5.29	
ชุดการทดลอง P3	3			6.14	6.14
ชุดการทดลอง P1	3				6.63

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-16 มวลชีวภาพส่วนเหนือกากลอหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	4.36		
เวลา 30 วัน	3		8.18	
เวลา 45 วัน	3		8.60	
เวลา 60 วัน	3			11.44
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	3.01		
เวลา 45 วัน	3		7.23	
เวลา 30 วัน	3		8.22	
เวลา 60 วัน	3			10.66

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-16 มวลชีวภาพส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุด การทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	4.65			
เวลา 30 วัน	3	5.89	5.89		
เวลา 45 วัน	3		7.33		
เวลา 60 วัน	3			10.92	
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 15 วัน	3	3.77			
เวลา 30 วัน	3		6.01		
เวลา 45 วัน	3			7.18	
เวลา 60 วัน	3				9.16
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	3.77			
เวลา 30 วัน	3	4.92	4.92		
เวลา 45 วัน	3		5.87		
เวลา 60 วัน	3			7.39	
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	2.42			
เวลา 45 วัน	3		5.20		
เวลา 30 วัน	3		5.21		
เวลา 60 วัน	3			7.74	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-17 มวลชีวภาพส่วนเนื้ออกาโลทกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	2.42		
ชุดการทดลอง C2	3	3.01	3.01	
ชุดการทดลอง P2	3		3.77	3.77
ชุดการทดลอง P3	3		3.77	3.77
ชุดการทดลอง C1	3			4.36
ชุดการทดลอง P1	3			4.65
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P3	3	4.91		
ชุดการทดลอง E1	3	5.21		
ชุดการทดลอง P1	3	5.89		
ชุดการทดลอง P2	3	6.02		
ชุดการทดลอง C1	3		8.18	
ชุดการทดลอง C2	3		8.22	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	5.20		
ชุดการทดลอง P3	3	5.87		
ชุดการทดลอง P2	3		7.17	
ชุดการทดลอง C2	3		7.23	
ชุดการทดลอง P1	3		7.33	
ชุดการทดลอง C1	3			8.60

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-17 มวลชีวภาพส่วนเนื้ออกาโลทกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P3	3	7.39	9.16	10.66
ชุดการทดลอง E1	3	7.74		
ชุดการทดลอง P2	3			
ชุดการทดลอง C2	3			10.66
ชุดการทดลอง P1	3			10.92
ชุดการทดลอง C1	3			11.44

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-18 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้อกาโลทกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	5.07	8.89	9.09
เวลา 45 วัน	3			
เวลา 30 วัน	3		9.09	
เวลา 60 วัน	3			10.45
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 30 วัน	3	6.51	8.47	
เวลา 15 วัน	3	8.47		
เวลา 45 วัน	3		9.11	
เวลา 60 วัน	3		9.52	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-18 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะใน
แต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 30 วัน	3	5.55		
เวลา 15 วัน	3		7.53	
เวลา 45 วัน	3		8.51	8.51
เวลา 60 วัน	3			9.46
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 30 วัน	3		6.60	
เวลา 15 วัน	3		7.16	
เวลา 60 วัน	3		7.38	
เวลา 45 วัน	3		7.61	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 60 วัน	3	5.58		
เวลา 30 วัน	3	6.12	6.12	
เวลา 45 วัน	3		6.71	6.71
เวลา 15 วัน	3			7.19
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		13		
เวลา 30 วัน	3		5.78	
เวลา 15 วัน	3		5.92	
เวลา 60 วัน	3		6.08	
เวลา 45 วัน	3		6.25	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-19 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะใน
แต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	5.07		
ชุดการทดลอง E1	3	5.92	5.92	
ชุดการทดลอง P2	3		7.16	7.16
ชุดการทดลอง P3	3		7.19	7.19
ชุดการทดลอง P1	3		7.53	7.53
ชุดการทดลอง C2	3			8.47
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P1	3	5.55		
ชุดการทดลอง E1	3	5.78		
ชุดการทดลอง P3	3	6.12		
ชุดการทดลอง C2	3	6.51		
ชุดการทดลอง P2	3	6.60		
ชุดการทดลอง C1	3		9.09	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง E1	3	6.25		
ชุดการทดลอง P3	3	6.71		
ชุดการทดลอง P2	3	7.61	7.61	
ชุดการทดลอง P1	3		8.51	
ชุดการทดลอง C1	3		8.89	
ชุดการทดลอง C2	3		9.12	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-19 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P3	3	5.58	7.38	9.46
ชุดการทดลอง E1	3	6.08		
ชุดการทดลอง P2	3			
ชุดการทดลอง P1	3			9.46
ชุดการทดลอง C2	3			9.52
ชุดการทดลอง C1	3			10.45

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-20 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	0.91	1.31
เวลา 45 วัน	3	1.11	
เวลา 60 วัน	3		
เวลา 30 วัน	3		
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	1.02	1.67
เวลา 45 วัน	3		
เวลา 30 วัน	3		
เวลา 60 วัน	3		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-20 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเนื้ออากาศโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 45 วัน	3	1.17		
เวลา 15 วัน	3		1.43	
เวลา 30 วัน	3		1.60	
เวลา 60 วัน	3			1.78
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	1.57		
เวลา 30 วัน	3	1.68		
เวลา 45 วัน	3	1.74		
เวลา 60 วัน	3		2.62	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	1.42		
เวลา 45 วัน	3		1.91	
เวลา 30 วัน	3		2.08	
เวลา 60 วัน	3		2.22	
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 30 วัน	3	1.25		
เวลา 45 วัน	3		1.96	
เวลา 15 วัน	3		2.17	
เวลา 60 วัน	3		2.27	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-21 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเนื้ออากาศโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง C2	3	0.91			
ชุดการทดลอง C2	3	1.02			
ชุดการทดลอง P3	3	1.42	1.42		
ชุดการทดลอง P1	3	1.43	1.43		
ชุดการทดลอง P2	3		1.57		
ชุดการทดลอง E1	3			2.17	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง E1	3	1.25			
ชุดการทดลอง C1	3	1.32	1.32		
ชุดการทดลอง C2	3		1.59	1.59	
ชุดการทดลอง P1	3		1.60	1.60	
ชุดการทดลอง P2	3			1.68	
ชุดการทดลอง P3	3				2.09
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง C1	3	1.11			
ชุดการทดลอง P1	3	1.17			
ชุดการทดลอง C2	3		1.51		
ชุดการทดลอง P2	3		1.74	1.74	
ชุดการทดลอง P3	3			1.91	
ชุดการทดลอง E1	3			1.96	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-21 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง C1	3	1.31			
ชุดการทดลอง C2	3		1.67		
ชุดการทดลอง P1	3		1.78		
ชุดการทดลอง P3	3			2.22	
ชุดการทดลอง E1	3			2.27	
ชุดการทดลอง P2	3				2.62

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-22 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.0136		
เวลา 45 วัน	3		0.0319	
เวลา 30 วัน	3			0.0441
เวลา 60 วัน	3			0.0509
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	0.0265		
เวลา 45 วัน	3	0.0296		
เวลา 30 วัน	3	0.0305		
เวลา 60 วัน	3		0.0503	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-22 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระใน
แต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 30 วัน	3	0.0176			
เวลา 15 วัน	3		0.0278		
เวลา 45 วัน	3			0.0480	
เวลา 60 วัน	3				0.0627
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
เวลา 30 วัน	3	0.0240			
เวลา 15 วัน	3	0.0243			
เวลา 45 วัน	3			0.0319	
เวลา 60 วัน	3			0.0377	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	0.0187			
เวลา 30 วัน	3		0.0267		
เวลา 45 วัน	3		0.0278		
เวลา 60 วัน	3			0.0343	
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1			
เวลา 15 วัน	3		0.0191		
เวลา 30 วัน	3		0.0207		
เวลา 45 วัน	3		0.0225		
เวลา 60 วัน	3		0.0250		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-23 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะใน
แต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0136			
ชุดการทดลอง P3	3	0.0187	0.0187		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0191	0.0191		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0243		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0265		
ชุดการทดลอง P1	3		0.0278		
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P1	3	0.0176			
ชุดการทดลอง E1	3	0.0207	0.0207		
ชุดการทดลอง P2	3	0.0240	0.0240	0.0240	
ชุดการทดลอง P3	3		0.0267	0.0267	
ชุดการทดลอง C2	3			0.0305	
ชุดการทดลอง C1	3				0.0441
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0255			
ชุดการทดลอง P3	3	0.0278			
ชุดการทดลอง C2	3	0.0296			
ชุดการทดลอง C1	3	0.0319			
ชุดการทดลอง P2	3	0.0319			
ชุดการทดลอง P1	3		0.0480		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-23 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระใน
แต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง E1	3	0.0250			
ชุดการทดลอง P3	3		0.0343		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0377		
ชุดการทดลอง C2	3			0.0503	
ชุดการทดลอง C1	3			0.0509	
ชุดการทดลอง P1	3				0.0627

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.0040		
เวลา 45 วัน	3		0.0095	
เวลา 30 วัน	3		0.0107	
เวลา 60 วัน	3			0.0149
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.0031		
เวลา 45 วัน	3		0.0109	
เวลา 30 วัน	3		0.0130	
เวลา 60 วัน	3			0.0179

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	0.0066			
เวลา 45 วัน	3	0.0086	0.0086		
เวลา 30 วัน	3		0.0094		
เวลา 60 วัน	3			0.0194	
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	0.0058			
เวลา 30 วัน	3		0.0101		
เวลา 45 วัน	3		0.0125		
เวลา 60 วัน	3			0.0240	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
เวลา 15 วัน	3	0.0053			
เวลา 30 วัน	3		0.0103		
เวลา 45 วัน	3		0.0112		
เวลา 60 วัน	3			0.0164	
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 15 วัน	3	0.0052			
เวลา 30 วัน	3		0.0065		
เวลา 45 วัน	3			0.0101	
เวลา 60 วัน	3				0.0175

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-25 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C2	3	0.0031		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0040	0.0040	
ชุดการทดลอง E1	3		0.0052	0.0052
ชุดการทดลอง P3	3		0.0053	0.0053
ชุดการทดลอง P2	3		0.0058	0.0058
ชุดการทดลอง P1	3			0.0066
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	0.0065		
ชุดการทดลอง P1	3	0.0094	0.0094	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0101	0.0101
ชุดการทดลอง P3	3		0.0103	0.0103
ชุดการทดลอง C1	3		0.0107	0.0107
ชุดการทดลอง C2	3			0.0130
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P1	3	0.0086		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0095	0.0095	
ชุดการทดลอง E1	3	0.0101	0.0101	
ชุดการทดลอง C2	3		0.0109	0.0109
ชุดการทดลอง P3	3		0.0112	0.0112
ชุดการทดลอง P2	3			0.0125

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-25 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.0149		
ชุดการทดลอง P3	3	0.0164	0.0164	
ชุดการทดลอง E1	3	0.0175	0.0175	
ชุดการทดลอง C2	3	0.0179	0.0179	
ชุดการทดลอง P1	3		0.0194	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0240

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-26 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุด
 การทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.0783		
เวลา 45 วัน	3		0.1379	
เวลา 30 วัน	3		0.1409	
เวลา 60 วัน	3			0.1592
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 30 วัน	3	0.0993		
เวลา 15 วัน	3	0.1324	0.1324	
เวลา 30 วัน	3		0.1420	
เวลา 60 วัน	3		0.1461	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-26 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 30 วัน	3	0.0860		
เวลา 15 วัน	3		0.1170	
เวลา 45 วัน	3		0.1367	0.1367
เวลา 60 วัน	3			0.1507
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 30 วัน	3		0.1027	
เวลา 15 วัน	3		0.1136	
เวลา 60 วัน	3		0.1178	
เวลา 45 วัน	3		0.1202	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 60 วัน	3	0.0856		
เวลา 30 วัน	3	0.0961		0.0961
เวลา 45 วัน	3			0.1050
เวลา 15 วัน	3			0.1121
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 30 วัน	3		0.0907	
เวลา 15 วัน	3		0.0919	
เวลา 60 วัน	3		0.0935	
เวลา 45 วัน	3		0.0966	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-27 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.0783		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0919	0.0919	
ชุดการทดลอง P3	3		0.1121	0.1121
ชุดการทดลอง P2	3		0.1136	0.1136
ชุดการทดลอง P1	3		0.1170	0.1170
ชุดการทดลอง C2	3			0.1324
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P1	3	0.0860		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0907		
ชุดการทดลอง P3	3	0.0961		
ชุดการทดลอง C2	3	0.0993		
ชุดการทดลอง P2	3	0.1027		
ชุดการทดลอง C1	3		0.1409	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	0.0966		
ชุดการทดลอง P3	3	0.1050	0.1050	
ชุดการทดลอง P2	3		0.1201	0.1201
ชุดการทดลอง P1	3			0.1367
ชุดการทดลอง C1	3			0.1379
ชุดการทดลอง C2	3			0.1420

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-27 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P3	3	0.0856	0.1178	0.1461
ชุดการทดลอง E1	3	0.0935		
ชุดการทดลอง P2	3			
ชุดการทดลอง C2	3			0.1461
ชุดการทดลอง P1	3			0.1507
ชุดการทดลอง C1	3			0.1592

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-28 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (BAF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	0.0142	0.0200
เวลา 30 วัน	3	0.0173	
เวลา 60 วัน	3	0.0200	
เวลา 45 วัน	3		
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	0.0159	0.0257
เวลา 45 วัน	3		
เวลา 30 วัน	3		
เวลา 60 วัน	3		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-28 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเนื้ออากาศโลหกรรม (BAF) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 45 วัน	3	0.0188	0.0222	0.0247	0.0284
เวลา 15 วัน	3				
เวลา 30 วัน	3				
เวลา 60 วัน	3				
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
เวลา 15 วัน	3	0.0249	0.0418		
เวลา 30 วัน	3	0.0261			
เวลา 45 วัน	3	0.0277			
เวลา 60 วัน	3				
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
เวลา 15 วัน	3	0.0221	0.0340		
เวลา 45 วัน	3				
เวลา 30 วัน	3				
เวลา 60 วัน	3				
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
เวลา 30 วัน	3	0.0196	0.0349		
เวลา 45 วัน	3				
เวลา 15 วัน	3				
เวลา 60 วัน	3				

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-29 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (BAF) ของหมู่บ้านเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง C1	3	0.0142			
ชุดการทดลอง C2	3	0.0159	0.0159		
ชุดการทดลอง P3	3		0.0221	0.0221	
ชุดการทดลอง P1	3		0.0222	0.0222	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0249	
ชุดการทดลอง E1	3				0.0337
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง E1	3	0.0196			
ชุดการทดลอง C1	3	0.0204			
ชุดการทดลอง C2	3	0.0242	0.0242		
ชุดการทดลอง P1	3	0.0247	0.0247		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0261		
ชุดการทดลอง P3	3			0.0327	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง C1	3	0.0173			
ชุดการทดลอง P1	3	0.0188			
ชุดการทดลอง C2	3		0.0235		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0277	0.0277	
ชุดการทดลอง P3	3			0.0299	
ชุดการทดลอง E1	3			0.0303	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-29 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (BAF) ของหลุ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง C1	3	0.0200			
ชุดการทดลอง C2	3		0.0257		
ชุดการทดลอง P1	3		0.0284		
ชุดการทดลอง P3	3			0.0340	
ชุดการทดลอง E1	3			0.0349	
ชุดการทดลอง P2	3				0.0418

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-30 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม
 (TF) ของหลุ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 60 วัน	3	0.1261		
เวลา 45 วัน	3	0.1265		
เวลา 30 วัน	3	0.1450		
เวลา 15 วัน	3	0.1813		
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.1217		
เวลา 45 วัน	3		0.1661	
เวลา 60 วัน	3		0.1767	
เวลา 30 วัน	3			0.2439

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-30 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (TF) ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 45 วัน	3	0.1390	0.2964	
เวลา 60 วัน	3	0.1886		
เวลา 15 วัน	3	0.1903		
เวลา 30 วัน	3			
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	0.2246	0.2588	
เวลา 45 วัน	3	0.2346		
เวลา 30 วัน	3	0.2588		
เวลา 60 วัน	3			
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 15 วัน	3	0.1984	0.3448	0.3975
เวลา 45 วัน	3			
เวลา 30 วัน	3	0.2859		
เวลา 60 วัน	3	0.3448		
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 30 วัน	3	0.2179	0.3779	
เวลา 45 วัน	3	0.3155		
เวลา 15 วัน	3			
เวลา 60 วัน	3			

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-31 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหกรรม (TF) ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C2	3	0.1217		
ชุดการทดลอง C1	3	0.1813	0.1813	
ชุดการทดลอง P1	3	0.1903	0.1903	
ชุดการทดลอง P3	3	0.1984	0.1984	
ชุดการทดลอง P2	3		0.2246	
ชุดการทดลอง E1	3			0.3694
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.1450		
ชุดการทดลอง E1	3	0.2179	0.2179	
ชุดการทดลอง C2	3		0.2439	
ชุดการทดลอง P2	3		0.2588	0.2588
ชุดการทดลอง P1	3		0.2964	0.2964
ชุดการทดลอง P3	3			0.3448
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.1265		
ชุดการทดลอง P1	3	0.1390		
ชุดการทดลอง C2	3	0.1661		
ชุดการทดลอง P2	3		0.2346	
ชุดการทดลอง P3	3		0.2859	0.2859
ชุดการทดลอง E1	3			0.3155

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-31 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (TF) ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C1	3	0.1261	
ชุดการทดลอง C2	3	0.1767	
ชุดการทดลอง P1	3	0.1886	
ชุดการทดลอง P2	3		0.3599
ชุดการทดลอง E1	3		0.3779
ชุดการทดลอง P3	3		0.3975

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-32 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
เวลา 60 วัน	3	0.0111	
เวลา 45 วัน	3	0.0115	
เวลา 15 วัน	3	0.0118	
เวลา 30 วัน	3	0.0147	
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 30 วัน	3	0.0095	
เวลา 60 วัน	3	0.0106	0.0106
เวลา 45 วัน	3	0.0123	0.0123
เวลา 15 วัน	3		0.0160

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-32 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 60 วัน	3	0.0070		
เวลา 45 วัน	3	0.0086		
เวลา 30 วัน	3		0.0138	
เวลา 15 วัน	3		0.0160	
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 15 วัน	3	0.0059		
เวลา 60 วัน	3	0.0071		
เวลา 45 วัน	3	0.0080		
เวลา 30 วัน	3		0.0123	
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 45 วัน	3	0.0040		
เวลา 60 วัน	3	0.0061	0.0061	
เวลา 30 วัน	3		0.0095	
เวลา 15 วัน	3			0.0151
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
เวลา 60 วัน	3	0.0042		
เวลา 45 วัน	3	0.0068		
เวลา 15 วัน	3	0.0085		
เวลา 30 วัน	3	0.0107		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-33 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลอง
เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง P2	3	0.0059			
ชุดการทดลอง E1	3	0.0085	0.0085		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0118	0.0118		
ชุดการทดลอง P3	3		0.0151		
ชุดการทดลอง P1	3		0.0160		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0160		
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง P3	3	0.0095			
ชุดการทดลอง C2	3	0.0095			
ชุดการทดลอง E1	3	0.0107	0.0107		
ชุดการทดลอง P2	3	0.0123	0.0123		
ชุดการทดลอง P1	3	0.0138	0.0138		
ชุดการทดลอง C1	3		0.0147		
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P3	3	0.0040			
ชุดการทดลอง E1	3	0.0068	0.0068		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0080	0.0080	
ชุดการทดลอง P1	3		0.0086	0.0086	
ชุดการทดลอง C1	3			0.0115	0.0115
ชุดการทดลอง C2	3				0.0123

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-33 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลอง เมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	0.0042		
ชุดการทดลอง P3	3		0.0061	
ชุดการทดลอง P1	3		0.0070	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0071	
ชุดการทดลอง C2	3			0.0106
ชุดการทดลอง C2	3			0.0111

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-34 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง C1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 30 วัน	3	26.84	
เวลา 45 วัน	3	28.81	28.81
เวลา 60 วัน	3		31.91
เวลา 15 วัน	3		32.07
ชุดการทดลอง C2	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	22.77	
เวลา 45 วัน	3	26.55	
เวลา 30 วัน	3	26.80	
เวลา 15 วัน	3		32.67

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-34 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

ชุดการทดลอง P1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 60 วัน	3	19.87	30.28	36.24
เวลา 45 วัน	3	24.10		
เวลา 30 วัน	3			
เวลา 15 วัน	3			
ชุดการทดลอง P2	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 45 วัน	3	18.59	27.05	34.62
เวลา 60 วัน	3	19.38		
เวลา 30 วัน	3			
เวลา 15 วัน	3			
ชุดการทดลอง P3	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 60 วัน	3	15.80	25.05	37.13
เวลา 45 วัน	3	17.43		
เวลา 30 วัน	3			
เวลา 15 วัน	3			
ชุดการทดลอง E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
เวลา 60 วัน	3	15.76	30.18	
เวลา 45 วัน	3	17.14		
เวลา 30 วัน	3			
เวลา 15 วัน	3			

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-35 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	30.78		
ชุดการทดลอง C1	3	32.07	32.07	
ชุดการทดลอง C2	3	32.67	32.67	
ชุดการทดลอง P2	3	34.62	34.62	34.62
ชุดการทดลอง P1	3		36.24	36.24
ชุดการทดลอง P3	3			37.13
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P3	3	25.05		
ชุดการทดลอง C2	3	26.80	26.80	
ชุดการทดลอง C1	3	26.84	26.84	
ชุดการทดลอง P2	3	27.05	27.05	
ชุดการทดลอง E1	3		30.18	
ชุดการทดลอง P1	3		30.28	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	17.14		
ชุดการทดลอง P3	3	17.43		
ชุดการทดลอง P2	3	18.59		
ชุดการทดลอง P1	3		24.10	
ชุดการทดลอง C2	3		26.55	26.55
ชุดการทดลอง C1	3			28.81

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-35 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง E1	3	15.76			
ชุดการทดลอง P3	3	15.80			
ชุดการทดลอง P2	3		19.38		
ชุดการทดลอง P1	3		19.87		
ชุดการทดลอง C2	3			22.77	
ชุดการทดลอง C1	3				31.91

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

3) การทดลองการเติมสารผสมระหว่างฟอสเฟตและอีดีทีเอในการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในกาก
 โลหกรรมด้วยทัญเอนเปียร์แคะร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้า

ตารางที่ ข-36 การกร่อนของขั้วแอโนดในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน
 Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 15 วัน	3	2.40			
เวลา 30 วัน	3		6.37		
เวลา 45 วัน	3			8.55	
เวลา 60 วัน	3				11.17

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-37 การกร่อนของขั้วแอโนดในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน
 Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง E1	3	2.11	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	2.40	
ชุดการทดลอง C2	3	2.81	
ชุดการทดลอง P2	3	3.08	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง P2	3	4.48	
ชุดการทดลอง E1	3	5.15	5.15
ชุดการทดลอง P2-E1	3	6.37	6.37
ชุดการทดลอง C2	3		7.47

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-37 การกร่อนของข้าวแอนดในแต่ระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)
Duncan^a

เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P2	3	6.16	
ชุดการทดลอง C2	3	8.13	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	8.55	
ชุดการทดลอง E1	3	8.61	
เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C2	3	6.27	11.17
ชุดการทดลอง P2	3	6.69	
ชุดการทดลอง E1	3	7.82	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-38 ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	8.30	10.92
เวลา 45 วัน	3	9.06	
เวลา 15 วัน	3	9.14	
เวลา 30 วัน	3		

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-39 ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	9.14	
ชุดการทดลอง P2	3	12.98	
ชุดการทดลอง C1	3	14.60	
ชุดการทดลอง C2	3	15.99	
ชุดการทดลอง E1	3	16.07	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C1	3	5.02	
ชุดการทดลอง P2	3	7.43	7.43
ชุดการทดลอง C2	3		9.75
ชุดการทดลอง E1	3		9.75
ชุดการทดลอง P2-E1	3		10.92
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C1	3	4.96	
ชุดการทดลอง P2	3	5.39	
ชุดการทดลอง C2	3	6.56	6.56
ชุดการทดลอง E1	3	8.08	8.08
ชุดการทดลอง P2-E1	3		9.06

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-39 ปริมาณความชื้นของกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C2	3	5.37	
ชุดการทดลอง C1	3	5.86	
ชุดการทดลอง P2	3	6.43	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		8.30
ชุดการทดลอง E1	3		9.37

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-40 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^{a,b}

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 60 วัน	3	65.03	
เวลา 45 วัน	3	65.06	
เวลา 30 วัน	3	65.08	
เวลา 15 วัน	3	65.23	
เวลา 0 วัน (เริ่มต้น)	5		66.61

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.261

^b The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

ตารางที่ ข-41 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05
		1
ชุดการทดลอง P2	3	62.95
ชุดการทดลอง C2	3	64.01
ชุดการทดลอง E1	3	64.29
ชุดการทดลอง C1	3	64.76
ชุดการทดลอง P2-E1	3	65.23
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05
		1
ชุดการทดลอง E1	3	63.83
ชุดการทดลอง P2	3	64.24
ชุดการทดลอง C1	3	64.48
ชุดการทดลอง P2-E1	3	65.08
ชุดการทดลอง C2	3	65.59
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05
		1
ชุดการทดลอง P2	3	63.09
ชุดการทดลอง C2	3	64.19
ชุดการทดลอง C1	3	64.33
ชุดการทดลอง E1	3	64.60
ชุดการทดลอง P2-E1	3	65.06

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-41 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในกากโลหะกรรมในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง P2	3	62.69	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		65.03
ชุดการทดลอง E1	3		65.05
ชุดการทดลอง C2	3		65.20
ชุดการทดลอง C1	3		65.62

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-42 มวลชีวภาพส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
เวลา 30 วัน	3		1.33
เวลา 45 วัน	3		1.44
เวลา 60 วัน	3		1.55
เวลา 15 วัน	3		1.97

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-43 มวลชีวภาพส่วนใต้กอกโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.97		
ชุดการทดลอง C1	3	2.68	2.68	
ชุดการทดลอง C2	3		3.06	
ชุดการทดลอง E1	3		3.27	
ชุดการทดลอง P2	3		3.46	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.33		
ชุดการทดลอง E1	3		3.57	
ชุดการทดลอง P2	3		3.63	
ชุดการทดลอง C2	3			4.70
ชุดการทดลอง C1	3			4.82
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.44		
ชุดการทดลอง C2	3		3.25	
ชุดการทดลอง E1	3		3.58	
ชุดการทดลอง C1	3		3.64	
ชุดการทดลอง P2	3		4.28	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-43 มวลชีวภาพส่วนใต้กากลอหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.55		
ชุดการทดลอง E1	3		4.14	
ชุดการทดลอง C1	3		4.87	4.87
ชุดการทดลอง P2	3			5.14
ชุดการทดลอง C2	3			5.29

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-44 มวลชีวภาพส่วนเหนือกากลอหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	2.94	
เวลา 45 วัน	3	3.32	
เวลา 30 วัน	3	3.38	
เวลา 60 วัน	3		4.78

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-45 มวลชีวภาพส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง E1	3	2.42			
ชุดการทดลอง P2-E1	3	2.94			
ชุดการทดลอง C2	3	3.01			
ชุดการทดลอง P2	3		3.77		
ชุดการทดลอง C1	3		4.36		
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	3.38			
ชุดการทดลอง E1	3		5.21		
ชุดการทดลอง P2	3		6.02		
ชุดการทดลอง C1	3			8.18	
ชุดการทดลอง C2	3			8.22	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	3.32			
ชุดการทดลอง E1	3		5.20		
ชุดการทดลอง P2	3			7.17	
ชุดการทดลอง C2	3			7.23	
ชุดการทดลอง C1	3				8.60

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-45 มวลชีวภาพส่วนเนื้อกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	4.78			
ชุดการทดลอง E1	3		7.74		
ชุดการทดลอง P2	3			9.16	
ชุดการทดลอง C2	3				10.66
ชุดการทดลอง C1	3				11.44

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-46 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนได้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05
		1
เวลา 15 วัน	3	5.03
เวลา 45 วัน	3	5.20
เวลา 60 วัน	3	5.36
เวลา 30 วัน	3	5.94

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-47 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	5.03		
ชุดการทดลอง C1	3	5.07		
ชุดการทดลอง E1	3	5.92		
ชุดการทดลอง P2	3	7.16	7.16	
ชุดการทดลอง C2	3		8.47	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง E1	3	5.78		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	5.94		
ชุดการทดลอง C2	3	6.51		
ชุดการทดลอง P2	3	6.60		
ชุดการทดลอง C1	3		9.09	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	5.20		
ชุดการทดลอง E1	3	6.25	6.25	
ชุดการทดลอง P2	3		7.61	7.61
ชุดการทดลอง C1	3			8.89
ชุดการทดลอง C2	3			9.11

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-47 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	5.36		
ชุดการทดลอง E1	3	6.08	6.08	
ชุดการทดลอง P2	3		7.38	
ชุดการทดลอง C2	3			9.53
ชุดการทดลอง C1	3			10.45

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-48 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	
เวลา 30 วัน	3	1.08	
เวลา 15 วัน	3	1.14	
เวลา 60 วัน	3	1.45	
เวลา 45 วัน	3	1.69	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-49 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเนื้อกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.91		
ชุดการทดลอง C2	3	1.02	1.02	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.14	1.14	
ชุดการทดลอง P2	3		1.57	
ชุดการทดลอง E1	3			2.17
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.08		
ชุดการทดลอง E1	3	1.25		
ชุดการทดลอง C1	3	1.32		
ชุดการทดลอง C2	3		1.59	
ชุดการทดลอง P2	3		1.68	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง C1	3	1.11		
ชุดการทดลอง C2	3	1.51	1.51	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		1.69	
ชุดการทดลอง P2	3		1.74	
ชุดการทดลอง E1	3		1.96	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-49 ระดับความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเนื้อกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง C1	3	1.31			
ชุดการทดลอง P2-E1	3	1.45	1.45		
ชุดการทดลอง C2	3		1.67		
ชุดการทดลอง E1	3			2.27	
ชุดการทดลอง P2	3				2.62

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-50 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05
		1
เวลา 45 วัน	3	0.0074
เวลา 30 วัน	3	0.0076
เวลา 60 วัน	3	0.0083
เวลา 15 วัน	3	0.0098

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-51 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระใน
แต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0098			
ชุดการทดลอง C1	3	0.0136			
ชุดการทดลอง E1	3	0.0191	0.0191		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0243		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0265		
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0076			
ชุดการทดลอง E1	3		0.0207		
ชุดการทดลอง P2	3		0.0240	0.0240	
ชุดการทดลอง C2	3			0.0305	
ชุดการทดลอง C1	3				0.0441
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0074			
ชุดการทดลอง E1	3		0.0225		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0296	0.0296	
ชุดการทดลอง C1	3			0.0319	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0319	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-51 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระใน
แต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0083			
ชุดการทดลอง E1	3		0.0250		
ชุดการทดลอง P2	3			0.0377	
ชุดการทดลอง C2	3				0.0503
ชุดการทดลอง C1	3				0.0509

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-52 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 15 วัน	3	0.0034	
เวลา 30 วัน	3	0.0037	
เวลา 45 วัน	3	0.0056	0.0056
เวลา 60 วัน	3		0.0069

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-53 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง C2	3	0.0031			
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0034			
ชุดการทดลอง C1	3	0.0040	0.0040		
ชุดการทดลอง E1	3		0.0052	0.0052	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0058	
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0037			
ชุดการทดลอง E1	3		0.0065		
ชุดการทดลอง P2	3			0.0101	
ชุดการทดลอง C1	3			0.0107	0.0107
ชุดการทดลอง C2	3				0.0130
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0056			
ชุดการทดลอง C1	3		0.0095		
ชุดการทดลอง E1	3		0.0101	0.0101	
ชุดการทดลอง C2	3		0.0109	0.0109	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0125	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-53 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้อกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0069		
ชุดการทดลอง C1	3		0.0149	
ชุดการทดลอง E1	3		0.0175	
ชุดการทดลอง C2	3		0.0179	
ชุดการทดลอง P2	3			0.0240

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-54 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของสารหนู (BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการ
 ทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05
		1
เวลา 15 วัน	3	0.0771
เวลา 45 วัน	3	0.0799
เวลา 60 วัน	3	0.0825
เวลา 30 วัน	3	0.0912

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-55 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0771		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0783		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0919	0.0919	
ชุดการทดลอง P2	3		0.1136	0.1136
ชุดการทดลอง C2	3			0.1324
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	
ชุดการทดลอง E1	3	0.0907		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0912		
ชุดการทดลอง C2	3	0.0993		
ชุดการทดลอง P2	3	0.1027		
ชุดการทดลอง C1	3		0.1409	
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0799		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0966		
ชุดการทดลอง P2	3		0.1202	
ชุดการทดลอง C1	3		0.1379	0.1379
ชุดการทดลอง C2	3			0.1420

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-55 ปริมาณของสารหนูสะสมในส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0825	0.1178	0.1461
ชุดการทดลอง E1	3	0.0935		
ชุดการทดลอง P2	3			
ชุดการทดลอง C2	3			0.1461
ชุดการทดลอง C1	3			0.1592

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-56 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเนื้ออกากโลหกรรม (BAF) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05
		1
เวลา 30 วัน	3	0.0166
เวลา 15 วัน	3	0.0174
เวลา 60 วัน	3	0.0223
เวลา 45 วัน	3	0.0260

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-57 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (BAF) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.0142		
ชุดการทดลอง C2	3	0.0159		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0174	0.0174	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0249	
ชุดการทดลอง E1	3			0.0337
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0166		
ชุดการทดลอง E1	3	0.0196		
ชุดการทดลอง C1	3	0.0204	0.0204	
ชุดการทดลอง C2	3		0.0242	0.0242
ชุดการทดลอง P2	3			0.0261
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.0173		
ชุดการทดลอง C2	3	0.0235	0.0235	
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0260	0.0260	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0277	
ชุดการทดลอง E1	3		0.0303	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-57 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (BAF) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง C1	3	0.0200			
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0223	0.0223		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0257		
ชุดการทดลอง E1	3			0.0349	
ชุดการทดลอง P2	3				0.0418

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-58 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม
 (TF) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
เวลา 30 วัน	3	0.1869	
เวลา 15 วัน	3	0.2282	0.2282
เวลา 60 วัน	3	0.2797	0.2797
เวลา 45 วัน	3		0.3238

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-59 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (TF) ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C2	3	0.1217		
ชุดการทดลอง C1	3	0.1813	0.1813	
ชุดการทดลอง P2	3		0.2246	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		0.2282	
ชุดการทดลอง E1	3			0.3694
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.1450		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.1869	0.1869	
ชุดการทดลอง E1	3		0.2179	0.2179
ชุดการทดลอง C2	3		0.2439	0.2439
ชุดการทดลอง C2	3			0.2588
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง C1	3	0.1265		
ชุดการทดลอง C2	3	0.1661	0.1661	
ชุดการทดลอง P2	3		0.2346	0.2346
ชุดการทดลอง E1	3			0.3155
ชุดการทดลอง P2-E1	3			0.3238

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-59 ปัจจัยในการเคลื่อนย้ายสารหนูจากส่วนใต้กากโลหะกรรมขึ้นสู่ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (TF) ของหล้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05	
		1	2
ชุดการทดลอง C1	3	0.1261	
ชุดการทดลอง C2	3	0.1767	
ชุดการทดลอง P2-E1	3		0.2797
ชุดการทดลอง P2	3		0.3599
ชุดการทดลอง E1	3		0.3779

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-60 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหล้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
เวลา 60 วัน	3	0.0009		
เวลา 45 วัน	3	0.0012	0.0012	
เวลา 30 วัน	3		0.0016	
เวลา 15 วัน	3			0.0027

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-61 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลอง
เมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0027		
ชุดการทดลอง P2	3	0.0059	0.0059	
ชุดการทดลอง E1	3	0.0085	0.0085	
ชุดการทดลอง C1	3		0.0118	0.0118
ชุดการทดลอง C2	3			0.0160
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0016		
ชุดการทดลอง C2	3		0.0095	
ชุดการทดลอง E1	3		0.0107	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0123	0.0123
ชุดการทดลอง C1	3			0.0147
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0012		
ชุดการทดลอง E1	3		0.0068	
ชุดการทดลอง P2	3		0.0081	
ชุดการทดลอง C1	3			0.0115
ชุดการทดลอง C2	3			0.0123

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-61 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลอง เมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง P2-E1	3	0.0009			
ชุดการทดลอง E1	3		0.0042		
ชุดการทดลอง P2	3			0.0071	
ชุดการทดลอง C2	3				0.0106
ชุดการทดลอง C1	3				0.0111

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-62 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลอง P2-E1 ที่ระยะเวลาของการทดลองต่างกัน

Duncan^a

ชุดการทดลอง P2-E1	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
เวลา 60 วัน	3	18.72			
เวลา 45 วัน	3		22.38		
เวลา 30 วัน	3			27.92	
เวลา 15 วัน	3				33.83

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ตารางที่ ข-63 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน

Duncan^a

เวลา 15 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
ชุดการทดลอง E1	3	30.78		
ชุดการทดลอง C1	3	32.07		
ชุดการทดลอง C2	3	32.67		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	33.83		
ชุดการทดลอง P2	3	34.62		
เวลา 30 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1		
ชุดการทดลอง C2	3	26.80		
ชุดการทดลอง C1	3	26.84		
ชุดการทดลอง P2	3	27.05		
ชุดการทดลอง P2-E1	3	27.92		
ชุดการทดลอง E1	3	30.18		
เวลา 45 วัน	N	Subset of alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดการทดลอง E1	3	17.14		
ชุดการทดลอง P2	3	18.59		
ชุดการทดลอง P2-E1	3		22.38	
ชุดการทดลอง C2	3			26.55
ชุดการทดลอง C1	3			28.81

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

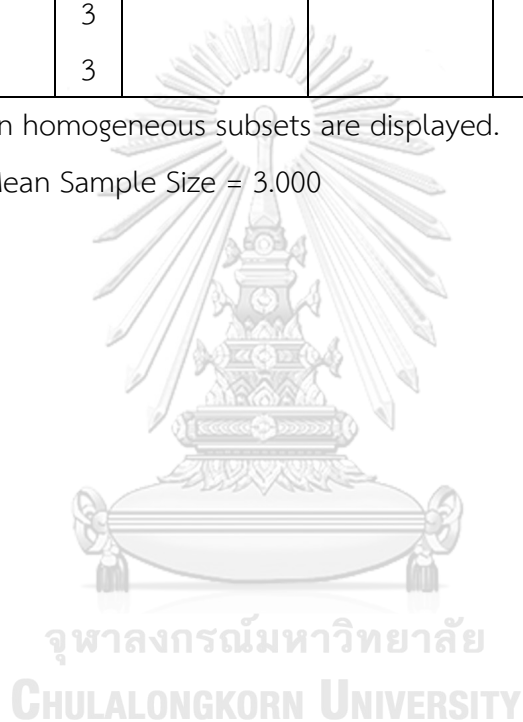
ตารางที่ ข-63 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละระยะเวลาของการทดลองเมื่อชุดการทดลองต่างกัน (ต่อ)

Duncan^a

เวลา 60 วัน	N	Subset of alpha = 0.05			
		1	2	3	4
ชุดการทดลอง E1	3	15.76			
ชุดการทดลอง P2-E1	3		18.72		
ชุดการทดลอง P2	3		19.38		
ชุดการทดลอง C2	3			22.77	
ชุดการทดลอง C1	3				31.91

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

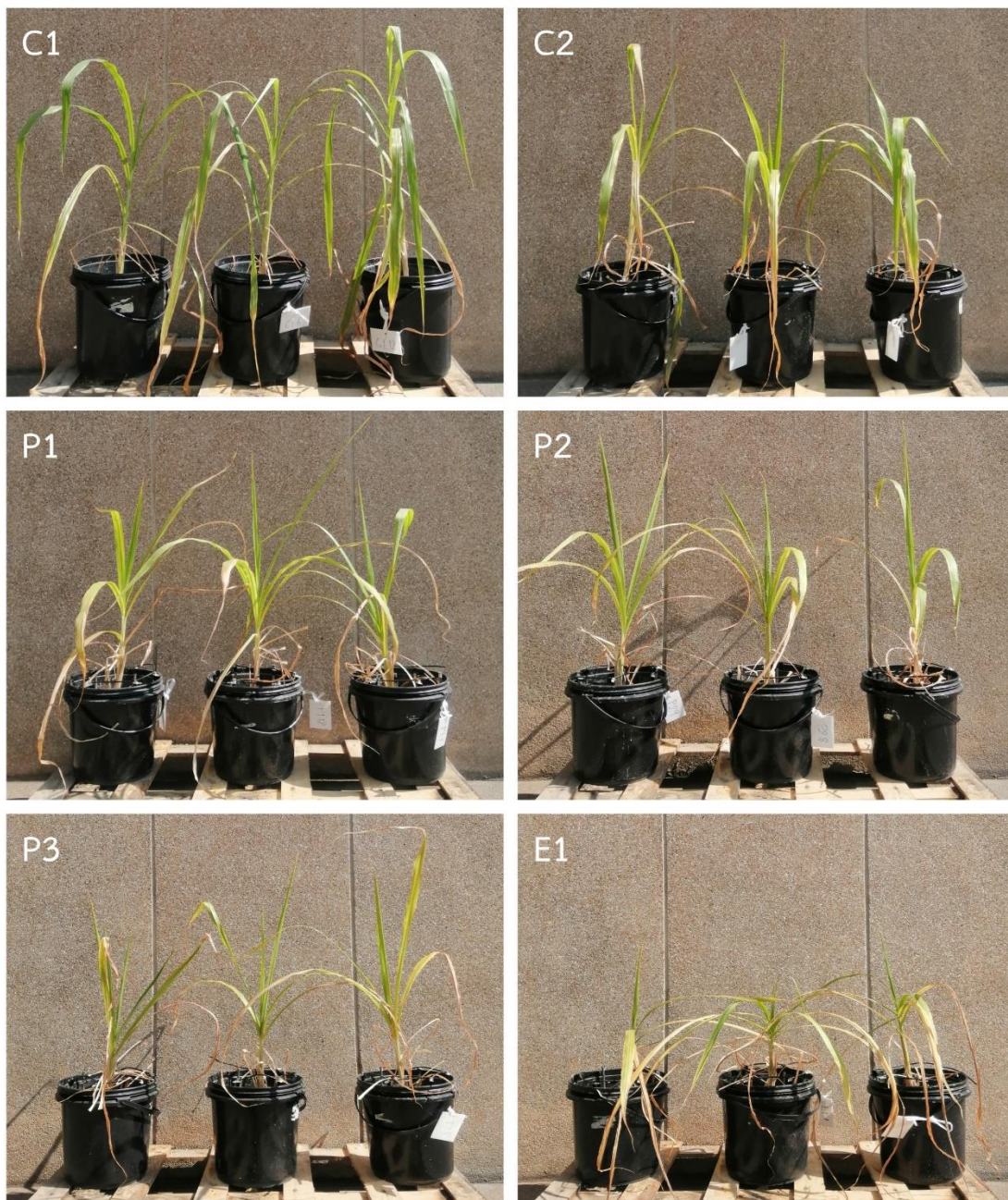
^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000



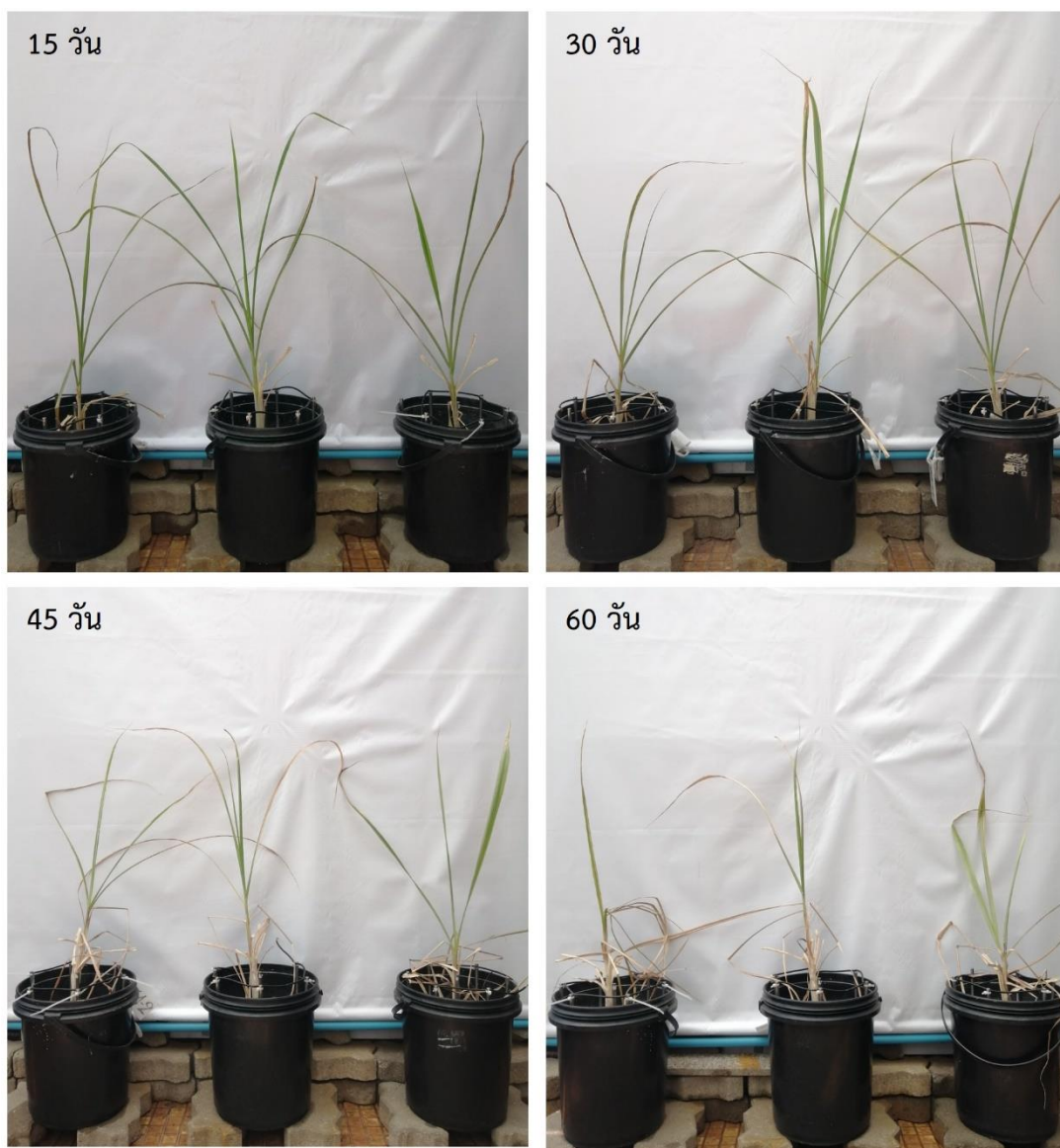
ภาคผนวก ค
รูปถ่ายหญ้าเนเปียร์แคะ



รูปที่ ค-1 การแสดงความเป็นพิษและแห้งตายของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลอง E2 และ E3



รูปที่ ค-2 หน้ำนเป็ยร์แคะเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 60 วัน ในชุดการทดลองควบคุม 1 (C1) ชุดการทดลองควบคุม 2 (C2) ชุดการทดลองสารฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้นของสารฟอสเฟต เท่ากับ 0.7 (P1), 1.4 (P2) และ 2.8 (P3) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองสารอีดีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอ เท่ากับ 2.5 (E1) มิลลิโมลต่อกิโลกรัม



รูปที่ ค-3 หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองสารผสม (P2-E1) ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน



รูปที่ ค-4 ภาวะใบเหลือง (Chlorosis) และการตายของเนื้อเยื่อ (Necrosis) ของหญ้าเนเปียร์แคระ
ที่พบในชุดการทดลอง P2-E1



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อุดมศักดิ์ บุญมีรติ
วัน เดือน ปี เกิด	18 กุมภาพันธ์ 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	- วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2554) - วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2549)
ที่อยู่ปัจจุบัน	69 ถนนสุขุขทัย วชิรพยาบาล ดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
ผลงานตีพิมพ์	- Boonmeerati, U., & Sampanpanish, P. (2022). Effect of phosphate on arsenic uptake from mine tailing by electrokinetic-assisted phytoremediation of Dwarf Napier grass. In Proceedings of The 11th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, 12 -13 May 2022. - Boonmeerati, U., & Sampanpanish, P. (2021). Enhancing arsenic phytoextraction of Dwarf Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Mott) from gold mine tailings by electrokinetics remediation with phosphate and EDTA. <i>Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste</i> , 25(4), 04021027. doi:10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000633 - Boonmeerati, U., & Sampanpanish, P. (2020). Application of phosphate and EDTA on As(V) removal in gold mine tailings by electrokinetic remediation. <i>EnvironmentAsia</i> , 13(3): 1-12. doi:10.14456/ea.2020.37 - อุดมศักดิ์ บุญมีรติ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2563). การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ด้วยพืชพลังงานและกลอนศาสตร์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน. <i>วารสารสิ่งแวดล้อม</i> , ปีที่ 24 (ฉบับที่ 4).

รางวัลที่ได้รับ

- อุดมศักดิ์ บุญมีรติ. (2563) เรื่องจากปก: พืชพลังงาน...ทางเลือกใหม่
สำหรับการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมือง. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24
(ฉบับที่ 3).

- เอกชา ตนานนท์ชัย, อุดมศักดิ์ บุญมีรติ และ พันธวิศ สัมพันธ์พานิช.
(2562). แนวทางการทดสอบความเป็นพิษผลิตภัณฑ์ “เฮมพ์” จากพื้นที่
ปนเปื้อนโลหะหนัก. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 23 (ฉบับที่ 3).

- ทูน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ภาค
การศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2561 รุ่นที่ 44 ครั้งที่ 3/2562

- ทูนวิจัยจาก Faculty-Student (FAST) Team Program ภายใต้โครงการ
Lightsources for Africa, the Americas, Asia and Middle East
Project (LAAAMP) เพื่อทำวิจัยที่ระบบลำเลียงแสงของ Taiwan Photon
Source (TPS) ณ National Synchrotron Radiation Research Center
(NSRRC) ประเทศไต้หวัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY