

ผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่
ของสารหนูและแมงกานีสในภาคโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้า
เนเปียร์แคระ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Cow Manure and Acacia Wood-Derived Biochar on Phytostabilization of Arsenic and Manganese in Tailings from Goldmine with Mott Dwarf Napier grass



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการ ยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกร รมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหลู้าเนเปียร์แคระ
โดย	น.ส.อโนทัย โกวิทวิวัฒน์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมย์ม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)	

อโนทัย โกวิทย์วิวัฒน์ : ผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ. (Effects of Cow Manure and Acacia Wood-Derived Biochar on Phytostabilization of Arsenic and Manganese in Tailings from Goldmine with Mott Dwarf Napier grass) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. พันธวีศ สัมพันธ์พานิช

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัว และถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนู และแมงกานีสในกากโลหกรรมปนเปื้อนจากบ่อกักเก็บกากโลหกรรม บริเวณพื้นที่ศึกษากวางแห่งแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระในโรงเรือนทดลอง โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ) 2) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก 3) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ 4) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 วัน เป็นระยะเวลา 120 วัน และทำการศึกษาปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดควบคุมมีการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสได้สูงที่สุดในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกากโลหกรรม และส่วนใต้กากโลหกรรมได้สูงที่สุด คิดเป็น 63.93 และ 78.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถช่วยลดการดูดซับและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด คิดเป็น 69.93 และ 72.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์การกระจายตัว และการสะสมสารหนูและแมงกานีส ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) พบว่า ไม่สามารถระบุการกระจายตัว และการสะสมสารหนูในพืชได้ เนื่องจากระดับความเข้มข้นของสารหนูในพืชนั้นต่ำเกินกว่าที่สามารถตรวจวัดได้ หากแต่หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่มีการเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีการกระจายตัว และสะสมแมงกานีส และธาตุอื่น ๆ ได้แก่ แคลเซียม เหล็ก และซัลเฟอร์ น้อยกว่าชุดควบคุม และพบการสะสมธาตุดังกล่าวในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกเป็นหลัก ผลการศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู และแมงกานีสในตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอมบอร์บซันสเปคโตรสโกปี (SR-XAS) พบว่า การเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพไม่ทำให้สารหนูและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรมเปลี่ยนรูปฟอร์มทางเคมีแต่อย่างใด จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพในการตรึงสารหนู และแมงกานีสได้ดีที่สุด ผลการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในที่ดินปนเปื้อนบริเวณพื้นที่ของการทำเหมือง และพื้นที่โดยรอบ รวมทั้งในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม ตลอดจนพื้นที่อื่น ๆ ได้อีกทั้ง เพื่อยับยั้งการเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนู และแมงกานีส ไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6087242620 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Gold mine tailings, Arsenic, Manganese, Biochar, Cow-manure, Napier grass

Anothai Kowitwiwat : Effects of Cow Manure and Acacia Wood-Derived Biochar on Phytostabilization of Arsenic and Manganese in Tailings from Goldmine with Mott Dwarf Napier grass . Advisor: Assoc. Prof. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D.

The purpose of this study was to study the effects of cow manure and acacia wood-derived biochar on the stabilization of arsenic (As) and manganese (Mn) from the contaminated mine tailings which were collected from a tailings storage pond located at a potential gold deposit area by *Pennisetum purpureum* CV. MOTT All four experimental sets including 1) control treatment, 2) cow manure treatment, 3) acacia wood-derived biochar treatment, and 4) mixed cow manure and acacia wood-derived biochar treatment were conducted in a greenhouse for 120 days. The two minerals were added by 1%, 3%, and 5% by weight. Samples were collected every 30 days for the determination of As and Mn accumulation in the aboveground (stems and leaves) and underground (roots) parts of plant. The results at the end of the treatment indicated the highest As and Mn accumulation in grown in the control set. While, the highest percentages of As and Mn stabilizations were found in plant grown in the 5% addition of acacia wood-derived biochar treatment. The accumulations of As in aboveground and underground parts of plant from this treatment were reduced by 63.93% and 76.84%, respectively. In addition, Mn accumulations in the aboveground and underground parts were also, respectively, reduced by 69.33% and 72.54%. The distribution of As in plants which was analyzed by the synchrotron radiation x-ray fluorescence spectroscopy (SR-XRF) technique could not be determined since the accumulated concentration in plants was lower than instrument detection limit. Comparing to the control set, the lower distributions and accumulations of Mn and other elements (Ca, Fe and S) were observed in plants grown in 5% addition of acacia wood-derived biochar treatment. those elements were mainly accumulated in the endodermis of plants. The results of synchrotron radiation X-ray absorption spectroscopy (SR-XAS) confirmed no significant effect of cow manure and acacia wood-derived biochar on the formation of As and Mn. Thus, it is possible to conclude that 5% of acacia wood-derived biochar can effectively stabilize As and Mn this method can be applied to remediate the contaminated mine site, tailings storage pond and vicinities. It is believed that this method could reduce the mobilization, distribution, and impacts on both As and Mn from mining site to the environment.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณามอบความรู้ ให้ความเมตตาในการชี้แนะและแนวทางในการแก้ไขปัญหาระหว่างการศึกษาระดับมหาบัณฑิต ให้ความสำคัญที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ และให้ความอนุเคราะห์ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดจนความห่วงใยและคอยไต่ถามถึงความก้าวหน้าในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งมอบประสบการณ์ในการทำงานต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในอนาคต ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมยิ้ม ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยด้าน การจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ขอขอบคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยด้านการจัดการเหมืองสีเขียว ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อศุภสิน คุณแม่อุสา โกวิทย์วิวัฒน์ และบุคคลในครอบครัวที่ให้ความสนใจและสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 เหมืองแร่ทองคำ (Gold mine)	7
2.1.1 การทำเหมืองแร่ทองคำ.....	7
2.1.2 กระบวนการสกัดทองคำ	7
2.2 โลหะหนัก (Heavy metal)	10
2.2.1 สารหนู (Arsenic).....	10
2.2.2 แมงกานีส (Manganese).....	14
2.3 เทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation).....	16
2.3.1 ความหมาย.....	16

2.3.2	กระบวนการบำบัดสารมลพิษด้วยพืช.....	16
2.3.3	ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช.....	18
2.3.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยพืช	21
2.3.5	ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก.....	23
2.3.6	ข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช	25
2.4	หญ้าสกุลเนเปียร์ (Napier grass).....	27
2.4.1	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหญ้าเนเปียร์	28
2.4.2	คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์ ประกอบด้วย.....	29
2.4.3	ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์	29
2.4.4	วิธีการปลูกหญ้าเนเปียร์	30
2.4.5	หญ้าเนเปียร์ในฐานะที่เป็นพืชพลังงาน.....	31
2.5	ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic fertilizer).....	33
2.5.1	ความหมายของปุ๋ยอินทรีย์	33
2.5.2	สมบัติของปุ๋ยอินทรีย์.....	33
2.5.3	ประเภทของปุ๋ยอินทรีย์	34
2.5.4	ข้อดีและข้อจำกัดของปุ๋ยอินทรีย์.....	35
2.6	ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	36
2.6.1	ความหมาย.....	36
2.6.2	สมบัติของถ่านชีวภาพ	36
2.6.3	การผลิตถ่านชีวภาพ	37
2.6.4	วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ	39
2.6.5	ข้อดีและข้อจำกัดของถ่านชีวภาพ	43
2.7	การดูดซับ (Adsorption).....	44
2.7.1	ประเภทของการดูดซับ.....	45

2.7.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	45
2.7.3	กลไกการดูดซับ.....	47
2.8	แสงซินโครตรอน (Synchrotron).....	49
2.8.1	ความหมายของแสงซินโครตรอน.....	49
2.8.2	วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน.....	54
2.8.3	ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน.....	55
2.8.4	ระบบลำแสง BL1.1W: MXT.....	56
2.8.5	ระบบลำแสง BL6b: Micro-XRF.....	58
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
2.9.1	งานวิจัยด้านการศึกษาปุ๋ยคอก.....	61
2.9.2	งานวิจัยด้านการศึกษาถ่านชีวภาพ.....	63
2.9.3	งานวิจัยด้านการศึกษาหญ้าเนเปียร์.....	67
2.9.4	งานวิจัยด้านการศึกษการย่อยสลายของถ่านชีวภาพ.....	69
2.9.5	งานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน.....	69
บทที่ 3	วิธีการทดลอง.....	72
3.1	การทบทวนเอกสาร.....	72
3.2	สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	72
3.3	วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	72
3.3.1	วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงเรือนทดลอง.....	72
3.3.2	วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหกรรม.....	73
3.3.3	วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ.....	73
3.3.4	เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ.....	74
3.3.5	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	74
3.4	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	75

3.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส.....	75
3.4.2 การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัว และถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ สารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม	75
3.4.3 การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ	80
3.4.4 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ.....	81
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	82
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์การทดลอง	83
4.1 ผลของการทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส.....	83
4.1.1 สารหนู	83
4.1.2 แมงกานีส	84
4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรม ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ.....	84
4.2.1 กากโลหกรรม	84
4.2.2 ปุ๋ยคอก.....	85
4.2.3 ถ่านชีวภาพ	86
4.3 ผลของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพต่อสมบัติของกากโลหกรรม.....	90
4.3.1 ความเป็นกรด-ด่าง	90
4.3.2 การนำไฟฟ้า.....	91
4.3.3 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหกรรม.....	92
4.4 การเจริญเติบโตและการแสดงความเป็นพิษของพืช.....	96
4.4.1 ปุ๋ยคอก.....	96
4.4.2 ถ่านชีวภาพ	97
4.4.3 ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ.....	98
4.5 ผลของการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสในพืช	102
4.5.1 ปุ๋ยคอก.....	102

4.5.2	ถ่านชีวภาพ	105
4.5.3	ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ.....	107
4.6	ประสิทธิภาพของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพในการตรึงสารหนูและแมงกานีสด้วยหญ้าเนเปียร์ แคระ	115
4.7	ผลของการสะสมสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม	117
4.8	สมดุลมวล (Mass balance).....	119
4.9	การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ	119
4.9.1	ปุ๋ยคอก.....	119
4.9.2	ถ่านชีวภาพ	120
4.10	การกระจายตัว และสะสมของสารหนูและแมงกานีสในพืช	121
4.11	รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในพืช และกากโลหกรรม.....	128
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	133
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	133
5.1.1	การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทำการทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส.....	133
5.1.2	การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ สารหนูและแมงกานีส ในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	133
5.1.3	การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ.....	134
5.1.4	การศึกษาการกระจายตัว การสะสม และรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสใน ตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม โดยใช้เทคนิคระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron)..	134
5.2	ข้อเสนอแนะ	136
ภาคผนวก	137
ภาคผนวก ก	สถานที่ดำเนินการทดลอง	138
ภาคผนวก ข	วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	142
ภาคผนวก ค	การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	174

ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลการทดลอง.....	178
ภาคผนวก จ ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนู และแมงกานีส.....	196
บรรณานุกรม.....	197
ประวัติผู้เขียน.....	211



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา	5
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในการทำเหมืองแร่ทองคำ.....	9
รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารโลหะหนักด้วยพืช	18
รูปที่ 2.3 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) ก) การสกัดสารมลพิษ ด้วยพืช (Phytoextraction) ข) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration) ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation) จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation) และ ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization).....	22
รูปที่ 2.4 หญ้าเนเปียร์แคระ (<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Mott) ก) ลักษณะลำต้นทั้งหมดของ หญ้าเนเปียร์แคระ ข) ลักษณะกอของหญ้าเนเปียร์แคระ ค) ลักษณะลำต้นของหญ้า เนเปียร์แคระ และ ง) ลักษณะรากของหญ้าเนเปียร์แคระ	28
รูปที่ 2.5 วิธีการปลูกหญ้าเนเปียร์	30
รูปที่ 2.6 เตาเผาถ่านชีวภาพ	38
รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการเผาถ่านชีวภาพ.....	40
รูปที่ 2.8 การจำแนกลักษณะสายพันธุ์ของกระถินยักษ์ ก) พันธุ์ฮาวาย ข) พันธุ์ซัลวาเดอร์ และ ค) พันธุ์เปรู	41
รูปที่ 2.9 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกระถินยักษ์ ก) ลักษณะลำต้นของกระถินยักษ์ ข) ลักษณะ ใบของกระถินยักษ์ ค) ลักษณะผลของกระถินยักษ์ และ ง) ลักษณะดอกของ กระถินยักษ์.....	42
รูปที่ 2.10 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ.....	44
รูปที่ 2.11 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)	50
รูปที่ 2.12 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator)	51
รูปที่ 2.13 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron)	51

รูปที่ 2.14 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring).....	52
รูปที่ 2.15 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines).....	53
รูปที่ 2.16 ช่วงของแสงซินโครตรอน (Synchrotron light).....	53
รูปที่ 2.17 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines).....	55
รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ทางเลนส์ (Optic) ของระบบลำเลียงแสงที่ 1.1W	58
รูปที่ 2.19 สัญญาณสเปกตรัมของการใช้แสงซินโครตรอน.....	58
รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดการเรืองของรังสีเอกซ์.....	59
รูปที่ 2.21 แผนผังของระบบลำเลียงแสงที่ 6 สำหรับเทคนิค Micro-XRF และ DXL	60
รูปที่ 2.22 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำเลียงแสงที่ 6.....	60
รูปที่ 2.23 สถานีทดลอง Micro-XRF ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม	61
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นที่ผิวและธาตุต่าง ๆ ของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ.....	88
รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของปุ๋ยคอก	89
รูปที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพ.....	89
รูปที่ 4.4 ความเป็นกรด-ด่างในกากโลหะกรรม ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติม ถ่านชีวภาพ และ ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ	93
รูปที่ 4.5 การนำไฟฟ้าในกากโลหะกรรม ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติมถ่าน ชีวภาพ และ ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ	94
รูปที่ 4.6 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรม ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับ ถ่านชีวภาพ.....	95
รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ	99
รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก	99
รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ.....	100
รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับ ถ่านชีวภาพ	100
รูปที่ 4.11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระ	102
รูปที่ 4.12 ผลของปุ๋ยคอกต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	104

รูปที่ 4.13 ผลของปุ๋ยคอกต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ	104
รูปที่ 4.14 ผลของถ่านชีวภาพต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ	106
รูปที่ 4.15 ผลของถ่านชีวภาพต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ	107
รูปที่ 4.16 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	108
รูปที่ 4.17 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	109
รูปที่ 4.18 ผลของปุ๋ยคอกต่อปริมาณการสะสมสารหนูต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์ แคระ	112
รูปที่ 4.19 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมสารหนูต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	112
รูปที่ 4.20 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมสารหนูต่อน้ำหนักทั้งต้นของ หญ้าเนเปียร์แคระ	113
รูปที่ 4.21 ผลของปุ๋ยคอกต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	113
รูปที่ 4.22 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	114
รูปที่ 4.23 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของ หญ้าเนเปียร์แคระ	114
รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การลดลงของการสะสมสารหนูและแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์ แคระ.....	116
รูปที่ 4.25 การย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ	121
รูปที่ 4.26 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนรากของหญ้าเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม) ก) ส่วนรากของหญ้าเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์	123

รูปที่ 4.27 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม)	
ก) ส่วนลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม	
ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซิลเฟอร์.....	124
รูปที่ 4.28 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม)	
ก) ส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม	
จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซิลเฟอร์	125
รูปที่ 4.29 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนรากของหญ้าเนเปียร์แคระในชุด	
การทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ	
ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ	
ฉ) ธาตุซิลเฟอร์	126
รูปที่ 4.30 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระในชุด	
การทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ	
ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ	
ฉ) ธาตุซิลเฟอร์	127
รูปที่ 4.31 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระในชุด	
การทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ	
ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ	
ฉ) ธาตุซิลเฟอร์	128
รูปที่ 4.32 รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู ก) สารมาตรฐาน ข) กากโลหะกรรมของแต่ละชุดการทดลอง	
ค) ชุดทดลองกากโลหะกรรมที่เติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับสาร	
มาตรฐาน ง) กากโลหะกรรมชุดควบคุม และกากโลหะกรรมชุดทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ	
5 เปอร์เซ็นต์ จ) กากโลหะกรรมชุดควบคุมเทียบกับสารมาตรฐาน และ ฉ) กากโลหะกรรม	
เทียบกับสารมาตรฐาน	131
รูปที่ 4.33 รูปฟอร์มทางเคมีของแมงกานีส ก) สารมาตรฐาน ข) หญ้าเนเปียร์แคระในส่วนเหนือกาก	
โลหะกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) ของชุดควบคุม ค) หญ้าเนเปียร์	
แคระในส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) ของชุดควบคุมเทียบกับสารมาตรฐาน	
ง) หญ้าเนเปียร์แคระในส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม	

(ราก) เทียบกับสารมาตรฐาน จ) หย้าเนเปียร์แคระในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของแต่ละชุดการทดลอง ฉ) กากโลหกรรมของแต่ละชุดการทดลอง ช) กากโลหกรรมของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพเทียบกับสารมาตรฐาน (MnO_2 และ $MnSO_4$) และ ซ) กากโลหกรรมของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพเทียบกับสารมาตรฐาน (Mn_2O_3 และ $MnCO_3$)..... 132



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และกากโลหกรรม 85

ตารางที่ 4.2 ปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสในกากโลหกรรม..... 118

ตารางที่ 4.3 การย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ..... 120



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม รวมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ในปัจจุบัน มักก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนสารโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม อาทิ ดิน ตะกอนท้องน้ำ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน อันส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรง และทางอ้อมต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ โดยเฉพาะกิจกรรมการทำเหมืองแร่ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม เช่น กระบวนการทำเหมืองแร่ทองคำ มักมีของเสียเกิดขึ้นทั้งในรูปของกากโลหะกรรมหรือหางแร่ น้ำเสียจากกระบวนการผลิต รวมทั้งกองเศษดิน หิน ทราจจากการขุดสินแร่ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีโลหะหนักหลากหลายชนิดที่เกิดร่วมกันโดยธรรมชาติ และเมื่อมีการขุดสินแร่ออกมาจึงเป็นสาเหตุหนึ่งในการกระตุ้นให้สารโลหะหนักดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อม ประกอบกับเกิดการชะล้างจากน้ำฝนและ/หรือการรั่วซึมจากบ่อกักเก็บกากโลหะกรรม ส่งผลให้มีการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่เหมืองและบริเวณโดยรอบของการทำเหมืองแร่ทองคำมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาดินและบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมมีการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด อาทิ สารหนู แมงกานีส ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นต้น (Kiventera et al., 2018; Sevilla-Perea et al., 2016) ทำให้พื้นที่ไม่สามารถใช้เพาะปลูกหรือทำการเกษตรได้ และส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง ส่วนบ่อกักเก็บกากโลหะกรรมที่มีการปนเปื้อนอาจมีการรั่วซึมออกสู่พื้นที่โดยรอบเหมืองและสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งนี้ หากโลหะหนักดังกล่าวเกิดการปนเปื้อนและเข้าสู่ร่างกายอาจทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ ซึ่งมนุษย์สามารถได้รับสารมลพิษดังกล่าวเข้าสู่ร่างกายผ่านทางหายใจ การรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนัง (Jaishankar et al., 2014) โดยเฉพาะการได้รับสารหนูติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดโรคมะเร็งปอด มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ และมะเร็งผิวหนัง รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์และมีฤทธิ์ต่อการกลายพันธุ์ และเมื่อได้รับสารหนูในปริมาณสูงที่ระดับ 70-80 มิลลิกรัม อาจทำให้เสียชีวิตได้ สำหรับแมงกานีสเมื่อได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจส่งผลต่อระบบประสาทมากที่สุด โดยเฉพาะระบบประสาทจะถูกทำลาย และพฤติกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เคลื่อนไหวช้า กระตุก และไม่สามารถพูดได้ชัดเจนอย่างปกติ เป็นต้น และถ้าอยู่ในระยะรุนแรงจะมีอาการคล้ายคนเป็นโรคพาร์กินสัน (Parkinsonism) เป็นต้น (Nak-ai et al., 2018)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในดินมีวิธีการบำบัดหลายวิธี ได้แก่ การใช้วิธีทางเคมีและกายภาพ (Chemical/physical treatment) และวิธีทางชีวภาพ (Biological treatment) โดยเฉพาะการใช้พืชสีเขียวที่มีชีวิต (Green plants) หรือที่เรียกว่า การบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) เป็นแนวคิดในการใช้พืชบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อลดการกระจายตัว

ของสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนยุ่งยาก และคาดว่าจะมีค่าใช้จ่ายน้อยในการจัดการ (Khalid et al., 2017) อีกทั้งเป็นวิธีการที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติของพืชที่ดูดดึงธาตุต่าง ๆ รวมทั้งสารโลหะหนักและสารมลพิษที่อยู่ในดินเข้าสู่พืช โดยหนึ่งในเทคโนโลยีของการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชที่คาดว่าจะสามารถจัดการได้ในงานวิจัยนี้ คือ การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) เป็นกระบวนการลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน ตะกอนท้องน้ำ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน รวมทั้งบ่งกักเก็บกากโลหะกรรมวิธีการนี้ยังเป็นการตรึงและยึดสารมลพิษไว้ที่รากพืช (Root zone) ไม่ให้ลำเลียงเข้าสู่ลำต้นและใบพืชได้ ทำให้สารมลพิษต่าง ๆ ภายในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร และเกิดการตกตะกอน ด้วยการใส่สารบางชนิดลงไปเพื่อทำให้เกิดการจับหรือตรึงกับโลหะหนัก (Bolan et al., 2011; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

การศึกษาครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ปุ๋ยคอกมูลวัว (Cow manure) และถ่านชีวภาพจากไม้กระถิน (Acacia wood-derived biochar) เพื่อใช้ในการลดการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมือง เนื่องจากสมบัติของปุ๋ยคอกที่ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุ มีการแลกเปลี่ยนไอออนสูง จึงทำให้มีสมบัติในการดูดซับโลหะหนักได้ดี นอกจากนี้ยังช่วยปรับโครงสร้างและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Ali et al., 2019; Elouear et al., 2016) และสมบัติของถ่านชีวภาพที่สามารถมีการแลกเปลี่ยนไอออน มีปริมาณคาร์บอน ปริมาณรูพรุน พื้นที่ผิว และความเป็นกรด-ด่างสูง (Hamid et al., 2020; Khan et al., 2017) โดยพืชที่เลือกทำการศึกษาในครั้งนี้คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) เป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี จัดเป็นพืชอาหารสัตว์ และพืชพลังงานที่ให้ค่าความร้อนสูงสามารถนำไปเผาได้โดยตรง หรือนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (Ana et al., 2017; Deshmukh et al., 2015b) นอกจากนี้ยังพบว่า การนำหญ้าเนเปียร์มาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง และเมื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์กับวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ อาทิ ปาล์มน้ำมัน และมันสำปะหลัง พบว่า หญ้าเนเปียร์มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และให้ผลผลิตตลอดทั้งปี (Sawasdee and Pisutpaisal, 2014) ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้คาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ดินปนเปื้อนบริเวณพื้นที่ของการทำเหมืองและพื้นที่โดยรอบ รวมทั้งในพื้นที่บ่งกักเก็บกากโลหะกรรม ตลอดจนพื้นที่อื่น ๆ ได้ อีกทั้งเพื่อยับยั้งการเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนู และแมงกานีสไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับและสะสมของสารหนูและแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 เมื่ออัตราส่วนของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินเพิ่มขึ้น สามารถลดการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรมไปยังส่วนเหนือกากโลหกรรมได้เพิ่มขึ้น

1.3.2 ปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินมีความสามารถในการตรึงสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมได้แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระ สำหรับขอบเขตการศึกษานี้สามารถแสดงได้โดยสรุปดัง **Error! Reference source not found.** ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1.4.1 กากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีส มาจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยทำการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรมมาทำการศึกษาในโรงเรือนทดลองชั้น 2 ของอาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4.2 พืชที่ใช้ในการศึกษา คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) โดยใช้ท่อนพันธุ์จากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ อำเภอบางบาล จังหวัดนครราชสีมา โดยคัดเลือกพืชทดลองที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน และมีความสมบูรณ์แข็งแรง

1.4.3 ปุ๋ยคอกที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ ปุ๋ยคอกที่ทำมาจากมูลวัว โดยนำมาจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี

1.4.4 ถ่านชีวภาพที่นำมาใช้ คือ ถ่านชีวภาพที่ทำจากไม้กระถิน (*Leucocephala glauca* Benth.) โดยเตรียมจากลำต้นของต้นกระถิน และผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยได้รับความอนุเคราะห์เตาเผาจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

1.4.5 อัตราส่วนของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินที่ใช้ในการศึกษา คือ 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (% w/w)

1.4.6 ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ สารหนูและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในกากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำ

1.4.7 ทำการศึกษาปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก)

1.4.8 การศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยการบันทึกน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของพืช ทุก ๆ 30 วัน ของการทดลอง

1.4.9 ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา คือ 120 วัน (4 เดือน) โดยทำการเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหะกรรมทุก ๆ 30 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง คือ ในวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน

1.4.10 การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ โดยการบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 30 วันของการทดลอง

1.4.11 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสที่สะสมในกากโลหะกรรมและพืช ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออปติคอลอีมิตชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; ICP-OES)

1.4.12 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยวิเคราะห์การสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Micro-X-ray fluorescence) และวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างกากโลหะกรรมด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี (X-ray absorption spectroscopy; XAS) โดยใช้ระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation)



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพที่มีต่อการเจริญเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.5.2 เข้าใจกลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.5.1 ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดความเสี่ยงของการกระจายโลหะหนักเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนู และแมงกานีสจริงได้

1.5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาดิน และกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีสด้วยพืช



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหมืองแร่ทองคำ (Gold mine)

2.1.1 การทำเหมืองแร่ทองคำ

การทำเหมืองแร่ทองคำเป็นการขุดเอาหินที่มีแร่ทองคำปะปนอยู่ นำมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อสกัดแร่ทองคำบริสุทธิ์มาใช้ประโยชน์ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2561) โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

1) เหมืองเปิดบนหน้าดิน

การทำเหมืองแร่ทองคำแบบเหมืองเปิด เหมาะสำหรับแหล่งแร่ทองคำที่อยู่ไม่ลึกจากผิวดินมากนัก การทำเหมืองเริ่มจากการเปิดหน้าดินลงไปเรื่อยๆ จนถึงแหล่งแร่ทองคำ ซึ่งต้องใช้พื้นที่หน้าเหมืองมาก หากแหล่งแร่อยู่ในระดับที่ลึก ทำให้หน้าเหมืองจำเป็นต้องเปิดให้กว้างขึ้น เพื่อให้สะดวกและปลอดภัยในการทำเหมืองและการนำแร่ขึ้นมา การทำเหมืองแร่ในลักษณะนี้ต้องใช้เครื่องมือหนัก เช่น เครื่องเจาะ รถขุด รถตัก รถขนแร่ขนาดใหญ่ ตลอดจนถึงมีการระเบิดบริเวณหน้าเหมืองเพื่อเข้าถึงแหล่งแร่ และทำเป็นขั้นบันไดวนลงไปหาแหล่งแร่ที่อยู่ลึกลงไป รวมทั้งใช้เป็นเส้นทางลำเลียงแร่ขึ้นมาเพื่อเข้าสู่กระบวนการแต่งแร่ต่อไป

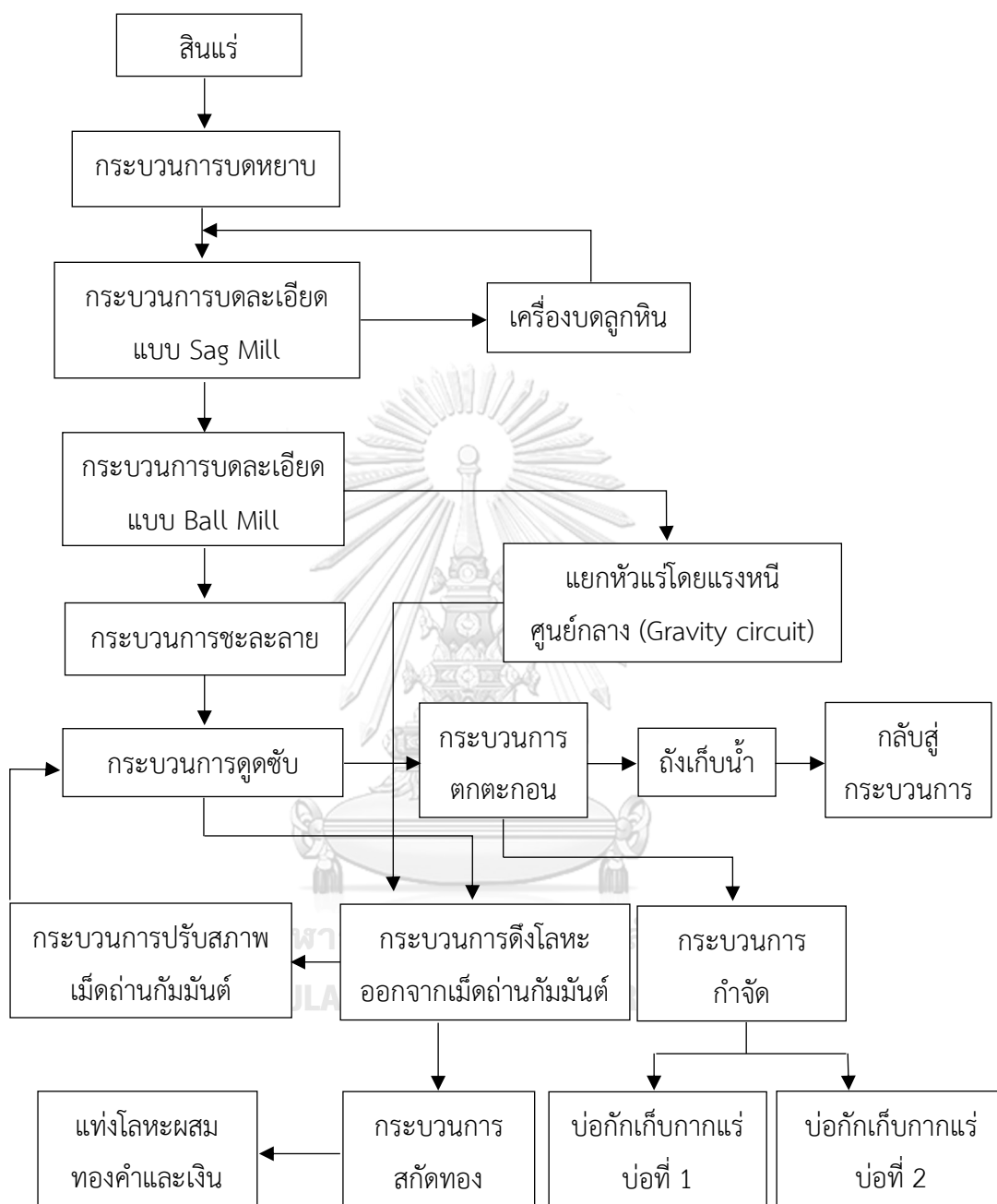
2) เหมืองอุโมงค์ใต้ดิน

การทำเหมืองแร่ทองคำแบบเหมืองใต้ดิน เหมาะสำหรับแหล่งแร่ทองคำที่อยู่ลึกจากผิวดินมาก การทำเหมืองมีการใช้พื้นที่หน้าเหมืองน้อย โดยเริ่มจากการเปิดหน้าดิน เพื่อเจาะช่องทางสำหรับเครื่องมือหนักทำงานเข้าหาแหล่งแร่ หรือทำเป็นอุโมงค์ทางเข้า หรือเส้นทางลงสู่แหล่งแร่ที่อยู่ในระดับลึกเพื่อการนำแร่ขึ้นมา เมื่อถึงแหล่งแร่ในระดับลึกแล้ว พื้นที่การทำเหมืองจะขยายกว้างออกไปทั้งในแนวราบและแนวตั้ง สำหรับการทำอุโมงค์เพื่อเข้าสู่แหล่งแร่โดยทั่วไปมี 3 แบบ คือ อุโมงค์แนวราบ อุโมงค์แนวเอียง และอุโมงค์แนวตั้ง

2.1.2 กระบวนการสกัดทองคำ

กระบวนการสกัดทองคำเริ่มจากการขุดหรือระเบิดหินที่มีแร่ทองคำ จากนั้นจะถูกลำเลียงด้วยรถบรรทุกป้อนเข้าโรงงานประกอบโลหกรรม นำสินแร่เข้าเครื่องบดหยาบเพื่อย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 10 เซนติเมตร เติมน้ำเพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง หลังจากนั้นจะทำการบดละเอียดอีกครั้งจนมีขนาดประมาณ 75 ไมครอนหรือเม็ดทรายละเอียด โดยมีตะแกรงเพื่อคัดแยกขยะ โดยวัสดุแปลกปลอมที่อยู่บนตะแกรงจะถูกส่งไปรวมกับกากโลหกรรม และทิ้งลงบ่อกักเก็บ

กากโลหกรรม ส่วนที่ผ่านตะแกรงจะปล่อยลงสู่ถังแช่สารไซยาไนด์ประมาณ 20 ชั่วโมง เพื่อให้ทองคำและเงินที่อยู่ในสินแร่ถูกชะออกมาอยู่ในสารละลาย โลหะทองคำและเงินจะถูกแยกด้วยวิธีทางเคมีโดยกระบวนการ Carbon-in-leach (CIL) คือ เติมน้ำถ่านกัมมันต์ลงไปเพื่อดูดซับทองคำและเงินไว้บนผิวของเม็ดถ่าน สารละลายทองคำและเงินที่ผิวถ่านจะถูกชะล้างออกมาด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไซยาไนด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้โลหะทองคำและเงินกลับไปอยู่ในรูปสารละลายอีกครั้ง จากนั้นเข้าสู่การแยกทองคำและเงินออกจากสารละลายด้วยกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electrowinning) กล่าวคือ โลหะทองคำและเงินจะไปจับพอกตัวอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าขั้วลบซึ่งทำด้วยแผ่นตะแกรงเหล็ก เมื่อพอกตัวได้มากในระดับหนึ่งแล้ว โลหะทองคำและเงินที่มีลักษณะคล้ายโคลนจะถูกชะล้างออกจากแผ่นตะแกรงเหล็กและนำไปหลอม พร้อมกับเติมสารเคมีที่เป็นตัวช่วยหลอม (Flux) เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนในโลหะหลอมเหลวแยกตัวออกไปเหลือเพียงโลหะทองคำและเงิน จากนั้นเทโลหะผสมที่ได้ใส่เข้าปล่อยทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นจะได้แท่งโลหะผสม ซึ่งในทางการค้าเรียกว่า Dore จากนั้นส่งไปทำให้บริสุทธิ์ (Refining) ในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้เป็นโลหะทองคำบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ และโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ดังกระบวนการผลิตในรูปที่ 2.1 และเมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้ว ทำให้เกิดส่วนที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดทองคำเรียกว่า กากโลหกรรม หรือหางแร่ (Tailings) ซึ่งหมายถึง กากแร่หรือส่วนที่เหลือจากการแต่งแร่ซึ่งไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ มักจะเป็นแร่มลทินหรือทรายที่เหลืออยู่หลังจากแยกเอาแร่ที่มีมูลค่าส่วนใหญ่ออกไปแล้ว หรือมีแร่ที่มีเปอร์เซ็นต์ต่ำมาก (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2561) ดังนั้นกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำจึงเป็นหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญของการปนเปื้อนสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่มักมีของเสียเกิดขึ้นทั้งในรูปของกากโลหกรรมหรือหางแร่ น้ำเสียจากกระบวนการผลิต รวมทั้งกองเศษดิน หิน ทรายจากการการขุดสินแร่ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีโลหะหนักหลากหลายชนิดที่เกิดขึ้นร่วมกันโดยธรรมชาติ และเมื่อมีการขุดสินแร่ออกมา ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้สารโลหะหนักดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อมและเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนในพื้นที่ ประกอบกับเกิดการชะล้างพังทลายที่มีสาเหตุมาจากน้ำฝนและ/หรือการรั่วซึมจากบ่อกักเก็บกากโลหกรรม ประเด็นดังกล่าวจึงส่งผลให้มีการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่เหมืองและบริเวณโดยรอบของการเหมืองแร่ทองคำมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาดินและบ่อกักเก็บกากโลหกรรมมีการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด อาทิ สารหนู แมงกานีส ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นต้น (สัญญาภรณ์ สุรภักดี, 2553; สิตาวิรี ธีรวิรุฬห์, 2560)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในการทำเหมืองแร่ทองคำ
ที่มา: กระทรวงสาธารณสุข (2558)

2.2 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วง 23-92 มีลักษณะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ธาตุโลหะหนักจัดเป็นพิษ (Toxic element) สามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ และถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านห่วงโซ่อาหาร (Food chain) ซึ่งจะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และบางส่วนจะสะสมอยู่ในตะกอนดิน และสามารถสะสมในพืชได้ ก่อให้เกิดมลพิษเมื่อมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อาทิ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม เหล็ก สังกะสี ปรอท และสารหนู เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

โลหะหนักแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเคมีที่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้โลหะหนักแต่ละชนิดมีความเป็นพิษแตกต่างกัน ซึ่งโลหะหนักบางชนิดมีประโยชน์ต่อพืชและสัตว์ถ้ามีในปริมาณที่น้อย เช่น แมงกานีส และสังกะสี เพราะโลหะหนักทั้ง 2 ตัว เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นของพืช แต่พืชต้องการนำไปใช้ในปริมาณน้อยเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้น การวัดระดับความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละตัวได้นั้นจะต้องวัดจากความสัมพันธ์ระหว่างการได้รับโลหะหนักเข้าไปกับอัตราการตอบสนองของพืช และขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการรับสารโลหะหนัก (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

การศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาปริมาณสารหนูและแมงกานีส ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะของความเป็นพิษที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อเข้าสู่ร่างกายหรือเกิดการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม โดยข้อมูลทั่วไปของสมบัติธาตุ และความเป็นพิษของสารหนูและแมงกานีส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 สารหนู (Arsenic)

1) ลักษณะทางกายภาพและเคมี

สารหนู (Arsenic) เป็นธาตุกึ่งโลหะ มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ As หมายเลขอะตอม 33 น้ำหนักอะตอม 74.92 กรัมต่อโมล เมื่ออยู่ในรูปธาตุบริสุทธิ์จะมีสีเทาเงิน มีมันวาว ค่อนข้างเปราะ ในสภาพที่เป็นธาตุอิสระจะไม่ละลายน้ำ แต่ถ้าอยู่ในรูปสารประกอบจะสามารถละลายน้ำได้ สารหนูโดยธรรมชาติจะอยู่ร่วมกับแร่ธาตุชนิดอื่น ๆ ส่วนใหญ่พบอยู่ร่วมกับสินแร่ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว กำมะถัน และเหล็ก สารหนูมีจุดหลอมเหลวที่ 817 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 614 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 5.727 มีเลขออกซิเดชัน คือ -3, 0, +3 และ +5 สารหนูเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 20 ของธาตุที่พบมากบนโลก สารประกอบของสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปผงหรือผลึกซึ่งไม่มีสี ไม่มีกลิ่น บางครั้งอาจอยู่ในรูปผงสีเทาดำ และผิวที่มันวาว เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนจะเป็นสีดำดำ สารประกอบสารหนูที่สำคัญ ได้แก่ อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide; As_2O_3) ซึ่งเป็นผลึกหรือผงสีขาวมีกลิ่นคล้ายกระเทียม เมื่อถูกความร้อนจะทำให้เกิดแก๊สพิษอาร์ซีน (Arsine; AsH_3)

ซึ่งเป็นแก๊สไม่มีสี มีพิษสูง และสารประกอบอาร์เซนิกไตรคลอไรด์ (Arsenic trichloride; $AsCl_3$) ที่ก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง และมะเร็งปอด เป็นต้น (ฐิตยา แซ่ปึง, 2551) สารประกอบของสารหนู (Arsenic compound) มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic compound) และสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic compound) โดยอะตอมของสารหนูที่อยู่ในสารประกอบต่าง ๆ จะมีอยู่ 2 วาเลนซ์ คือ ไตรวาเลนต์ (Trivalent หรือ 3-Valent) ซึ่งเรียกรวมสารประกอบสารหนูพวกนี้ว่า อาร์เซไนต์ (Arsenite) สัญลักษณ์ คือ As (III) และเพนตาวาเลนต์ (Pentavalent หรือ 5-Valent) ซึ่งจะเรียกรวมสารประกอบสารหนูกลุ่มนี้ว่า อาร์เซเนต (Arsenate) สัญลักษณ์ คือ As (V) สารประกอบของสารหนูในแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันไป โดยเฉพาะสารหนูในรูปสารประกอบอนินทรีย์ จะมีพิษมากกว่าสารหนูในรูปสารประกอบอินทรีย์ (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2560)

2) แหล่งที่พบสารหนู

โดยธรรมชาติสารหนูจะอยู่ในรูปของสารประกอบของหินและแร่ต่าง ๆ เมื่อฝนตกทำให้มีการชะล้างของหินและแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบกระจายลงสู่ชั้นดิน และน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ สารหนูยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ยาฆ่าแมลง การทำเหมือง การถลุงแร่ โลหะ การย้อมผ้า การทำแก้ว การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมหนัง และน้ำยาถนอมเนื้อไม้ เป็นต้น (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ, 2558)

3) การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

สารหนูไม่ใช่ธาตุจำเป็นต่อพืช หากในพืชมีความเข้มข้นของสารหนูเพียง 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมก็จะแสดงความเป็นพิษต่อพืช (Sharma et al., 2009) โดยพืชสามารถดูดดึงสารหนูจากดินที่ปนเปื้อนแล้วลำเลียงเคลื่อนย้ายเข้าสู่ต้นพืช และสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก ลำต้น และใบ โดยจะไม่มีกลไกการย่อยสลายสารพิษ (Tangahu et al., 2011) สารหนูที่สะสมในพืชจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ส่งผลให้มวลชีวภาพลดลง รากและหน่อมีมวลลดลง รวมทั้งความสูงของลำต้น อัตราการงอก และผลผลิตลดลง ส่งผลให้พืชตายในที่สุด โดยมีการทดสอบพืชหลายชนิดที่มีการสะสมสารหนู พบว่า มะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงแสดงความเป็นพิษที่ใบและราก ข้าวมีสีระเหิดรูป และเมล็ดข้าวมีจำนวนลดลง ส่วนข้าวสาลีพบว่า มีน้ำหนักของรากและหน่อลดลง (Ahmad et al., 2014) นอกจากนี้ สารหนูยังสามารถเข้าทำลายเซลล์ และเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ และส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ของพืชได้

4) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

พิษของสารหนูเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งระบบ เช่น ระบบหายใจ ระบบย่อยอาหาร ระบบหมุนเวียนเลือด และระบบประสาท เป็นต้น ในกรณีที่ร่างกายได้รับสารประกอบสารหนูผ่านระบบหายใจจะทำให้หลอดลมเกิดการระคายเคือง ถ้าได้รับในปริมาณมากจะทำให้เกิดแผลที่หลอดลม ถ้าร่างกายได้รับสารหนูเข้าทางเดินระบบอาหารจะไปสะสมที่ตับ ไต ผังทางเดินอาหาร เส้นผม ขน เล็บ และสมอง ปรากฏให้เห็นเป็นรอยพาดสีขาบบนเล็บมือและเล็บเท้า และหากอาร์ซีน (Arsine; AsH_3) รวมตัวกับฮีโมโกลบินแล้วจะถูกออกซิไดส์ให้กลายเป็นสารพิษส่งผลต่อเม็ดเลือดแดง หรือทำให้เกิดการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง สามารถทำลายเซลล์ของตับ ม้าม และไต รวมทั้งปัสสาวะมีสีแดง มีอาการดีซ่าน โลหิตจาง และในกรณีรุนแรงมากขึ้น อาจทำให้เสียชีวิตได้ในที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มอาการของความเป็นพิษออกเป็น 2 ลักษณะ (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2560) คือ

4.1) อาการพิษเฉียบพลัน ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสกับสารหนู และอาจทำให้คลื่นไส้ อาเจียน เป็นตะคริว กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากหัวใจทำงานล้มเหลว เป็นต้น

4.2) อาการพิษเรื้อรัง หากได้รับสารหนูติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดแผลเป็นหรือเป็นรูที่ช่องจมูก ผิวหนังหนาขึ้น มีรอยดำดำที่ผิวหนัง อาจมีเส้นสีขาบบนเล็บ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการชาตามปลายมือปลายเท้า ในบางรายที่เป็นมากอาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงร่วมด้วย สารหนูมีสมบัติเป็นสารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง และมะเร็งปอด รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์ เป็นต้น

5) ปฏิกิริยาทางเคมีของสารหนูในธรรมชาติ

สารหนูจะคงรูปที่เลขออกซิเดชัน -3, 0, +3 และ +5 สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน -3, 0, +3 เกิดจากกระบวนการรีดักชัน ส่วนใหญ่สารหนูในธรรมชาติจะอยู่ในรูปที่มีเลขออกซิเดชันเป็นบวก และสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น ๆ ที่ทำให้สารหนูเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (วิโรจน์ ชัยนหา, 2555) ประกอบด้วย 2 กระบวนการของปฏิกิริยา ดังนี้

5.1) กระบวนการออกซิเดชัน เกิดจากกระบวนการผุกร่อนของหินที่มีสารหนูปะปนอยู่ โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาวะที่มีออกซิเจนและน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบอาร์ซีนิต และในสภาวะที่เป็นกรด หรือค่อนข้างเป็นกรด สารประกอบอาร์ซีนิตจะเคลื่อนที่ไปได้ไกล แต่ถ้าสภาพสิ่งแวดล้อมเป็นด่าง หรือเป็นกลาง สารประกอบอาร์ซีนิตจะเกิดปฏิกิริยาการแยกสลาย

ด้วยน้ำ (Hydrolysis) จะตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม เมื่อสารประกอบอาร์ซีเนตซึมผ่านไปยังบริเวณที่มีอนุภาคของแร่บางชนิด ดินโคลน หรือเจล จะเกิดการดูดซับและคีเลชัน (Chelation) ทำให้เกิดการตกตะกอน ถ้าบริเวณนั้นมีสารประกอบพวกฮิวมิก (Humic) สะสมอยู่ จะเกิดการตกตะกอน โดยเกิดกระบวนการ Organic binding นอกจากนี้ยังพบว่า สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน 0 ส่วนมากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มากกว่า +5 โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลง สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน +3 ส่วนมากจะเกิดในสารละลายหรือในพวกจุลินทรีย์ แต่โดยปกติแล้วสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 จะไม่พบในธรรมชาติ มักจะถูกออกซิไดส์ไปอยู่ในรูปที่มีออกซิเดชัน +5

5.2) กระบวนการรีดักชัน กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้อย่างช้า ๆ โดยมากเกิดจากกระบวนการย่อยสลายในดินหรือหิน น้ำพุร้อน และไอระเหยจากภูเขาไฟ ซึ่งดินหรือหินที่มีสารหนูปนอยู่จะถูกย่อยสลายด้วยน้ำที่มีสถานะเป็นต่าง สารประกอบของสารหนูที่เกิดจากกระบวนการนี้จะอยู่ในรูปของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 เช่น AsH_3 , $AsCl_3$ และ As_2S_3 เป็นต้น สารประกอบของสารหนูเหล่านี้จะสลายตัวได้รวดเร็วภายใต้ตัวทำละลายทั้งสถานะที่เป็นกรดและต่าง ดังนั้น เมื่อสารประกอบเหล่านี้เคลื่อนตัวไปตามลำน้ำ จะเกิดการตกตะกอนหรือสะสมปะปนอยู่กับตะกอนท้องน้ำ นอกจากนี้ สารประกอบสารหนูบางชนิดสามารถเคลื่อนตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่มีค่าไอออนบวก เมื่อพบกับอนุภาคของสารละลายที่มีค่าไอออนเป็นลบ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาและมีการตกตะกอนตามผิวหน้าดินและตะกอนท้องน้ำได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ในกระบวนการรีดักชัน สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 สามารถทำปฏิกิริยารีดักชันโดยกระบวนการทางเคมีหรือชีวภาพให้กลับเป็นสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ได้ แต่จะเปลี่ยนจากสภาพที่มีออกซิเดชัน +5 เป็น 0 ได้ค่อนข้างยาก

6) การแพร่กระจายของสารหนูในสิ่งแวดล้อม

การแพร่กระจายของสารหนูเกิดขึ้นได้หลายทาง สารหนูสามารถเคลื่อนย้ายลงสู่ดินได้ในรูปของไอระเหยหรือสารละลายโดยมีอากาศและน้ำเป็นตัวพา ตลอดจนการย่อยสลายของแร่ธาตุหรือสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่มีสารหนูปะปนอยู่ เมื่อผ่านดินที่มีค่า Redox potential (Eh) และค่าความเป็นกรด-ต่าง ที่แตกต่างกันจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้เกิดการตกตะกอนบนพื้นดิน แต่ถ้าบริเวณนี้มีสารอินทรีย์หรือเหล็กสูง จะสามารถช่วยดูดซับสารหนูได้มากขึ้น โดยเฉพาะดินชั้น A horizon ซึ่งมีสารอินทรีย์สูง และสามารถเคลื่อนไปสู่ชั้นระดับความลึกชั้น B horizon ได้ ถ้าดินชั้นนี้มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูง นอกจากนี้ หากดินมีค่าความเป็นกรด-ต่างต่ำ สามารถทำให้อะลูมิเนียม และเหล็กดูดซับอาร์ซีเนตได้ดี สำหรับการแพร่กระจายของสารหนูลงสู่แหล่งน้ำนั้น พบว่า น้ำซึ่งมีออกซิเจน และค่า Eh สูง สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 จะคงตัวในรูปของ H_2AsO_4 , AsO_4^{3-} , H_2AsO_3 และ $HAsO_4^{2-}$ แต่

ถ้าค่า Eh ต่ำ สารประกอบสารหนูจะคงตัวในรูป H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^{-}$ และ $HAsO_3^{2-}$ สำหรับ $HAsO_4^{2-}$ ซึ่งเป็นสารละลายที่อยู่ในสภาวะที่มีค่าของ Eh สูง และหากค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในระดับเดียวกันกับการทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ของเหล็ก จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาร่วมกันและเกิดการตกตะกอนได้

2.2.2 แมงกานีส (Manganese)

1) ลักษณะทางกายภาพและเคมี

แมงกานีส (Manganese) เป็นธาตุโลหะ มีสีขาวเงิน แข็ง และเปราะ มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn หมายเลขอะตอม 25 น้ำหนักอะตอม 54.94 กรัมต่อโมล เมื่ออยู่ในรูปธาตุบริสุทธิ์จะมีสีขาวเงิน มีน้ำหนักแข็ง และเปราะ ในธรรมชาติมักพบอยู่ในรูปของออกไซด์ มีจุดหลอมเหลวที่ 1,246 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ 2,061 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 5.727 มีเลขออกซิเดชัน คือ +2, +3, +4, +6 และ +7 แมงกานีสเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 12 ในลักษณะที่เป็นสารประกอบร่วมกับธาตุอื่น ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออกไซด์ โลหะแมงกานีสที่บริสุทธิ์จะมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 7.21 และความแข็งของโมห์เท่ากับ 6 มีสมบัติทางเคมีโดยทั่วไปคล้ายคลึงกับเหล็ก เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะถูกออกซิไดส์ และถ้าอากาศชื้นจะเกิดเป็นสนิม เมื่อเผาให้ร้อนจัดในอากาศจะลุกติดไฟได้เช่นเดียวกับเหล็ก (จำลอง ปินตาวงศ์ และคณะ, 2554)

2) แหล่งที่พบแมงกานีส

แมงกานีสสามารถพบได้ในธรรมชาติ แต่มักเกิดอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ แมงกานีสมักกระจายอยู่ทั่วไป และมีการนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานถลุงแร่ แมงกานีส โรงงานผลิตโลหะผสม โรงงานเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า และโรงงานทำถ่านไฟฉาย แมงกานีสส่วนมากมักอยู่ในรูปของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) (จำลอง ปินตาวงศ์ และคณะ, 2554)

3) การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

แมงกานีสจัดเป็นธาตุอาหารรองของพืช (Trace elements) เป็นหนึ่งในจำนวน 5 ธาตุที่พืชชั้นสูงส่วนใหญ่ต้องการเพียงเล็กน้อย อีก 4 ธาตุ ได้แก่ โบรอน สังกะสี ทองแดง และโมลิบดีนัม พืชจะดูดดึงแมงกานีสในรูป Mn^{2+} เหตุผลประการหนึ่งที่ธาตุนี้จำเป็นสำหรับพืช เพราะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่จำเป็นสำหรับเอนไซม์บางชนิด ช่วยรักษาโครงสร้างของระบบเมมเบรนภายในคลอโรพลาสต์ และมีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (พรพิมล สุริยภัทร, 2552) หากพืชที่ขาดแมงกานีสจะเกิดอาการผิดปกติหลายอย่าง โดยเฉพาะการเกิด Intervenal chlorosis เนื่องจากขาดคลอโรฟิลล์ ทำให้พืชแสดงอาการคลอโรซิส (Chlorosis) คือ ใบจะมีสีเหลืองหรือสีขาวในบริเวณระหว่างเส้นใบ (Vein) และจะแห้งกลายเป็นสีน้ำตาลหรือสีเทาดำ (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2540) แต่หากแมงกานีสมีมากเกินไปในดิน จะเกิดความเป็นพิษต่อพืชและขาดความสมดุลกับธาตุอื่น ๆ ทำให้

พีชมีการเจริญเติบโตลดลง ใบพีชมีจุดสีน้ำตาลเด่นชัดมาก ถ้าหากพีชได้รับแสงความเข้มสูง จะทำให้เกิดรอยต่างจากพีชของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) สีน้ำตาลเกิดจากพอลิฟินอลในรูปออกไซด์ อาการเหมือนการขาดธาตุเหล็ก จะพบในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง (นวิรัตน์ อุดมประเสริฐ, 2558)

4) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ความเป็นพิษของแมงกานีสส่วนมากเป็นชนิดแบบเรื้อรัง โดยแมงกานีสส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของร่างกาย คือ ระบบประสาท ผู้ได้รับสารแมงกานีสเข้าไปในร่างกายส่วนใหญ่จะเกิดอาการระหว่าง 6 เดือน ถึง 2 ปี โดยมีอาการเป็นไข้ปวดศีรษะ กล้ามเนื้อไม่มีเรี่ยวแรง เบื่ออาหาร และอาการจะค่อย ๆ รุนแรงมากขึ้น จนเกิดอาการสั่น และเกิดการกระตุกของปลายแขน ปลายขา กลืนน้ำลายลำบาก ในบางรายมีอาการเป็นอัมพาตของร่างกายบางส่วน ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากการสูดหายใจผงหรือไอระเหยของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ทำให้มีไข้หนาวสั่น ปวดท้อง อาเจียน คอแห้ง และปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ เป็นต้น ซึ่งแบ่งกลุ่มอาการของความเป็นพิษออกเป็น 2 ลักษณะ (วิวัฒน์ เอกบุรณวิวัฒน์, 2560) คือ

4.1) อาการพิษเฉียบพลัน ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสกับแมงกานีส และอาจแสบร้อน ปวดศีรษะ ลึนรู้สึกรสโลหะ คลื่นไส้ หายใจขัด และเจ็บหน้าอก และการสัมผัสในรูปพุ่มของแมงกานีสไดออกไซด์ สามารถทำให้เกิดโรคไข้ไอโลหะ (Metal fume fever) มีอาการไข้สูง แน่นหน้าอก และหอบเหนื่อย เป็นต้น

4.2) อาการพิษเรื้อรัง ระบบที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุดคือ ระบบประสาท แมงกานีสจะเข้าสะสมในสมองส่วน Globus pallidus ทำให้เกิดอาการทางสมอง โดยอาการระยะแรกจะอ่อนเพลีย ปวดศีรษะ พฤติกรรมเปลี่ยนแปลง เช่น กระวนกระวาย พุดมากผิดปกติ รวมเรียกว่า Manganese psychosis อาการทางจิตนี้ ซึ่งบางครั้งอาจทำให้สับสนกับคนเป็นโรคจิตเภทได้ และหากได้รับในระยะรุนแรง จะมีอาการคล้ายคนเป็นโรคพาร์กินสัน (Parkinsonism) หรือเรียกว่า กลุ่มอาการ Manganism คือ พุดช้า หน้าตาดูไม่มีความรู้สึก การเคลื่อนไหวช้าและกระตุก และมีท่าเดินที่ผิดปกติ เป็นต้น

5) การกระจายของแมงกานีสในสิ่งแวดล้อม

การกระจายของแมงกานีสในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้หลายทาง โดยธรรมชาติ แหล่งกำเนิดของแมงกานีสมาจากหินต่าง ๆ หรือแร่ที่มีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักพบอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ การกระจายตัวของแมงกานีสในสิ่งแวดล้อมมักเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ ฝุ่นละอองหรือน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า การผลิต

ถ่านไฟฉาย และปุ๋ยที่มีส่วนผสมของแมงกานีส จากกิจกรรมดังกล่าวสามารถทำให้มีแมงกานีสสามารถสะสมและปนเปื้อนอยู่ในดิน และไหลลงสู่แหล่งน้ำ และสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้ เป็นต้น

2.3 เทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation)

2.3.1 ความหมาย

การบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (Phytoremediation) มีรากศัพท์มาจากคำว่า “Phyton” ของภาษากรีกที่หมายถึง “พืช” และคำว่า “Remediare” ของภาษาละตินที่หมายถึง “การบำบัดหรือการรักษา” เมื่อนำทั้งสองคำมารวมกัน จึงมีความหมายถึงเทคโนโลยีการนำพืชมาใช้ในการบำบัดสารตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน ได้แก่ ดิน โคลน กากตะกอน น้ำ และอากาศที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (USEPA, 2000; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช สามารถบำบัดสารมลพิษได้หลายประเภท ได้แก่

- 1) ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Petroleum hydrocarbon)
- 2) เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) ไซลีน (Xylene)

รวมเรียกว่า BTEX

- 3) พอลิคลอริเนตไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls)
- 4) พอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon)
- 5) สารประกอบคลอรีน (Chlorinated compound)
- 6) วัตถุระเบิด (Explosives) เช่น ทีเอ็นที
- 7) สารฆ่าศัตรูพืช (Pesticide) เช่น อาหาราซิน และไซยานาซิน เป็นต้น
- 8) โลหะหนัก (Heavy metals) เช่น สารหนู แมงกานีส ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี นิกเกิล และปรอท

เป็นต้น

- 9) นิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclides) เช่น ยูเรเนียม

10) ของเสียพวกธาตุอาหาร (Nutrient waste) เช่น แอมโมเนีย ฟอสเฟต และไนเตรท เป็นต้น (เนย์นันท์ อริยกานนท์, 2558)

2.3.2 กระบวนการบำบัดสารมลพิษด้วยพืช

การใช้พืชบำบัดสารมลพิษ ใช้หลักการจากกระบวนการดูดดึงน้ำ และแร่ธาตุอาหารของพืชจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน เช่น ดินที่ปนเปื้อนผ่านทางรากของพืช หลังจากทีสารมลพิษถูกขนส่งจากรากเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) แล้วสารมลพิษก็จะเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับ

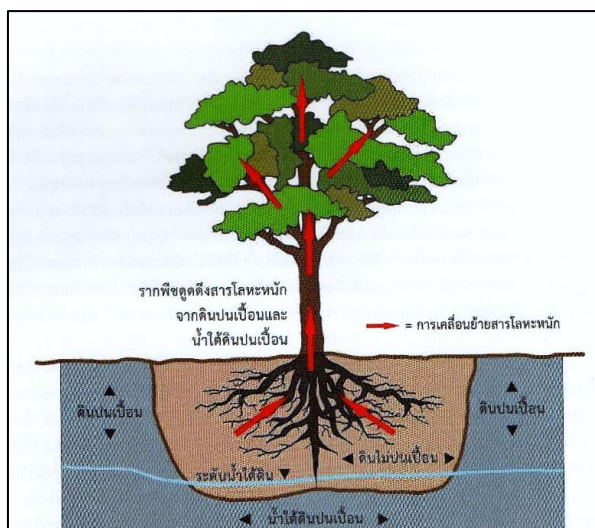
น้ำ และถูกลำเลียงไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ส่วนยอดและใบ หรือระเหยออกทางปากใบ ของพืชได้เช่นกัน การฟื้นฟูที่ปนเปื้อนโดยการใช้น้ำ จึงเป็นกระบวนการทำงานของพืชเพื่อเคลื่อนย้าย เก็บ บำบัด และลดอันตรายของสารมลพิษหรือการทำให้สารมลพิษ และบริเวณที่ปนเปื้อนให้เป็น อันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมลดลง หรือให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืชนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษทั้งที่อยู่ในรูป สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ดิน น้ำ และอากาศได้ (รูปที่ 2.2) การบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจากสารมลพิษด้วยวิธีการใช้พืชนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบและชนิดของสารมลพิษที่ปนเปื้อน นอกจากนี้ ควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว คือ สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การทำเกษตรกรรม อย่างไรก็ตาม การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืชนั้น จำเป็นต้อง อาศัยกระบวนการสำคัญที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของพืชที่ปนเปื้อนด้วยพืช โดยสามารถ สรุปกระบวนการบำบัดสารมลพิษได้ ดังนี้ (พันธวัช สัมพันธ์พานิช, 2558)

1) การดูดดึงสารมลพิษด้วยพืช เป็นกระบวนการดูดดึงสารมลพิษที่ปนเปื้อนด้วยพืช ได้แก่ การสกัดสารมลพิษ และการทำให้สารมลพิษระเหย ซึ่งการสกัดสารมลพิษด้วยพืชนั้น อาศัยการ ดูดดึงสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน หรือน้ำ ไปเก็บสะสมไว้ที่ส่วนต่าง ๆ ของพืช ส่วน วิธีการทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืชนั้น เป็นการอาศัยวิธีการดูดดึงสารมลพิษที่ปนเปื้อนจากดินหรือ น้ำไปยังพืชแล้วปล่อยสารมลพิษนั้นออกสู่บรรยากาศผ่านการระเหยของพืช

2) การย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ด้วยรากพืช เป็นการกระตุ้นการ ย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืช หรือเป็นการกรอง สารมลพิษด้วยรากพืช ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้จะมีความสามารถในการกรอง ดูดซับ หรือรับ สารมลพิษที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากหรือให้เข้าไปในรากของพืชได้ การทำงานของ รากพืชจะช่วยให้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษทำงานได้ดีขึ้น และย่อยสลายสาร มลพิษปนเปื้อนต่อไป

3) การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีในดินด้วยพืช เป็นการปรับสภาพความเป็นพิษของ สารมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้ คือ พืชที่ มีความสามารถในการตรึงสารมลพิษ (Stabilization) หรือเป็นพืชที่สามารถช่วยลดการเคลื่อนย้าย ของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินด้วยการตรึง และยึดไว้ที่รากของพืช ทำให้สารมลพิษ

เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรหรือกล่าวได้ว่า พืชจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของสารมลพิษไม่ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายที่ได้หรือเคลื่อนที่น้อยลงหรืออาจเกิดการย่อยสลายไปในที่สุด



รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารโลหะหนักด้วยพืช
ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2.3.3 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืชเป็นกระบวนการทำงานของพืชในการเคลื่อนย้าย เก็บ บำบัด และ/หรือทำให้สารมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ให้ลดน้อยลง สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นภายใน และภายนอกพืช รวมทั้งบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนที่พืชทำการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ โดยสามารถจำแนกตามกลไกของพืชที่ใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้ (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction)

การสกัดสารมลพิษด้วยพืช หรือการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation) เป็นการใชพืชที่มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายและดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้รากพืชดูดตั้ง และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ โดยชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดด้วยวิธีนี้นั้นต้องเป็นพืชในกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) ซึ่งเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ โดยสามารถสะสมสารมลพิษได้ปริมาณมากถึง 100-1,000 เท่า ดังนั้น พืชที่เลือกใช้ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก มีความทนทานต่อโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูง พืชที่มีคุณสมบัติ

ดังกล่าวนี้จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดดึงสารพิษต่าง ๆ ออกจากดิน และน้ำที่ปนเปื้อนได้ ซึ่งกลไกการทำงานของกระบวนการสกัดสารมลพิษ ประกอบด้วย 2 วิธี ได้แก่ 1) การลำเลียงสารมลพิษผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทางรากพืช และ 2) การลำเลียงสารมลพิษจากส่วนรากพืชเข้าลำต้น ใบ และสู่ส่วนยอดของพืช โดยอาศัยกระบวนการคายน้ำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ก)

2) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration)

การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรองดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ เป็นการใช้อากของพืชหรือการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) เพื่อดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ น้ำผิวดิน หรือแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำไปบำบัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ หรือในดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำหรือระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics) การกรองสารมลพิษด้วยวิธีนี้ทำให้สารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินไม่มีการเคลื่อนที่ หรือทำให้เกิดการสะสมบริเวณราก ดังนั้น หลังการเก็บเกี่ยวส่วนของใบ และลำต้น จะไม่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น กรณีพืชดอกสามารถเก็บดอกไปขายได้ในช่วงระหว่างเวลาบำบัด เป็นต้น สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.3 ข)

3) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization)

การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (รูปที่ 2.3 ค)) เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุมหรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดิน ด้วยการตรึงและยึดสารมลพิษไว้ที่รากพืชหรือบริเวณรากพืช (Root zone) โดยรากของพืชจะดูดและตรึงสารปนเปื้อนไว้บนรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร และเกิดการตกตะกอน ซึ่งวิธีการนี้เป็นการใช้พืชโดยเฉพาะส่วนรากในการตรึงสารมลพิษ ทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่พืชจะดูดดึงได้ (Bioavailability) ลดลง ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยตรึงสารมลพิษให้อยู่กับที่ ไม่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ หรือน้ำใต้ดิน โดยกระบวนการดังกล่าว สามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนต่าง ๆ ภายในดิน ด้วยการใส่สารคีเลตต่าง ๆ เช่น ปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ ฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น ทั้งนี้ เพื่อขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่แหล่งน้ำใต้ดินให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง พืชที่ใช้ควรมีความสามารถในการลดปริมาณการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างของดิน เพื่อเป็นการลดปริมาณสารมลพิษปนเปื้อนไปสู่แหล่งน้ำ ป้องกันการสึกกร่อนของหน้าดินและการกระจายของสารมลพิษไปยังบริเวณอื่น ๆ เช่น ต้นหญ้า ต้นหลิว และต้นยูคาลิปตัส เป็นต้น การบำบัดโดยวิธีนี้สามารถเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน

(Complexation) และการรีดิวซ์เวเลนซ์โลหะ (Metal valence reduction) เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการตรึงสารมลพิษด้วยพืชยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน เพื่อให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนโดยกษัยการลม (Wind erosion) และการชะล้างสารปนเปื้อนลงสู่ไปสู่น้ำใต้ดิน

4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation)

การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (รูปที่ 2.3 ง) เป็นการใชพืชดูดซึมสารพิษที่อยู่ในบริเวณรอบ ๆ รากพืชเข้าไปเพื่อย่อยสลาย หรือเปลี่ยนแปลงด้วยเมตาบอลิซึม (Metabolism) ภายในพืชหรือจากการสร้างสารประกอบต่าง ๆ จากการใช้โปรตีน (Protein) หรือเอนไซม์ (Enzyme) ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และเชื้อรา เป็นต้น ทำให้สารพิษนั้นกลายเป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลาย จนไม่มีอันตรายต่อการดูดซึมไปใช้ ซึ่งสารมลพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชได้โดยการดูดใช้ธาตุอาหารหรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช สารมลพิษที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ ด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในต้นพืช โดยพืชแต่ละชนิดมีกลไกการกำจัดสารที่แตกต่างกัน และพืชที่ใช้ในกระบวนการนี้มักเป็นพืชในตระกูลหญ้า (Poaceae) เช่น ข้าวโพด หญ้าชนิดต่าง ๆ ที่สามารถดูดซับโลหะหนักไว้ที่พื้นผิวรากได้

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation)

การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (รูปที่ 2.3 จ) เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหาร นอกจากนี้ จุลินทรีย์ยังสามารถช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยเฉพาะบริเวณรากพืชที่มีการปล่อยของเหลว ได้แก่ เอนไซม์ น้ำตาล กรดไขมัน และกรดอะมิโน ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์บริเวณรากพืช ซึ่งไปยับยั้งอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในดิน และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ซึ่งเป็นตัวช่วยให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับสารมลพิษที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ สารประกอบต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น สารกำจัดแมลง สารกำจัดศัตรูพืชบางชนิด สารฟิซีปี สารพีเอเอส และปิโตรเลียม เป็นต้น

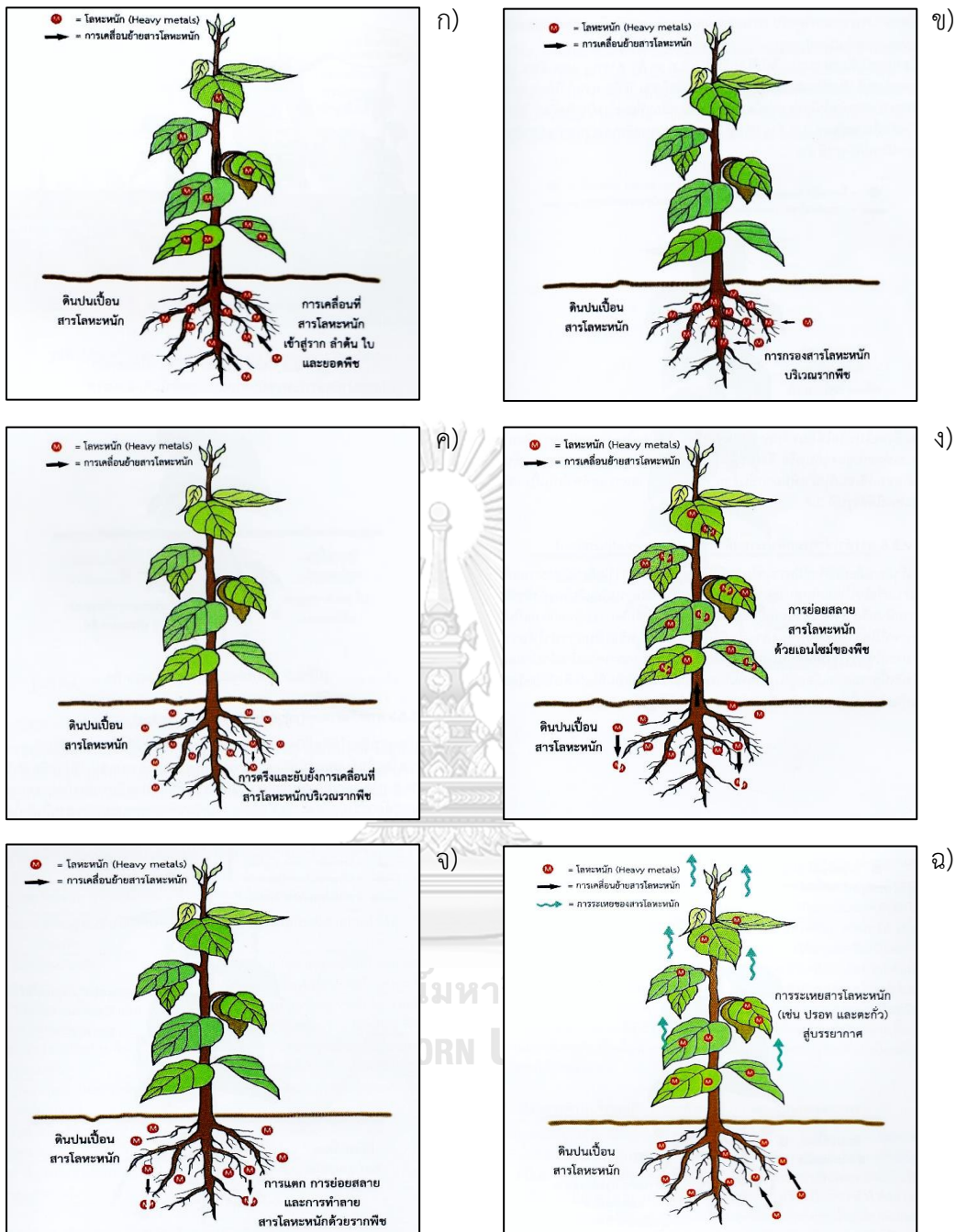
6) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization)

การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช เป็นการใช้พืชในการดูดซับสารมลพิษ และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารมลพิษในดิน หรือในน้ำให้เป็นไอระเหยออกไปสู่บรรยากาศ (รูปที่ 2.3 ฉ) โดยผ่านกระบวนการหายใจของพืช การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และการดูดซับสารมลพิษ ซึ่งเป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษโดยการใช้พืชไปดูดซับสารมลพิษ ด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเองได้ทำการแปลง (Transformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้ และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้นสารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบของพืช เมื่อพืชมีการดูดน้ำที่มีสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไปซึ่งเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช และในบางครั้งการดูดสารมลพิษดังกล่าวด้วยรากพืชนั้นผ่านไปยังใบ และมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นระดับต่ำ หรือเป็นการทำให้สารมลพิษระเหยขึ้นมาจากดินโดยแรงดึงจากการคายน้ำแล้วปล่อยออกทางใบของพืช ทำให้สารมลพิษที่อยู่ในรูปของไอระเหยมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษในดิน และน้ำได้ สารมลพิษที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่น ซีลีเนียม (Selenium) และปรอท (Mercury) เป็นต้น

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักด้วยพืช

1) ชนิดของโลหะหนัก

ชนิดของโลหะหนักมีส่วนสำคัญต่อการดูดดึงโลหะหนักออกจากดินเข้าสู่พืช เนื่องจากโลหะหนักแต่ละชนิดมีลักษณะ และรูปแบบการถูกปลดปล่อยลงสู่สารละลายในดิน และการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชได้แตกต่างกัน โดยมีปฏิกิริยา 2 รูปแบบ คือ การแก่งแย่ง (Antagonism) และการดูดยึดด้วยกัน (Synergism) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองแบบนี้มีอิทธิพลต่อสารละลายโลหะหนักในดิน เช่น เมื่อมีการเติมกำมะถันลงในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม จะทำให้พืชสามารถดูดดึงแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แคลเซียมและสังกะสีในดินจะช่วยลดการดูดดึงแคดเมียมของพืช ทั้งนี้เนื่องจากพืชมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ (Bioavailability) มากกว่าโลหะชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว (Phytotoxicity) เช่น พืชมีความสามารถในการดูดดึงสังกะสี ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ไปใช้ได้ดีกว่า สารหนู ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation)

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

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2) รูปแบบทางเคมีของโลหะหนัก

การดูดซับโลหะหนักด้วยพีชนั้น โดยส่วนใหญ่โลหะหนักจะอยู่ในรูปเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งพืชสามารถดูดซับเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักที่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์ (Organic salt)

3) ชนิดของพืช และส่วนต่าง ๆ ของพืช

พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไป จึงมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น การดูดซับโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และอายุของพืช เป็นต้น

4) สมบัติของดิน

4.1) เนื้อดิน ที่แตกต่างกันสามารถทำให้การดูดซับโลหะหนักแตกต่างกันไปด้วย ดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่าจะสามารถดูดซับไอออนซึ่งเป็นธาตุอาหารได้มาก ลักษณะของโครงสร้างดินที่พืชต้องการ คือ ไม่ขัดขวางการเจริญเติบโตของราก มีการถ่ายเทอากาศและการระบายน้ำในดินได้ดี สามารถอุ้มน้ำให้กับพืชได้ มีประโยชน์ในรูปของธาตุอาหารพืช และเป็นที่ยึดเกาะของรากได้ดี

4.2) ความสามารถในการระบายน้ำ การที่ดินมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีขึ้นสามารถทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปง่ายต่อการที่พืชจะดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นเช่นกัน

4.3) ความเป็นกรด-ด่างในดิน มีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในดิน โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่าง ๆ ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ และละลายน้ำได้ จะมีปริมาณลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น (พันธวัช สัมพันธ์พานิช, 2558)

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก

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

ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และน้ำที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่าง ๆ ในรูปที่เปลี่ยนไอออนได้ และละลายน้ำได้มีปริมาณลดลง เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น เช่น แคลเซียมสามารถเคลื่อนที่ได้ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 4.5-5.5 ซึ่งสภาพละลายได้ (Solubility) ของแคลเซียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุ อย่างไรก็ตาม ในขณะที่สภาพแวดล้อมมีสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น จะพบว่า แคลเซียมเคลื่อนที่ได้น้อยหรือไม่เคลื่อนที่เลย ดังนั้น จึงทำให้การดูดซับของแคลเซียมโดยพืชลดลง ทั้งนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการยึดเกาะ

ของโลหะหนักในดิน หรืออนุภาคต่าง ๆ และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างดินมีค่าต่ำลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะของโลหะหนักในดินลดลงตามไปด้วย ยกเว้นโลหะหนักกลุ่มที่มีไอออนลบ เช่น สารหนู โครเมียม และซีลีเนียม โดยมีการศึกษาของ Hodgson (1963) พบว่าประสิทธิภาพการยึดเกาะกับอนุภาคดินของโบรอน โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่าประมาณ 5-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยพืช เพราะค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่งผลโดยตรงต่อไอออนที่ผิวของอนุภาค เช่น อนุภาคดิน อนุภาคสารอินทรีย์ในดิน และส่งผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของโลหะชนิดอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนบวกในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การศึกษาเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนนั้นต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6-7 นั้นมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช และสำหรับดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5.5 มักพบพืชตระกูลมันฝรั่ง พืชตระกูลถั่วเบอร์รี่ และพืชตระกูลกุหลาบพันปี เป็นต้น สามารถเจริญเติบโตได้ดี

2) ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; CEC)

ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่สามารถระบุได้ว่าโลหะหนัก จะยึดเกาะกับตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ดีหรือไม่นั้น จะมีความสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส รวมถึงสัดส่วนของอนุภาคดิน หรือชนิดของดิน ซึ่งส่วนประกอบของดินที่แตกต่างกัน มักส่งผลให้มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกแตกต่างกัน กล่าวคือ ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของอนุภาคดินเหนียว (Clay) มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ อนุภาคทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคทราย (Sand) ตามลำดับ โดยทั่วไปดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงจะยึดเกาะกับโลหะได้ดีทำให้มีอัตราการแพร่กระจายต่ำ หากแต่ในดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงจะทำให้การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชเป็นไปได้ยากขึ้นด้วย

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction potential; ORP)

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดิน เป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ดิน ดังนั้น เมื่อดินมีความชื้นต่ำ การระบายอากาศดี จะทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 มิลลิโวลต์ (Stieger et al., 1994) หากแต่เมื่อดินมีความชื้นสูง อัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ในดิน จะทำให้ดินเริ่มขาดออกซิเจน ซึ่งเมื่อดินขาดออกซิเจนแล้วกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนได้จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ จึงทำให้

จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ และมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินต่ำลง และทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงเช่นเดียวกัน โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอาจลดลงต่ำถึง 400 มิลลิโวลต์ จึงส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักสามารถละลายในดินได้มากขึ้น และพืชสามารถดูดดึงโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น (Muhammad et al., 2009)

2.3.6 ข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช

1) ข้อดีของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช

1.1) การบำบัดด้วยพืชเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำมาใช้บำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใช้ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดดินด้วยวิธีการอื่น ๆ สาเหตุที่วิธีการบำบัดสารมลพิษด้วยพืชนั้นมีค่าใช้จ่ายน้อย เนื่องจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้ การบำบัดด้วยวิธีนี้ยังมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม มีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดด้วยวิธีการอื่น ๆ

1.2) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืชที่เป็น Hyperaccumulator species หรือพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงกว่าพืชทั่วไป นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะหนักที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย ถือเป็น การเพิ่มคุณค่าในการทำการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) เนื่องจากการเผาผลาญชีวภาพจะทำให้ได้พลังงาน ซึ่งสามารถนำเอาพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านี้ สามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.3) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืช เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกับสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ รวมทั้งสามารถทำการบำบัดและฟื้นฟูในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ และพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนบริเวณกว้างได้

1.4) พืชที่มีการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณสูง จะทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกักกินของแมลง เช่น หนอนผีเสื้อ นอกจากนี้ ยังช่วยลดการเกิดเชื้อรา และแบคทีเรียได้อีกด้วย

1.5) เทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษด้วยพืชเป็นที่ยอมรับของสาธารณชน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดไม่ส่งผลกระทบต่อค่างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่มีความเสี่ยงต่ำ จึงมีความปลอดภัยมากกว่าวิธีอื่น ๆ

1.6) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืช เป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชที่ปลูกนั้นจะช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการ

ปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่มนุษย์และสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน พื้นฟูสภาพดิน และช่วยลดการพังทลายของดินอีกด้วย รวมทั้งพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดสามารถทำให้เกิดการแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น รมรื่น และทำให้เกิดทัศนียภาพที่ดีแก่ผู้พบเห็น

2) ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช

2.1) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืชไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ ซึ่งจะบำบัดได้เฉพาะส่วนที่รากไปถึงเท่านั้น นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนเหล่านั้นไม่สามารถอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้น ๆ ได้เช่นกัน

2.2) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืช ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) ความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนของพืชแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันไป ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการบำบัดเป็นกรณีไป ตลอดจนไม่สามารถใช้วิธีการนี้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นที่สูงเกินความสามารถของพืชได้ นอกจากนี้ ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมากจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

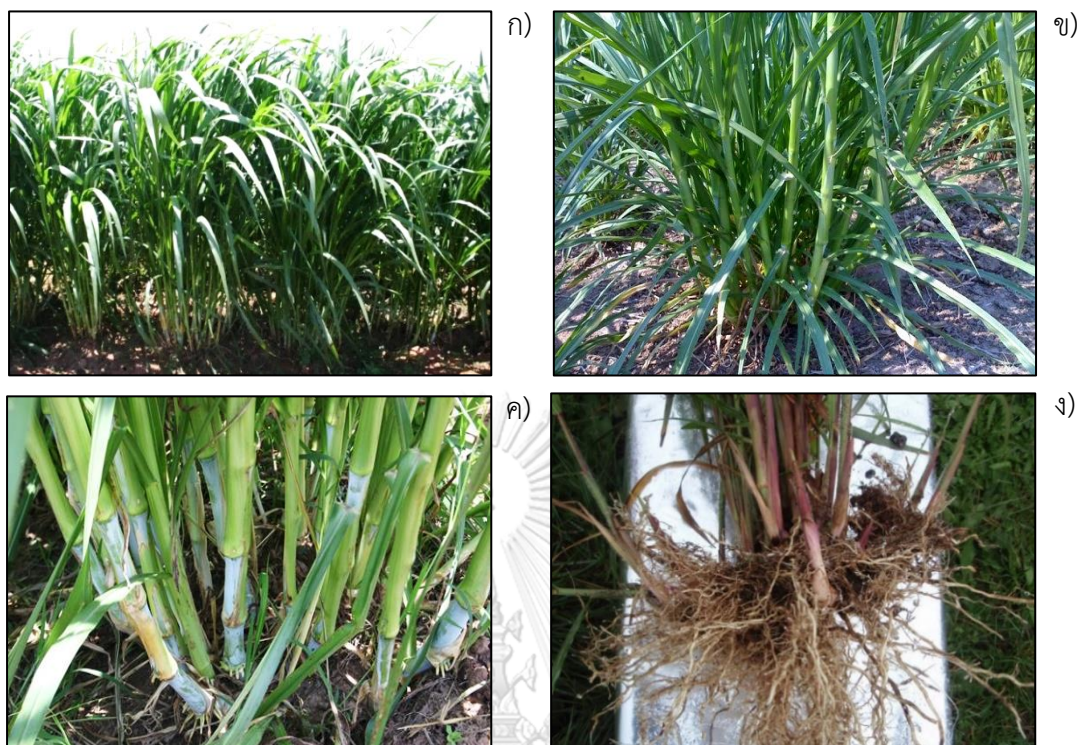
2.4) อัตราการเจริญเติบโตของพืช วงจรชีวิตพืช ชนิดของโลหะหนัก และปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช

2.5) การบำบัดสารมลพิษด้วยพืช เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืช และเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาอันสั้นได้ เนื่องจากต้องปลูกพืชซ้ำ ๆ หลายครั้ง เพื่อลดปริมาณสารมลพิษในดิน เพื่อให้ระดับการปนเปื้อนเหลือเท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะมนุษย์หรือสัตว์ ตลอดจนคุณภาพสิ่งแวดล้อม

2.4 หญ้าสกุลเนเปียร์ (Napier grass)

หญ้านเนเปียร์มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pennisetum purpureum* Schumach. มีชื่อสามัญที่เรียกทั่วไปว่า Napier grass, Elephant grass หรือ Uganda grass ซึ่งเป็นหญ้าพื้นเมืองของแอฟริกา และมีการเจริญเติบโตอย่างแพร่หลายทั่วทุกภูมิภาคในเขตร้อน และกึ่งเขตร้อนของโลก (Negawo et al., 2017) สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ และในปัจจุบันหญ้านเนเปียร์จัดว่าเป็นพืชพลังงานที่สำคัญที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า (Deshmukh et al., 2015a) ปัจจุบันมีหญ้านเนเปียร์หลากหลายสายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้คือหญ้านเนเปียร์แคระ (รูปที่ 2.4) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

หญ้านเนเปียร์แคระที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pennisetum purpureum* cv. Mott หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mott dwarf Napier grass ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกโดยนายวิฑูรย์ กำเนิดเพชร โดยนำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2532 และต่อมาถูกนำมาศึกษาโดยละเอียด และปลูกขยายพันธุ์ต่อโดยศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ ถนัดศรี ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งพบว่าหญ้านเนเปียร์มีลักษณะพิเศษ คือ 1) มีสัดส่วนของใบมากกว่าลำต้น 2) ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี 3) ออกดอกช้า 4) ข้อถี่ ปล้องสั้น ยึดปล้องน้อย และ 5) แตกกอดีกว่าหญ้านเนเปียร์ธรรมดา หญ้านเนเปียร์แคระจะมีลักษณะลำต้นใต้ดินเป็นแบบเหง้า มีลักษณะทรงต้นเป็นกอพุ่มตั้ง (Bunch type) ลำต้นอวบ และเตี้ยกว่าหญ้านเนเปียร์ธรรมดา มีความสูงประมาณ 1-2 เมตร มีการแตกกอดี มีสัดส่วนของใบมากกว่าส่วนของลำต้น ทรงพุ่มจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ปลายใบชี้ลงดิน ด้านบนและล่างของใบมีขนเล็กน้อย เป็นหญ้าที่ออกดอกเร็ว มีขนาดข้อดอกยาว 15-27 เซนติเมตร แต่เป็นหญ้าดอกที่ไม่ติดเมล็ด ลักษณะการปลูกโดยใช้ท่อนพันธุ์ปักชำคล้ายกับการปลูกอ้อย สามารถเจริญเติบโตได้ในดินหลายชนิดตั้งแต่ดินร่วนปนทรายถึงดินเหนียวที่มีการระบายน้ำค่อนข้างดี ตอบสนองต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและน้ำได้ดี เหมาะสำหรับปลูกบริเวณพื้นที่ที่มีฝนตกเฉลี่ยมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรขึ้นไป และสามารถทนต่อความแห้งแล้งได้ดีพอสมควร เนื่องจากมีระบบรากที่แข็งแรง และยังสามารถในการดูดตั้งธาตุอาหารได้มาก ทำให้ได้ผลผลิตสูง จัดเป็นหญ้าอาหารสัตว์ที่นิยมปลูกมาก เนื่องจากลำต้นและใบมีขนาดใหญ่ มีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง อีกทั้งยังสามารถเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง สามารถเก็บเกี่ยวต้นได้ตลอดทั้งปี มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวประมาณ 3-4 ครั้งต่อปี และสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 5-7 ปี ต่อการปลูก 1 ครั้ง (ดำรง สีนานุรักษ์, 2522)



รูปที่ 2.4 หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)

ก) ลักษณะลำต้นทั้งหมดของหญ้าเนเปียร์แคระ ข) ลักษณะกอของหญ้าเนเปียร์แคระ

ค) ลักษณะลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ และ ง) ลักษณะรากของหญ้าเนเปียร์แคระ

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา (2557)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหญ้าเนเปียร์

1) ราก และลำต้น

หญ้าเนเปียร์ เป็นหญ้าที่มีลำต้นขนาดใหญ่ ลำต้นแตกเป็นกอหรือแตกต้นใหม่ได้ ลำต้นมีลักษณะแข็งแรง มีลำต้นสั้น ๆ บางส่วนอยู่ใต้ดิน ลำต้นเหนือดินมีลักษณะทรงกลมและตั้งตรง มีลำต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-2.5 เซนติเมตร ลำต้นมีลักษณะเป็นข้อปล้องประมาณ 15-20 ข้อ สูง 2-6 เมตร ส่วนรากมีเฉพาะระบบรากฝอยที่แตกออกจากเหง้าจำนวนมาก

2) ใบ

ใบหญ้าเนเปียร์ออกเป็นใบเดี่ยว ประกอบด้วย กาบใบที่ห่อหุ้มลำต้น และมีขนเล็ก ๆ ปกคลุม และรอยต่อระหว่างกาบใบกับแผ่นใบจะมีเส้นใบ หญ้าเนเปียร์มีแผ่นใบยาว สีเขียวอ่อน มีเส้นกลางใบขนาดใหญ่ มีความยาวประมาณ 70-100 เซนติเมตร และกว้างประมาณ 2-3 เซนติเมตร

3) ดอก

ดอกของหญ้าเนเปียร์จะออกเป็นช่อแบบช่อเชิงลด (Spike) หรือช่อดอกแบบไม่สิ้นสุด (Indeterminate inflorescence) มีก้านดอกสั้นมากหรือไม่มีเลย และดอกจะบานจากโคนไปหาปลายช่อ ช่อดอกชนิดนี้อาจจะมีแกนกลางหรือมีช่อดอกยาว รูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม ยาวประมาณ 15-22 เซนติเมตร หนาประมาณ 2-3 เซนติเมตร ประกอบด้วยดอกย่อยจำนวนมาก และด้านในดอกจะมีเกสรตัวเมีย และตัวผู้

4) ผล และเมล็ด

หญ้าเนเปียร์ มีการติดผลน้อยมาก มีเปลือกผล และเมล็ดหุ้มติดกัน (ดำรง ลีนาบุรุษ, 2522)

2.4.2 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์ ประกอบด้วย

- 1) ปลูกขยายพันธุ์ง่าย และโตเร็ว ให้ผลผลิตหญ้าสดเฉลี่ย 40-80 ตันต่อไร่ต่อปี ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และการบริหารจัดการดิน และน้ำ
- 2) จัดการดูแลง่าย เก็บเกี่ยวโดยใช้เครื่องจักรได้
- 3) ตัดแล้วแตกกอใหม่ และเก็บเกี่ยวได้อย่างน้อย 5-7 ปี
- 4) มีค่าความร้อนประมาณ 14-18 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัม
- 5) สามารถผลิตไฟฟ้าจากไบโอแก๊สได้ 1 เมกะวัตต์ โดยใช้พื้นที่ปลูก 800-1,000 ไร่
- 6) ลำต้นและใบมีขนาดใหญ่ ลำต้นเติบโตได้เร็ว และให้ผลผลิตต่อไร่สูงมาก
- 7) มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เหมาะสำหรับเป็นอาหารหยาบเลี้ยงสัตว์
- 8) ลำต้นแตกกอใหม่ได้เร็ว ให้ผลผลิตได้ทั้งปี และเก็บผลผลิตได้ถึง 5-7 ปี
- 9) ลำต้นและใบ มีปริมาณแป้งและน้ำตาลสูง สามารถนำไปทำหญ้าหมักได้ โดยอาจไม่ต้องมีการเติมกากน้ำตาลเพิ่ม
- 10) ลำต้น และใบแก่ช้า
- 11) ลำต้น และใบมีความอ่อนนุ่ม และสัตว์เคี้ยวได้ง่าย
- 12) ไม่พบโรค และแมลงทำลาย
- 13) ทนต่อสภาพแห้งแล้ง และสภาพน้ำขังได้เล็กน้อย
- 14) ทนต่อดินเปรี้ยว และดินเค็มได้ดี

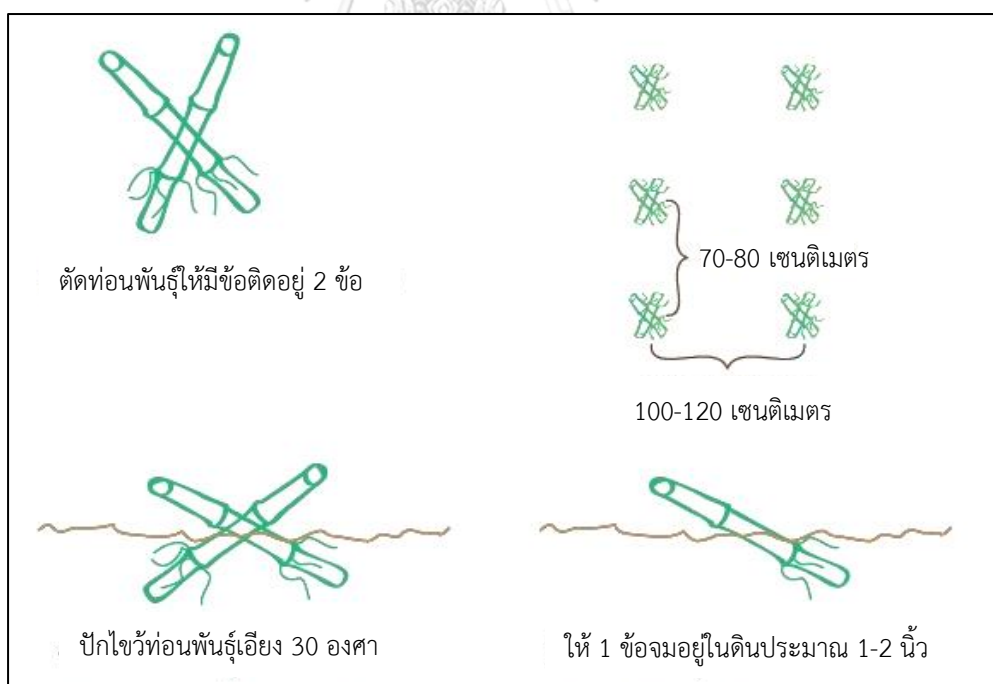
2.4.3 ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์

- 1) ใช้ปลูกเพื่อเป็นอาหารสัตว์ โดยเฉพาะโคเนื้อ โคนม และกระบือ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการให้กินสด และการทำหญ้าหมัก

- 2) ใช้เป็นชีวมวลสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า
- 3) ใช้ปลูกเป็นพืชคลุมดิน
- 4) ลำต้นใช้เป็นวัสดุค้ำในการผลิตกระดาษ
- 5) ลำต้นนำมาสับ และอัดเป็นแท่งสำหรับเป็นเชื้อเพลิง

2.4.4 วิธีการปลูกหญ้าเนเปียร์

การปลูกหญ้าเนเปียร์แคะ จะใช้วิธีการขยายพันธุ์ด้วยวิธีปักชำ โดยการปลูกหญ้าเนเปียร์เริ่มจากการคัดเลือกท่อนพันธุ์ที่ใช้ปลูกจะต้องเป็นลำต้นที่มีข้อปล้องสมบูรณ์ ซึ่งจะใช้ลำต้นที่มีอายุตั้งแต่ 3-4 เดือน ขึ้นไป จนถึง 1 ปี ตัดท่อนพันธุ์ให้เป็นท่อน ๆ ยาวประมาณ 15-25 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับความยาวข้อ โดยให้แต่ละท่อนมีข้อ 2 ข้อ หลังจากนั้น นำท่อนพันธุ์ 2 ท่อน ปักลงดิน โดยให้ข้อแรกของโคนท่อนปักกลัดลงดิน ส่วนข้อที่ 2 ให้อยู่เหนือดิน โดยทั้ง 2 ท่อน จะปักลงดินในลักษณะที่ไขว้กันให้เอียงประมาณ 30-40 องศา ระยะห่างของการปลูกระหว่างต้นที่ 70-80 เซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่างแถวที่ 100-120 เซนติเมตร ทั้งนี้ อาจใช้ท่อนพันธุ์เพียงท่อนเดียวได้หากมีข้อจำกัดด้านปริมาณท่อนพันธุ์ที่ใช้ (ไกรลาศ เขียวทอง, 2560) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีการปลูกหญ้าเนเปียร์
ที่มา: ไกรลาศ เขียวทอง (2560)

2.4.5 หญ้าเนเปียร์ในฐานะที่เป็นพืชพลังงาน

ปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พลังงานมีจำกัดและขาดแคลน รวมถึงสถานการณ์ความต้องการด้านพลังงานของประเทศไทย และทั่วโลก มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อต้นทุนของประเทศในทุกด้าน จากปัญหาสถานการณ์ด้านพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาของประเทศไทย การผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศไทยร้อยละ 70 มาจากก๊าซธรรมชาติ และต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) และกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนงานให้มีเป้าหมายในการใช้พลังงานทางเลือกแทนพลังงานฟอสซิลให้ได้ร้อยละ 25 ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) และทำให้หลายภาคส่วนร่วมกันทำการศึกษาวิจัยเรื่องพลังงานทางเลือกและพลังงานทดแทน โดยมีการดำเนินการจัดหาและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนด้านต่าง ๆ ขึ้น เพื่อให้ประเทศไทยมีความมั่นคงในด้านพลังงานอย่างยั่งยืน

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้จัดทำโครงการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าชนิดต่าง ๆ ในประเทศเพื่อเป็นพืชพลังงาน จากการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์มีศักยภาพสูงในการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาวิจัยพันธุ์หญ้าอีกมากกว่า 20 ชนิด และพบว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทน (CH₄) สูงกว่าหญ้าชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีโครงสร้างของสารอาหารที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 6,860-7,840 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อปี หรือสามารถผลิตเป็นก๊าซไบโอมิเทนอัด (Compressed bio gas; CBG) ได้ประมาณ 3,118-3,563 กิโลกรัมต่อปี สามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม (Liquefied petroleum gas; LPG) และก๊าซธรรมชาติ (Natural gas vehicles; NGV) ได้ และเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่น ๆ ยังพบว่าหญ้าเนเปียร์เพาะปลูกง่ายให้ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าหญ้าชนิดอื่นเกือบ 7 เท่า จึงทำให้ได้รับความสนใจมากขึ้นในฐานะพืชพลังงาน ซึ่งวิธีการนำหญ้าเนเปียร์มาผลิตพลังงาน สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ

- 1) การเผาโดยตรงหลังผ่านกระบวนการลดความชื้น
- 2) การผลิตเป็นก๊าซชีวภาพด้วยการหมัก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และเป็นที่ยอมรับมาก โดยการนำหญ้าเนเปียร์สดปริมาณ 1 ตัน อายุ 60 วัน มาผ่านกระบวนการหมักแบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ 90 ลูกบาศก์เมตร และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 170 กิโลวัตต์ต่อวัน

นอกจากนี้ ยังมีการนำหญ้าเนเปียร์มาผสมกับมูลสัตว์ และวัตถุดิบอื่น ๆ และเข้าสู่กระบวนการหมัก ก็จะได้พลังงานทดแทน คือ ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ คือ ก๊าซ CBG (Compressed biomethane gas) โดยนำก๊าซชีวภาพมาปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกระบวนการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และความชื้นออกจากก๊าซชีวภาพ ด้วยเทคโนโลยี Water scrubbing และเทคโนโลยี Membrane เพื่อให้ได้ก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับก๊าซ NGV (Natural gas for vehicles) สามารถนำไปใช้สำหรับยานยนต์ และนำไปบรรจุถังสำหรับใช้ในภาคครัวเรือน เพื่อทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) และนำไปผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งวิธีการผลิตไฟฟ้าด้วยแก๊สชีวภาพหญ้าเนเปียร์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) Pretreatment unit เป็นขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยออกแบบให้มีการสำรองวัตถุดิบไว้ในกระบวนการอย่างน้อย 10 วัน เพื่อการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผู้ประกอบการสามารถป้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านหน้าของระบบ โดยใช้รถตักวัตถุดิบเข้าเครื่องป้อนอัตโนมัติ (Hopper feeder) ที่จะลำเลียงวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องบด ซึ่งวัตถุดิบจะโดนบดจนละเอียดก่อนที่จะถูกนำไปผสมกับน้ำ และถูกส่งต่อไปยังระบบผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป

2) Biogas production unit เป็นขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยเมื่อวัตถุดิบจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Pretreatment unit) จะถูกป้อนเข้าสู่ถัง PSU-CSTR ที่มีปริมาตร 16,500 ลูกบาศก์เมตร มีกำลังการผลิตสูงสุด (Maximum capacity) การหมักอยู่ที่ 45 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ปลอดภัย และสามารถเพิ่มอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพได้มากที่สุด อีกทั้งยังทำให้มีความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการระบบ โดยหลังจากเกิดการหมัก วัตถุดิบจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย และมีการแยกระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยในส่วนที่เป็นของเหลวจะถูกส่งต่อไปสู่ถังหมัก (AD & Gas storage lagoon) เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ และของเหลวบางส่วนจากถังหมักจะถูกส่งต่อมามาผสมกับวัตถุดิบในส่วนของขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas production unit) ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง ส่วนของแข็งที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการผลิตปุ๋ยหมัก (Fertilizer production unit) เพื่อผลิตเป็นปุ๋ยต่อไป แก๊สชีวภาพที่ได้จากขั้นตอน Biogas Production Unit จะถูกส่งไปยังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพให้เป็นแก๊สสะอาดและแห้ง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และส่งเข้า Power generation unit เพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป

3) Power generation unit เป็นขั้นตอนการผลิตไฟฟ้า ที่ส่งขายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

4) Fertilizer production unit เป็นขั้นตอนการทำปุ๋ยหมัก โดยใช้ของแข็งจากขั้นตอน Biogas production unit เป็นวิธีการทำปุ๋ยหมักของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่จะทำให้ผู้ประกอบการได้ปุ๋ยที่มีคุณภาพสูงเหมาะสำหรับการเพาะปลูกและการนำไปขาย (ณิชชา บุรณสงฆ์, 2558)

2.5 ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic fertilizer)

2.5.1 ความหมายของปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์ หมายถึง ปุ๋ยที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากซากพืช ซากสัตว์ เซลล์จุลินทรีย์ และเศษเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic matter) ต่าง ๆ โดยธาตุอาหารในปุ๋ยจะเกิดประโยชน์ต่อพืชเมื่อได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ก่อน ซึ่งทำให้ได้สารต่าง ๆ มากมาย ทั้งสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) เช่น โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) แร่ธาตุอาหารต่าง ๆ ฮิวมัส (Humus) กรดอินทรีย์ (Organic acid) กรดอะมิโน (Amino acid) ฮอโมนพืช (Plant hormone) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เซลล์จุลินทรีย์ (Microbial cell) และอื่น ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืชเป็นอย่างมาก ปุ๋ยอินทรีย์ที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544; ธงชัย มาลา, 2546)

2.5.2 สมบัติของปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการควบคุม และกำหนดคุณสมบัติของดินในด้านสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งผลของอินทรีย์วัตถุต่อคุณสมบัติของดินที่ใส่ลงในดินสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินให้ดีขึ้น สารประกอบฮิวมัส (Humus) ในอินทรีย์วัตถุ เป็นสารที่แสดงประจุลบซึ่งมีความสามารถในการดูดยึดประจุบวก และยังมีผลให้อุณหภูมิดินเกาะตัวติดกัน และมีความสามารถในการดูดซับไอออนในดินสูงมาก โดยทั่วไปการดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินจะสูงกว่าคอลลอยด์อื่น ๆ ตั้งแต่ 2-3 เท่า (Khaled et al., 2011) ดินโดยทั่วไปมีปริมาณไอออนบวกที่ถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 30-90 ของปริมาณดินที่ดูดซับได้ทั้งหมด ผลของอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับไอออนส่วนใหญ่เกิดจากการแตกตัว (Dissociation) ของสารประกอบบางกลุ่ม โดยเฉพาะสารกลุ่มคาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) และสารกลุ่มฟีนอลิก (Phenolic group) อย่างไรก็ตาม อินทรีย์วัตถุในดินมีประจุลบเป็นจำนวนมาก ทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกได้สูง และมีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินได้ดี นอกจากนี้ การแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน (Cation exchange capacity; CEC) แสดงถึงความสามารถของดินในการดูดยึด

และแลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยอนุภาคดินเหนียวเป็นอนินทรีย์สารที่มีประจุลบ มีรูปร่างแบนบาง มีอนุภาคขนาดเล็ก และมีพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากที่สุด สามารถดูดซับประจุบวกไว้ที่ผิวได้ เช่นเดียวกับกับฮิวมัส ซึ่งประจุบวกเหล่านี้ที่ดูดซับบนผิวของอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัสจะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่เหนียวแน่นพอสมควร ทำให้ทนทานต่อการชะล้างของน้ำ แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถถูกไล่ที่ให้ออกหรือหลุดโดยไอออนอีกชนิดหนึ่งที่เป็นอิสระอยู่ในสารละลายดิน (Soil solution) ได้ เรียกคุณสมบัตินี้ว่า การแลกเปลี่ยนไอออนบวก ซึ่งไอออนบวกทั้งหมดที่ดูดซับสามารถวัดได้โดยคิดจำนวนเป็นเซนติโมลต่อน้ำหนักดินอบแห้ง 1 กิโลกรัม (Niazi et al., 2016)

2.5.3 ประเภทของปุ๋ยอินทรีย์

1) ปุ๋ยหมัก คือ ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้มาจากการนำเอาเศษซากพืช เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด หญ้าแห้ง ผักตบชวา เปลือกสับปะรด และต้นถั่วต่าง ๆ เป็นต้น รวมทั้งของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และขยะมูลฝอยตามบ้านเรือนมาหมักร่วมกับมูลสัตว์ ปุ๋ยเคมี หรือ สารเร่งจุลินทรีย์ เมื่อหมักโดยใช้ระยะเวลาหนึ่ง เศษพืชจะเปลี่ยนสภาพจากเดิมเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน มีสีน้ำตาลปนดำ และไม่มีกลิ่น ซึ่งวิธีการทำปุ๋ยหมักสามารถทำได้โดยการนำวัสดุต่าง ๆ มากองสูงให้สูงขึ้นจากพื้นดินประมาณ 30-40 เซนติเมตร แล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมีสูตรเสมอ 15-15-15 ประมาณ 1-1.5 กิโลกรัม ต่อเศษพืช 1,000 กิโลกรัม จากนั้นกองเศษพืชซ้อนทับลงไปแล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมี ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนสูงถึงประมาณ 1.5 เมตร และทำการรดน้ำในแต่ละชั้นเพื่อให้ความชุ่มชื้น และเป็นการเพิ่มการย่อยสลายได้เร็วขึ้น และควรทำการกลับกองปุ๋ยด้วย และทำการหมักทิ้งไว้ประมาณ 3-4 สัปดาห์ จึงจะนำมาใช้ประโยชน์ได้ (สาส์น ชินสถิต และหฤทัย แก่นลา, 2548)

2) ปุ๋ยพืชสด คือ ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาจากการปลูกพืชบำรุงดิน ได้แก่ พืชตระกูลถั่วต่าง ๆ และทำการไถกลบเมื่อพืชเจริญเติบโตมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังออกดอก ทั้งนี้ พืชที่ใช้ทำปุ๋ยพืชสดควรเป็นพืชอายุสั้น มีระบบรากลึก ทนความแห้งแล้ง ทนต่อโรคพืช และแมลงได้ดี ปลูกง่ายและมีเมล็ดมาก ตัวอย่างพืชตระกูลถั่วเหล่านี้ ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วแปบ ถั่วขอ ถั่วพุ่ม ถั่วลาย โสน และปอเทือง เป็นต้น

3) ปุ๋ยคอก คือ ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง เช่น สุกร โค กระบือ ไก่ เป็ด และห่าน เป็นต้น ซึ่งมูลสัตว์ประกอบด้วย ส่วนของแข็งที่มาจากอุจจาระ ซึ่งเป็นเศษซากของพืช และสัตว์ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายบางส่วน ระหว่างทางของระบบย่อยของสัตว์ และส่วนที่เป็นปัสสาวะ ที่ประกอบไปด้วยเกลือ และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ชนิดต่าง ๆ ปุ๋ยคอกมีประโยชน์ในการช่วยเพิ่มธาตุอาหารของพืช ทำให้ดินโปร่งและร่วนซุย ง่ายต่อการเตรียมดิน และเพิ่มโอกาสในการออก

และเติบโตของต้นกล้า โดยรูปแบบของการนำปุ๋ยคอกไปใช้ อาจนำไปใช้ในรูปแบบของปุ๋ยคอกแบบสด แบบแห้ง หรือนำไปหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายก่อนแล้วจึงนำไปใช้ประโยชน์ (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2547)

2.5.4 ข้อดีและข้อจำกัดของปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์มีประโยชน์ต่อการปรับปรุงบำรุงดินในหลาย ๆ ด้าน ทั้งทางด้านกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตพืช ปุ๋ยอินทรีย์เป็นแหล่งธาตุอาหารพืช เมื่อปุ๋ยอินทรีย์เกิดการย่อยสลายธาตุอาหารต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ ให้พืชนำไปใช้ และยังช่วยลดการสูญเสียธาตุอาหารต่าง ๆ เป็นต้น (สาลี ชินสถิต และหฤทัย แก่นลา, 2548) ซึ่งข้อดีและข้อจำกัดของปุ๋ยอินทรีย์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ข้อดีของปุ๋ยอินทรีย์

1.1) ปุ๋ยอินทรีย์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; CEC) สูง สารอินทรีย์ในปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งมีประจุลบ สามารถยึดจับกับอนุภาคที่มีประจุบวก หรือธาตุอาหารพืชได้ จึงช่วยลดการสูญเสียธาตุอาหาร

1.2) ปุ๋ยอินทรีย์ช่วยลดความเป็นพิษของธาตุบางชนิด เช่น อะลูมิเนียม แมงกานีส และโซเดียม เป็นต้น สามารถช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินได้ และไม่เป็นอันตรายต่อพืช

1.3) ปุ๋ยอินทรีย์สามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น ช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจนในดิน ซึ่งช่วยในการส่งเสริมให้ระบบรากพืชเจริญเติบโตได้ดี ทำให้พืชดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้มากขึ้น นอกจากนี้ ปุ๋ยอินทรีย์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ทำให้ดินมีความชุ่มชื้น และลดการพังทลายของหน้าดินได้

1.4) การใส่ปุ๋ยอินทรีย์ในดินช่วยเพิ่มแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ และกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุ และทำให้ธาตุอาหารถูกปลดปล่อยออกมาให้พืชนำไปใช้

2) ข้อจำกัดของปุ๋ยอินทรีย์

2.1) ปุ๋ยอินทรีย์ มีธาตุอาหารพืชน้อยกว่าปุ๋ยเคมี เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณของน้ำหนักที่เท่ากัน นอกจากนี้ปุ๋ยอินทรีย์จะปลดปล่อยธาตุอาหารสำคัญ ๆ ออกมาอย่างช้า ๆ ดังนั้น การใส่ปุ๋ยอินทรีย์จึงเห็นผลช้ากว่าปุ๋ยเคมี อีกทั้งยังควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชให้ตรงตามเวลาที่ต้องการได้ยาก

2.2) การใช้ปุ๋ยอินทรีย์จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก จึงจะทำให้มีธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช และทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

2.3) ไม่สามารถปรับแต่งปุ๋ยอินทรีย์ให้เหมาะสมกับดินและพืชได้ เนื่องจากปุ๋ยอินทรีย์เป็นปุ๋ยที่ได้มาจากซากพืชและซากสัตว์ ทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มีสัดส่วนระหว่างธาตุอาหารพืชชนิดต่าง ๆ ผันแปรในช่วงแคบมากเมื่อเทียบกับปุ๋ยเคมี ดังนั้น จึงไม่สามารถปรับสภาพสมดุลของธาตุอาหารในดินได้ เช่น หากดินขาดธาตุฟอสฟอรัส แต่มีธาตุไนโตรเจนอยู่เพียงพอ หากใส่ปุ๋ยมูลไก่อกลงไปเพื่อเพิ่มฟอสฟอรัสให้กับพืช จะได้ไนโตรเจนติดไปกับมูลไก่อกลงไปในดินด้วย และอาจทำให้ดินมีปริมาณไนโตรเจนมากเกินไป

2.6 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

2.6.1 ความหมาย

ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายจากธรรมชาติ ได้แก่ เศษไม้ใบไม้ หรือเศษวัสดุทางการเกษตร เช่น ตอซัง ซังข้าวโพด เปลือกถั่ว และเปลือกผลไม้ รวมทั้งมูลสัตว์ เป็นต้น โดยนำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศ หรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อน” (Pyrolysis) แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และ 2) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยทั้ง 2 รูปแบบนี้จะได้ผลผลิตแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) น้ำมัน (Bio-oil) 2) แก๊ส (Bio-gas) และ 3) ถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้มีความแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของการผลิต (พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์, 2560)

2.6.2 สมบัติของถ่านชีวภาพ

วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน หรือผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้วจะได้ถ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม เป็นต้น องค์ประกอบดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาทำถ่านชีวภาพ เมื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม จะสามารถช่วยปรับสภาพดิน ทำให้ดินมีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีสถานะเป็นประจุลบสามารถดูดซับธาตุอาหารที่เป็นประจุบวกได้ดี เมื่อทำการเพาะปลูกพืชจะช่วยทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี นอกจากนี้ ถ่าน

ชีวภาพยังมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีพื้นที่ผิวภายในมาก (Surface area) โดยมีค่าประมาณ 10-400 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพยังมีความคงตัวสูง ย่อยสลายช้า จึงช่วยกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้อย่างยาวนาน และไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ด้วยลักษณะทางกายภาพที่มีประจุไฟฟ้า และมีความพรุนสูง (Porosity) จึงทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการกักเก็บน้ำ และเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ ทำให้ดินมีความชุ่มชื้น และอุดมสมบูรณ์ และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้า ๆ (Galende et al., 2014; Grüter et al., 2017)

ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ด้วยลักษณะดังกล่าว จึงทำให้คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชีวภาพมีความเสถียรสูง สามารถเก็บกักไว้ในดินได้เป็นระยะเวลายาวนาน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังมีความสามารถในด้านการกักเก็บคาร์บอนแล้ว ถ่านชีวภาพยังมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน และเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นแหล่งกักเก็บอาหารและความชื้น ด้วยลักษณะของโครงสร้างที่มีผิวสัมผัสมาก และมีประจุลบบริเวณผิวสัมผัส จึงช่วยเพิ่มค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกภายในดิน (Cation exchange capacity; CEC) กับธาตุอาหารที่มีลักษณะเป็นประจุบวก ซึ่งช่วยในการสะสมธาตุอาหารให้กับพืช สำหรับคุณลักษณะของถ่านชีวภาพที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง จะช่วยลดค่าความเป็นกรดของดิน โดยเฉพาะดินที่เสื่อมสภาพ และมีการสะสมของสารเคมีเป็นระยะเวลานาน (Biederman et al., 2012)

2.6.3 การผลิตถ่านชีวภาพ

1) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ สามารถหาได้ในแต่ละท้องถิ่น โดยเฉพาะในประเทศไทย มีพืชพรรณไม้หลากหลายชนิดในแต่ละภูมิภาค ซึ่งประชาชนนิยมปลูกตามหัวไร่ปลายนาเพื่อไว้ใช้ประโยชน์ เช่น ปลูกไว้เป็นอาหาร พืชสมุนไพร ซ่อมเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน สิ่งก่อสร้างที่ไม่ถาวร และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งที่ต้นไม้เจริญเติบโตเต็มที่ จำเป็นต้องมีการตัดแต่งกิ่งเพื่อความสวยงามของพื้นที่ หรือรูปทรงของต้นไม้ เศษวัสดุที่เหลือเหล่านั้น ประชาชนมักนำไปทิ้งหรือเผาไฟทิ้ง ซึ่งไม่เกิดประโยชน์กับพื้นที่ อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ สำหรับตัวอย่างวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ได้แก่ ประเภทไม้โตเร็ว เช่น ไม้กระถิน นนทรี

จามจุรี หางนกยูง ขี้เหล็ก สะเดา สน ไม้ไผ่ และยูคาลิปตัส เป็นต้น หรือประเภทไม้ผลที่สามารถใช้ได้ ทั้งกิ่งก้าน และเปลือกผลไม้ เช่น มังคุด ทุเรียน เงาะ มะม่วง และกระท้อน รวมทั้งวัสดุทางการเกษตร เช่น ช้างข้าวโพด ต้นข้าวฟ่าง และเปลือกถั่วลิสง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถใช้มูลสัตว์ที่แห้งแล้วมา ผลิตถ่านชีวภาพได้ เช่น มูลวัว มูลไก่ และมูลแพะ เป็นต้น

2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำเตาเผาถ่านชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำเตาเผาถ่านชีวภาพสามารถทำได้โดยง่าย อุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด เนื่องจากประชาชนนิยมนำมาประดิษฐ์เป็นเตาเผาถ่าน และผลิตน้ำส้มควันไม้ เพื่อนำน้ำส้มควันไม้ที่สกัดได้มาใช้เป็นสารไล่แมลง กำจัดมด และปลวก ซึ่งเตาเผาถ่านชีวภาพที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิและอากาศที่จะเข้าสู่เตาได้ ส่งผลให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดี ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้เตาเผาถ่านชีวภาพจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี (ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 เตาเผาถ่านชีวภาพ
ที่มา: อโณทัย โกวทิยวิวัฒน์ (2561)

3) ขั้นตอนการเผาถ่านชีวภาพ

กระบวนการเผาถ่านชีวภาพนั้นมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก หากแต่มีข้อควรคำนึง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีน้ำหนักเบาประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักวัสดุก่อนที่จะทำการเผา จึงต้องทำการเตรียมวัสดุดิบที่มีปริมาณมากพอสมควรต่อการนำไปใช้ และหากนำไปใช้ในพื้นที่มีการเกษตรต้องทำให้มีขนาดเล็กลง โดยการบดหรือย่อยให้มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เมื่อผสมคลุกเคล้ากับดินจะง่าย และช่วยดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้เร็วขึ้น ถ้าขนาดของถ่านชีวภาพใหญ่เกินไป ภายในมีรูพรุนมากกว่าถ่านชีวภาพจะดูดซับน้ำจนอึดตัวต้องใช้ระยะเวลาานาน หรือหากมีอากาศอยู่ภายใน เมื่อให้น้ำพีชมากเกินหรือมีฝนตกหนักจะทำให้ก้อนของถ่านชีวภาพลอยอยู่บนหน้าดินและถูกน้ำพัดพาได้ง่าย

ดังนั้น หากใช้ในด้านการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักควรบดให้มีขนาดเล็กลง หรือน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้สามารถดูดซับโลหะหนักหรือสารมลพิษได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งขั้นตอนการเผาถ่านชีวภาพ สามารถอธิบายรายละเอียดได้ ดังรูปที่ 2.7 หากแต่ในขั้นตอนของการเผาถ่านชีวภาพ มีข้อควรระวัง คือ ในกรณีที่เป็นไม้เนื้อแข็ง ต้องตัดให้มีขนาดเล็กลง เพื่อจะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่นานเกินไป และการเผาต้องสังเกตควันไฟที่ออกจากปล่อง ถ้าไม่มีควันลอยขึ้นหรือมีน้อย ต้องแก้ไขโดยเร็วเพื่อไม่ให้ไฟดับ โดยสังเกตที่ช่องอากาศด้านล่าง ถ้ามีเศษไม้ปิดช่องอากาศ ต้องแก้ไขและทำให้อากาศเข้าได้ โดยปกติการเผาถ่านชีวภาพใช้ระยะเวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ และเพื่อความปลอดภัยในการทำงานควรปล่อยให้เตาเผาเย็นในสภาพอากาศปกติก่อนที่จะเปิดฝาเตา (พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์, 2560; อโณทัย โกวิทวิวัฒน์ และคณะ, 2562)

2.6.4 วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ

วัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตถ่านชีวภาพมีได้หลากหลายชนิด เช่น วัสดุเหลือทิ้งที่เป็นมวลชีวภาพ ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน เป็นต้น สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ได้นำไม้กระถินที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการนำไปเป็นอาหารสัตว์ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ไม้กระถินยักษ์

กระถินยักษ์ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Leucaena leucocephala* อยู่ในวงศ์ LEGUMINOSAE เป็นพืชตระกูลถั่ว มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลางทางตอนใต้ของประเทศเม็กซิโก และเริ่มแพร่เข้ามาในประเทศไทยแถบเอเชียครั้งแรกเมื่อสมัยที่สเปนปกครองฟิลิปปินส์ (ค.ศ. 1565-1825) และถูกนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในช่วงสมัยอยุธยา ปัจจุบันมีการปลูกอย่างกว้างขวางในประเทศไทย มีมากกว่า 100 สายพันธุ์ บางสายพันธุ์เป็นไม้ยืนต้น บางสายพันธุ์เป็นไม้พุ่ม เนื่องจากกระถินยักษ์สามารถกระจายพันธุ์ได้กว้างขวาง จึงมีความแตกต่างกันอย่างมากในเรื่องขนาดและรูปร่าง ทั้งนี้ สามารถจำแนกพันธุ์กระถินยักษ์ได้ 3 กลุ่ม (ดังรูปที่ 2.8) คือ 1) พันธุ์ฮาวาย (Hawaiian type) จัดเป็นพันธุ์ไม้พุ่มเตี้ย สูงประมาณ 5 เมตร ออกดอกขณะที่ต้นยังอ่อน และออกดอกตลอดปี 2) พันธุ์ซัลวาเตอร์ (Salvador type หรือ Giant type) อาจเรียกว่า พันธุ์แก้วเตมาลาหรือกระถินยักษ์ฮาวาย จัดเป็นไม้ยืนต้น สูงประมาณ 20 เมตร มีใบ ฝักและเมล็ดใหญ่ ไม่มีกิ่งก้าน ออกดอกไม่สม่ำเสมอ และไม่มีฤดูที่แน่นอน โดยจะให้ดอกนาน ๆ ครั้ง และ 3) พันธุ์เปรู (Peruvian type หรือ Peru type) จัดเป็นไม้ยืนต้นสูง 15 เมตร คล้ายพันธุ์ซัลวาเตอร์ แต่มีกิ่งก้านใหญ่ และแตกกิ่งก้านมากบริเวณโคนลำต้น ปริมาณ

ใบต่อนั้นมาก สามารถนำมาใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ได้ดี และจะให้ดอกนาน ๆ ครั้ง (เจษฎา เหลืองแจ่ม, 2527)



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการเผาถ่านชีวภาพ
ที่มา: พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์ (2560)

กระถินยักษ์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ และนิยมใช้ยอดอ่อน และฝักอ่อนมารับประทาน เมล็ดใช้ปรุงอาหาร ลำต้นใช้ทำไม้แปรรูป และเยื่อกระดาษ เนื่องจากมีลิกนินต่ำ แต่มีไฟเบอร์สั้นกว่าไม้สน กระดาษที่ทำจากกระถินยักษ์จึงมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาด หรือนำไปทำไม้เพื่อพลังงาน เนื่องจากมีการเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง สามารถตัดแตกหน่อได้ง่าย โดยสามารถตัดเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานชีวมวลเมื่ออายุ 1-2 ปี และยังช่วยปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นพืชตระกูลถั่ว และมีแบคทีเรียจำพวกไรโซเบียมอาศัยอยู่ที่บริเวณรากจึงสามารถช่วยเพิ่มไนโตรเจนในดิน นอกจากนี้ ไม้กระถินยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้ปรับปรุงบำรุงดินและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 2.8 การจำแนกลักษณะสายพันธุ์ของกระถินยักษ์

ก) พันธุ์ฮาวาย ข) พันธุ์ซิลวาเตอร์ และ ค) พันธุ์เปรู

ที่มา: Elevitch (2006)

1.1) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกระถินยักษ์

กระถินยักษ์ จัดเป็นพรรณไม้ยืนต้นขนาดกลางที่มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว มักแตกเป็นพุ่ม เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะมีความสูงประมาณ 10 เมตร ซึ่งลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกระถินยักษ์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.9)

1.1.1) ลำต้น มีลักษณะมีลำต้นเรียบ เปลือกบางสีเทาปนน้ำตาลแดง และเป็นไม้ขนาดกลาง

1.1.2) ใบ มีลักษณะเป็นใบประกอบ และมีใบตลอดทั้งปี ใบย่อยแตกออกจากก้านใบ 3-10 คู่ ใบย่อย 5-20 คู่ ใบเป็นรูปขอบขนาน ปลายใบแหลมทำมุมกว้าง และไม่มีขน

1.1.3) ดอก มีสีขาว ออกดอกเป็นช่อแบบกระจุกตามซอกใบและปลายกิ่ง เมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล ช่อดอกหนึ่ง ๆ จะมีฝักประมาณ 15-20 ฝัก ออกดอกในช่วงเดือนมกราคม และฝักจะแก่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม

1.1.4) ผลและเมล็ด ฝักกระถินยักษ์จะเกิดเป็นกลุ่ม ๆ มีลักษณะบาง แบน และตรง มีสีเขียวเข้มและกลายเป็นสีแดงหรือสีน้ำตาลเมื่อแก่เต็มที่ ในฝักแก่จะมีเมล็ดอยู่ประมาณ 15-30 เมล็ด และเมล็ดรูปร่างแบนรี

1.1.5) เนื้อไม้ มีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลอ่อน เส้นตรง เนื้อไม้ค่อนข้างแข็ง สามารถตัดและเลื่อยได้ และให้ค่าความร้อนสูง โดยมีค่าความร้อนถึง 4,157 แคลอรีต่อกรัม



ก)

ข)

ค)

ง)

รูปที่ 2.9 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกระถินยักษ์

ก) ลักษณะลำต้นของกระถินยักษ์ ข) ลักษณะใบของกระถินยักษ์

ค) ลักษณะผลของกระถินยักษ์ และ ง) ลักษณะดอกของกระถินยักษ์

ที่มา: Elevitch (2006)

1.2) สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

กระถินยักษ์สามารถเติบโตได้ในทุกสภาพพื้นที่ แม้ในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เช่น ในพื้นที่ที่มีความแห้งแล้ง หรือพื้นที่ที่มีน้ำท่วมเป็นระยะ และไม่ต้องการสภาพดินที่มีความอุดมสมบูรณ์มากนัก สามารถเจริญเติบโตได้ดีในที่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางไม่เกิน 500 เมตร และสภาพอากาศที่มีความชื้นปานกลาง

1.3) การขยายพันธุ์ ประกอบด้วย 2 รูปแบบ ได้แก่

1.3.1) แบบอาศัยเพศ เป็นการขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ซึ่งเป็นที่นิยมมากที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในการปลูกสร้างสวนป่า เนื่องจากขยายพันธุ์ได้ง่าย และราคาไม่แพง โดยพืชที่เกิด

จากเมล็ดจะมีอายุยืน หากเก็บเมล็ดในสถานที่เหมาะสมสามารถเก็บไว้ได้หลายปี และนำไปเพาะปลูกในฤดูกาลต่อไปได้

1.3.2) แบบไม่อาศัยเพศ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การโน้มกิ่ง การตอนกิ่ง การต่อกิ่ง การติดตา การปักชำ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และการแตกหน่อ เป็นต้น

1.4) การเจริญเติบโต

กระถินยักษ์มีอัตราการเติบโตเร็ว รอบตัดฟันสั้น และมีมูลค่าของเนื้อไม้ต่ำ แต่อัตราการเติบโตจะช้าลงเมื่อนำไปปลูกในพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม จากการรวบรวมข้อมูลการเติบโตของกระถินยักษ์ พบว่า กระถินยักษ์ที่ปลูกในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก เหมาะสมปานกลาง และเหมาะสมน้อย มีค่าความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีของความสูงอยู่ระหว่าง 1.28-2.11 เมตรต่อปี และ 0.90-1.29 เซนติเมตรต่อปี ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับศักยภาพของพื้นที่ ในขณะที่มวลชีวภาพเหนือดินของกระถินยักษ์ในพื้นที่ที่เหมาะสมมากมีปริมาณ 2.66 ตันต่อไร่ต่อปี และในพื้นที่ที่เหมาะสมปานกลางมีปริมาณมวลชีวภาพ 1.97 ตันต่อไร่ต่อปี แต่ในพื้นที่ที่เหมาะสมน้อยจะมีค่ามวลชีวภาพต่ำมากเพียง 0.32 ตันต่อไร่ต่อปี

1.5) ประโยชน์ของกระถินยักษ์

1.5.1) กระถินยักษ์สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ เช่น ใช้เป็นอาหารของวัว ควาย แพะ แกะ เป็ด และไก่ เป็นต้น สำหรับเมล็ด ยอดอ่อน และฝักอ่อน สามารถนำมารับประทานได้

1.5.2) ใช้ทำไม้แปรรูป ปากี่ เสา เนื่องจากเนื้อไม้มีรายละเอียดที่ง่ายต่อการตัดและเลื่อย

1.5.3) ใช้ทำเยื่อกระดาษ แต่เนื่องจากมีลิกนินต่ำ และมีไฟเบอร์สั้นกว่าไม้สน กระดาษที่ทำจากกระถินยักษ์จึงมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดและการพับตัว แต่มีการต้านแรงดึง และมีความทึบสูง จึงเหมาะสำหรับใช้ประโยชน์ในการพิมพ์ และใช้เป็นกระดาษเขียน

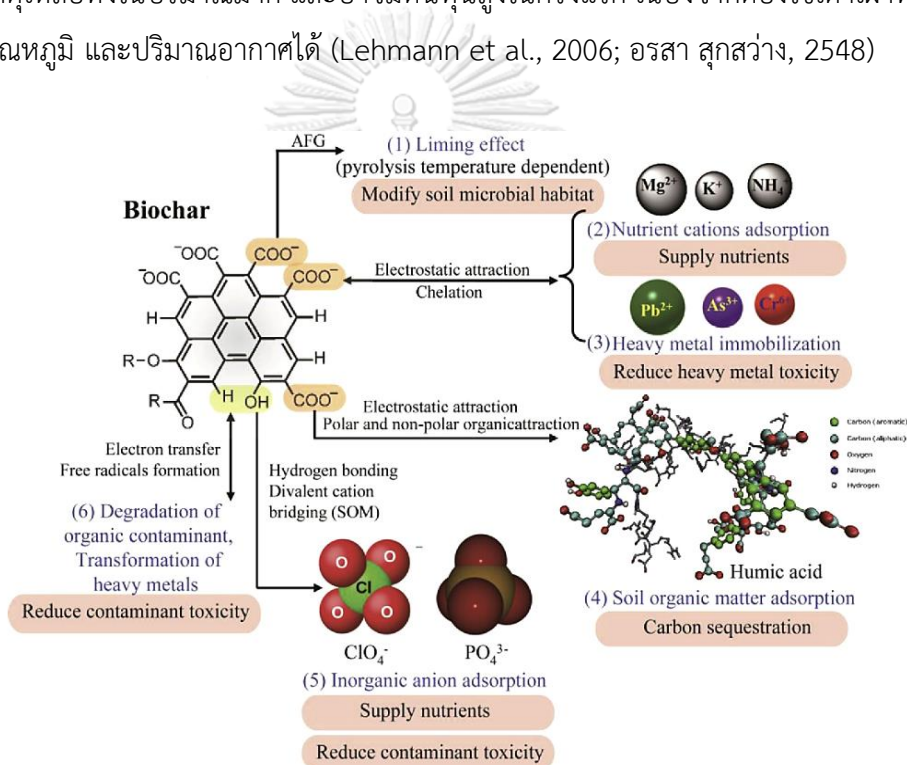
1.5.4) ใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากกระถินยักษ์มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ให้ผลผลิตสูง และสามารถตัดแตกหน่อได้ง่าย โดยสามารถตัดเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานชีวมวลได้ เมื่อมีอายุ 1-2 ปี

1.5.5) ช่วยปรับปรุงบำรุงดิน เนื่องจากกระถินยักษ์เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีแบคทีเรียจำพวกไรโซเบียมอาศัยอยู่บริเวณราก จึงมีความสามารถในการเพิ่มไนโตรเจนให้กับดิน

2.6.5 ข้อดีและข้อจำกัดของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพสามารถให้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่ ช่วยในการปรับปรุงดิน ลดการเกิดก๊าซเรือนกระจก ผลิตพลังงานทางเลือก จัดการของเสีย และช่วยแก้ปัญหาความยากจน เช่น ช่วย

ลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี และเพิ่มรายได้จากผลผลิตทางการเกษตร นอกจากนี้ Zhu et al. (2017) ได้อธิบายว่า ถ่านชีวภาพมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ช่วยลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก และลดการปนเปื้อนของสารมลพิษ โดยการนำถ่านชีวภาพไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น โลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นดินหรือน้ำ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตาม การนำถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์นั้นมีข้อจำกัด เนื่องจากถ่านชีวภาพมีน้ำหนักเบา เมื่อเข้าสู่กระบวนการเผาแล้วจะได้ผลผลิตถ่านชีวภาพเพียง 1 ใน 3 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น จึงอาจทำให้ต้องใช้วัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมาก และอาจมีต้นทุนสูงในครั้งแรก เนื่องจากต้องใช้เตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และปริมาณอากาศได้ (Lehmann et al., 2006; อรสา สุกสว่าง, 2548)



รูปที่ 2.10 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ที่มา: Zhu et al. (2017)

2.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารมาสะสมที่บริเวณผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลมาสัมผัสรวมกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งองค์ประกอบในแต่ละชนิดของสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนพื้นที่ผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับ

ประกอบกับความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายและความจำเพาะของตัวถูกละลายที่มีต่อตัวดูดซับ (Specific affinity) แต่การดูดซับไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) และกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization process) และหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่า กลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายเกิดจากการดูดซับ การตกตะกอนที่พื้นผิว กระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน หรือกระบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิว แล้วนั้น โดยทั่วไปจะใช้คำว่า Sorption (Danald, 1995) ซึ่งการดูดซับของถ่านชีวภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ 1) คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวดูดซับ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น 2) คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตัวถูกละลาย เช่น ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น 3) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย และลักษณะของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น และ 4) ระยะเวลาในการดูดซับ เป็นต้น

2.7.1 ประเภทของการดูดซับ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวดูดซับ โดยตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใด ๆ และการดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) เรียกว่า การดูดซับด้วยแรงแวลเตอร์วาล (Van der Waal's adsorption)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) จะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุล ของตัวถูกละลาย และตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) ที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับทางเคมีบางครั้งต้อง การพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (Activated adsorption) โดยพันธะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่การดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) จากแรงแวลเตอร์วาล

3) การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกละลายติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำ ๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก (tien, 2018)

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

Salleh et al. (2011) ได้อธิบายว่า ผลที่มีต่อการดูดซับนั้นมีอยู่หลากหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่

ถูกดูดซับต่อการดูดซับ ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ และความปั่นป่วน ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Surface area)

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว โดยขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วของการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้น ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) กล่าวคือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากสามารถดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย และในทางตรงกันข้าม เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ลดการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

3) อุณหภูมิ (Temperature)

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ ขึ้นอยู่กับประเภทการดูดซับของวัสดุดูดซับ เช่น ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง หากเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสของตัวดูดซับให้เคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น

4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ (Solubility)

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสาร

ที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เนื่องจากมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้ จึงไม่กล่าวได้ว่า ความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

5) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับเมื่อมีน้ำหนักรวมโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้น ตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการละลายอีกด้วย กล่าวคือ สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างยาวมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีจำนวนน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

6) ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ หากน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม หากน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่สามารถสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา ส่งผลทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ในกรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.7.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ คือ การกักสารละลาย หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง เรียกการกักนี้ว่า การดูดซับ (Absorption) ซึ่งการดูดซับที่ผิวนี้เป็น การดูดซับแบบระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ของเหลว แก๊ส และของแข็ง โดยการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งรูปแบบของการดูดซับระหว่างแก๊สกับของแข็ง และของเหลวกับของแข็ง ในการดูดซับที่พื้นผิวโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยสามารถกำจัดออกจากตัวทำละลาย และไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากสารละลายไปหาตัวดูดซับสามารถ

เกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล สำหรับความเข้มข้นของโมเลกุลในสารละลายที่ลดลง เนื่องจากส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ การเกาะติดกับโมเลกุลโดยการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ซึ่งได้พิจารณาการดูดซับจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ หากแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ เรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ หากเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า การดูดซับทางเคมี โดยสามารถอธิบายกลไกของการดูดซับได้ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายเข้าหาถ่านกัมมันต์ (Bulk solution transport) โดยตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่เป็นสารละลายไปสู่บริเวณที่ใกล้ ๆ กับอนุภาคของตัวดูดซับ (Boundary layer) ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ (Diffusion) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้เร็ว

2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางที่ผิวของตัวดูดซับ (Film diffusion) ในขั้นตอนนี้ตัวถูกดูดซับ จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆ ของสารละลายที่อยู่นิ่ง และอยู่รอบ ๆ อนุภาคของตัวดูดซับ โดยใช้วิธีการแพร่ ของโมเลกุล (Molecular diffusion) ซึ่งระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ของสารละลายที่ผ่านอนุภาคของตัวดูดซับ โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มบาง ๆ จะลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

3) ขั้นตอนการแพร่ของโมเลกุลผ่านช่องว่างในตัวดูดซับ (Pore diffusion) ภายหลังจากโมเลกุล เคลื่อนที่ผ่านฟิล์มบาง ๆ รอบอนุภาคของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในรูพรุน ของตัวดูดซับ (Intra-particle transport) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในอนุภาคนี้อาจเกิดขึ้นโดยผ่าน กระบวนการแพร่ของโมเลกุลผ่านสารละลายในรูพรุนในตัวดูดซับหรือโดยกระบวนการแพร่ผ่านไปตามพื้นผิว ของตัวดูดซับ (Surface diffusion)

4) ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงบริเวณที่เป็นผิวของตัวดูดซับ (Adsorption bond) จะเกิดการสร้างพันธะของกระบวนการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ขั้นตอนกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ด้วยเหตุนี้ ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาในการกำจัดโมเลกุลต่าง ๆ ออกจากสารละลาย แต่เมื่อเกิดขึ้นขั้นตอนการดูดซับทางเคมีจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทางธรรมชาติของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะช้า ซึ่งอาจจะช้ากว่าขั้นตอนต่าง ๆ ดังนั้น ขั้นตอนการดูดซับนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดอัตราในการดูดซับโมเลกุลต่าง ๆ ออกจากสารละลาย

2.8 แสงซินโครตรอน (Synchrotron)

2.8.1 ความหมายของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอน (Synchrotron) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุ เช่น อิเล็กตรอน ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง และถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานบางส่วน และปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความสว่างจ้ามากกว่าแสงอาทิตย์หลายเท่า ลำแสงมีขนาดเล็ก มีความเข้มแสง ความคมชัด และอำนาจการทะลุทะลวงสูง มีสเปกตรัมต่อเนื่องครอบคลุมช่วงพลังงานตั้งแต่แสงอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น แสงอัลตราไวโอเลตจนถึงรังสีเอกซ์ ทำให้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพียงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้ประโยชน์ได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้หลากหลายสาขา ทั้งทางวิทยาศาสตร์พื้นฐาน เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา ไปจนถึงวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เช่น การแพทย์ เกษตรกรรม โบราณคดี และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แสงซินโครตรอนยังมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยเพื่อตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือปรับปรุงกระบวนการผลิต เป็นต้น

ประเทศไทยมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron light source) ซึ่งเรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam photon source; SPS) ตั้งอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561) มีส่วนประกอบดังนี้

1) ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจำนวนมหาศาล โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงขับเคลื่อนในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงต่อไป ดังรูปที่ 2.11

2) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator) ทำหน้าที่แบ่งอิเล็กตรอนที่ออกจากปืนอิเล็กตรอนให้เป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า Electron bunch หลังจากนั้นจะเร่งอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงด้วยคลื่นไมโครเวฟ ให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) และส่งไปยังเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ดังรูปที่ 2.12

3) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron) ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานอิเล็กตรอนในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งการที่จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากตามที่ต้องการด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในแนวเส้นตรงเพียงอย่างเดียว นั้น ตัวเครื่องเร่งอนุภาคจะต้องมีความยาวหลาย

กิโลเมตร แต่ด้วยการคิดค้นของนักวิทยาศาสตร์ จึงได้ออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม เพื่อ บังคับอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลม และมีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือเกือบเท่าความเร็วแสง แล้วจึงถูกส่ง ต่อไปยังวงกักเก็บอิเล็กตรอนต่อไป ดังรูปที่ 2.13

4) วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring) ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) วงกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว เพื่อทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายใน ท่อสุญญากาศ โดยบริเวณที่เป็นแม่เหล็กบังคับเลี้ยวสองขั้ว (Bending magnet) จะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน (Synchrotron light)” ดังรูปที่ 2.14



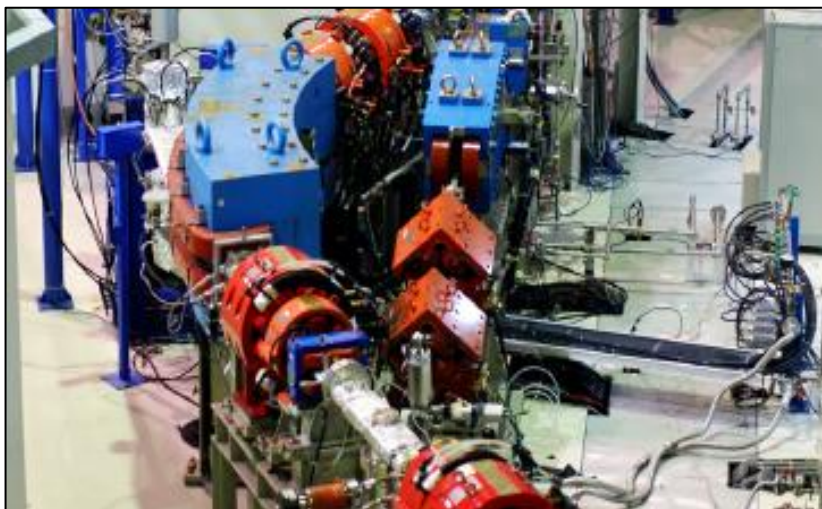
รูปที่ 2.11 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)



รูปที่ 2.12 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)



รูปที่ 2.13 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

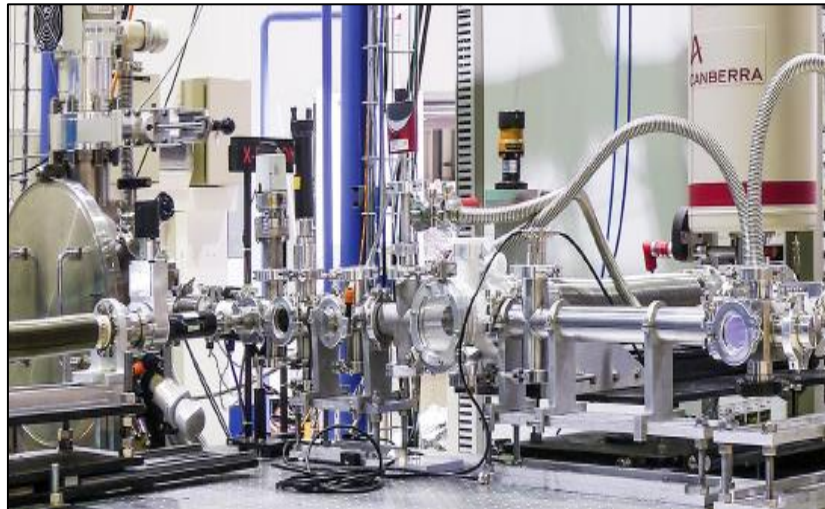


รูปที่ 2.14 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring)

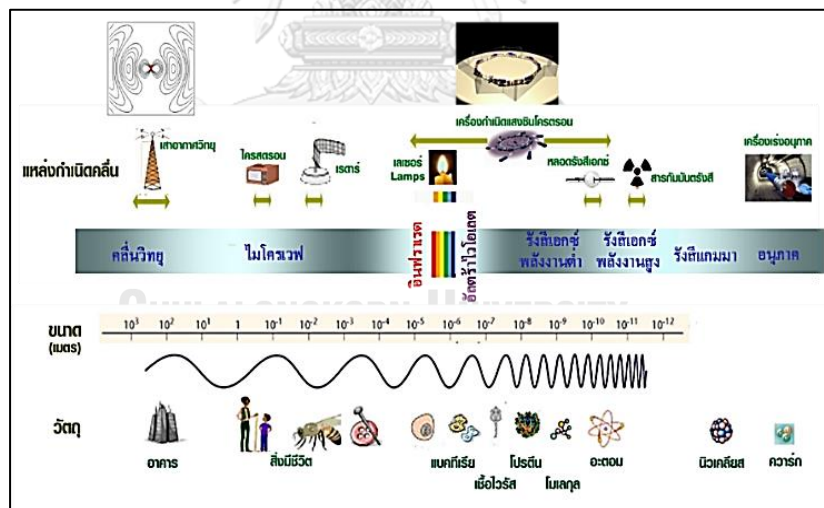
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

5) ระบบลำเลียงแสง (Beamlines) ระบบลำเลียงแสง คือ ระบบที่ทำหน้าที่นำ และเลือกแสงซินโครตรอนในย่านที่ต้องการ ซึ่งผลิตได้จากวงกักเก็บอิเล็กตรอนมายังสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสง ประกอบด้วย ท่อสุญญากาศ (Vacuum) กระจกรวมแสง (Collimating mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) กระจกโฟกัสแสง (Focusing mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (Slit) และอุปกรณ์ปลีกย่อยอื่น ๆ ส่วนท้ายสุดของระบบลำเลียงแสงจะเป็นสถานีทดลอง ซึ่งมีระบบวัดสัญญาณติดตั้งอยู่เพื่อดำเนินงานด้วยเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน เพื่อทำการวิจัยต่อไป ดังรูปที่ 2.15

6) แสงซินโครตรอน (Synchrotron light) แสงซินโครตรอน คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง และถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมา โดยแสงซินโครตรอนที่ผลิตขึ้นมานี้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น มีความสว่างจ้ากว่าดวงอาทิตย์ถึงล้านเท่า ความเข้มสูง และมีความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ย่านอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น แสงอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ระบบลำแสงแสง (Beamlines)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)



รูปที่ 2.16 ช่วงของแสงซินโครตรอน (Synchrotron light)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

7) อุปกรณ์แทรก (Insertion devices) การผลิตแสงซินโครตรอนนั้น หากต้องการแสงที่มีระดับความเข้มแสง และระดับพลังงานสูงตามที่นักวิทยาศาสตร์ต้องการ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แทรก (Insertion devices) ติดตั้งให้กับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยอุปกรณ์แทรกที่นำมาใช้ ณ เครื่องกำเนิดแสงสยามมี 3 ชนิด (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561) ได้แก่

7.1) Undulator ประกอบด้วย แม่เหล็กสองขั้วจำนวนมากวางสลับไปมา โดยมีสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แม่เหล็กจำนวนมากทำให้เกิดการเลี้ยวโค้งหลายรอบ ซึ่งทุกรอบอิเล็กตรอนก็จะปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมา แสงที่ปลดปล่อยออกมาจะรวมกันและถูกลำเลียงไปยังสถานีทดลอง ดังนั้นอุปกรณ์แทรก คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มแสงซินโครตรอน

7.2) Superconducting wavelength shifter (SWLS) คือ อุปกรณ์แทรกอีกชนิดหนึ่งที่มีจำนวนแม่เหล็กสองขั้วน้อยกว่า Undulator แต่มีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าทำให้เกิดการเลี้ยวโค้งของอิเล็กตรอนที่รุนแรงกว่า เป็นผลให้แสงที่ผลิตได้จาก Wavelength shifter นั้นมีพลังงานสูงกว่าเมื่อเทียบกับแม่เหล็กสองขั้วหรือ Undulator การที่จะผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำที่เป็นซูเปอร์คอนดักเตอร์ โดยค่าแม่เหล็กที่ผลิตได้จากอุปกรณ์แทรก ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จังหวัดนครราชสีมา มีค่าเท่ากับ 6.5 เทสลา เพื่อผลิตแสงให้มีพลังงานในช่วงเอกซ์พลังงานสูง (hard X-rays)

7.3) Multi-pole wiggler (MPW) คือ แม่เหล็กถาวรประเภทแม่เหล็กหลายขั้ว เพื่อเพิ่มพลังงานของแสงซินโครตรอน สำหรับการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูง ซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรังสีแกมมา

8) สถานีทดลอง (Experimental station) ณ สถานีทดลอง เมื่อแสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างอะตอมต่อไป

2.8.2 วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน

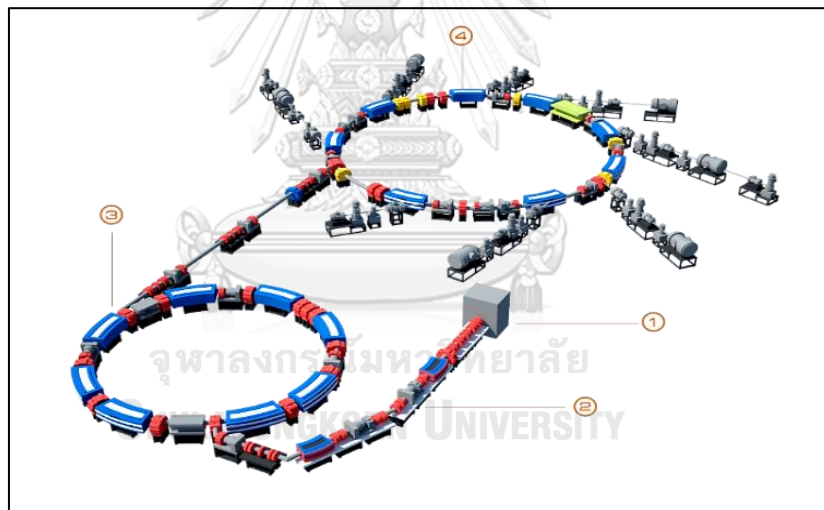
ประกอบด้วย

1) ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการผลิตอิเล็กตรอน โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้โลหะของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นจึงใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ขั้วบวกในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน

2) ขั้นตอนที่สอง เป็นการเร่งความเร็วอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรง ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง หรือ Linac เพื่อเร่งอิเล็กตรอนมีความเร็วสูงในระดับที่ต้องการ (40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) จากนั้นป้อนอิเล็กตรอนนี้เข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมหรือเครื่องซินโครตรอน

3) ขั้นตอนที่สาม อิเล็กตรอนภายในเครื่องซินโครตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเป็นวงกลม และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง (1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ 1 GeV) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะส่งเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอนเป็นขั้นตอนสุดท้าย

4) ขั้นตอนที่สี่ วงกักเก็บอิเล็กตรอนทำหน้าที่เพิ่มพลังงานเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) เพื่อการผลิตแสงซินโครตรอนด้วยการใช้สนามแม่เหล็กบีบบังคับให้อิเล็กตรอนเลี้ยวเบน และปลดปล่อยแสงหรือโฟตอนออกมาขณะเลี้ยวเบน และกักเก็บอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้น (รูปที่ 2.17) เพื่อนำแสงซินโครตรอนมาใช้ประโยชน์ และให้บริการแก่นักวิทยาศาสตร์ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ต่อไป (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561)



รูปที่ 2.17 ระบบลำแสง (Beamlines)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

2.8.3 ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน

1) งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน

แสงซินโครตรอนสามารถใช้ในการวิจัยขั้นพื้นฐานในการหาคุณสมบัติของอะตอม โมเลกุล และความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลของสสาร การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเมื่ออยู่ในสภาวะความดันและอุณหภูมิสูง การศึกษาคุณสมบัติบางประการของแม่เหล็ก และ

การศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณพื้นผิว และมลพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ดี เนื่องจากสามารถตรวจวัดสารที่มีปริมาณน้อยมาก (Trace elements) ได้อย่างแม่นยำ

2) งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพและวิทยาศาสตร์การแพทย์

แสงซินโครตรอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการศึกษาโครงสร้างของสารชีวโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งพบในเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก เป็นต้น ตัวอย่าง เช่น การศึกษาโครงสร้างสามมิติของโปรตีนด้วยเทคนิค Protein crystallography ซึ่งผลที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการออกแบบตัวยารักษาโรคได้ หรือการใช้เทคนิค Infrared micro-spectroscopy เพื่อตรวจจำแนกเซลล์ต้นกำเนิด (Stem cell) เป็นต้น

3) งานวิจัยในเชิงอุตสาหกรรม

การศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ หรือการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่เดิม นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในเชิงลึก โดยนำความรู้ใหม่ ๆ ที่ได้มาใช้ในการเพิ่มมูลค่าในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากพลังงานของแสงซินโครตรอนนั้นครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ย่านรังสีอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ จึงครอบคลุมการศึกษาตั้งแต่ขนาดนาโนเมตรจนถึงไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดของวัสดุในระดับจุลภาค ที่ได้รับการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในการพัฒนาอุตสาหกรรมขั้นสูง (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561)

2.8.4 ระบบลำเลียงแสง BL1.1W: MXT

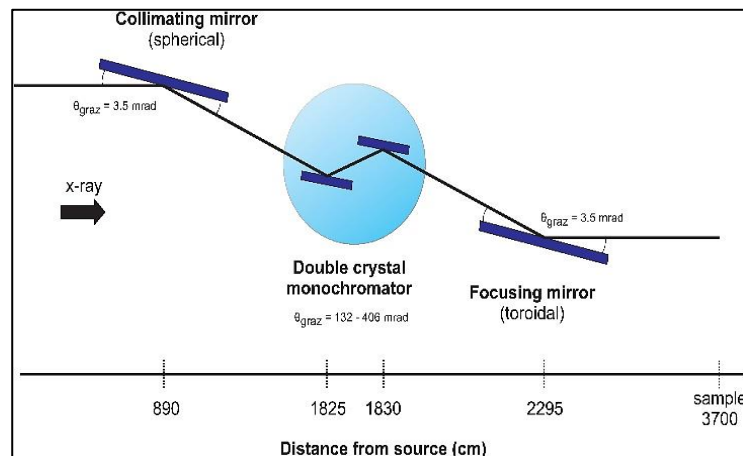
ระบบลำเลียงแสงที่ 1.1W (Multiple X-ray techniques) ถูกออกแบบมาให้สามารถรองรับได้ทั้งเทคนิคการทดลองแบบการกระเจิงแสง (Scattering) และแบบการดูดกลืนแสง (Spectroscopy) ในระบบลำเลียงแสงมีอุปกรณ์ทางเลนส์ (Optics) ที่สำคัญ 3 ชิ้น ดังรูปที่ 2.18 โดยมีกระจกรวมแสง (Collimating mirror) สำหรับการทำให้แสงเป็นแสงขนานในแนวตั้ง (Vertical) ก่อนจะเข้าไปที่เครื่องคัดเลือกพลังงานแสงแบบผลึกคู่ (Double crystal monochromator; DCM) ซึ่งใช้สำหรับการคัดแยกพลังงาน โดยการวางอุปกรณ์ในลักษณะนี้จะทำให้สามารถได้แสงที่มีพลังงานเดี่ยวที่มีความละเอียดในการแยกพลังงาน (Energy resolution) เท่ากับ 10^{-4} ได้ ซึ่งเหมาะสมกับเทคนิคการทดลองแบบการดูดกลืนแสง และถัดจากเครื่องคัดเลือกพลังงานแสงแบบผลึกคู่ (Double crystal monochromator; DCM) จะมีกระจกโฟกัสแสง (Focusing mirror) ซึ่งทำหน้าที่ในการลดขนาด และปรับรูปร่างของแสงให้เหมาะสมกับเทคนิคการทดลองแบบการกระเจิงแสง (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561)

โดยหลักการของเทคนิคเอกซเรย์แอมเบอร์บ์ชั้นสเปกโทรสโกปี (Synchrotron radiation x-ray absorption spectroscopy; SR-XAS) คือ การฉายรังสีเอกซ์บนสารที่ต้องการศึกษา และวัด

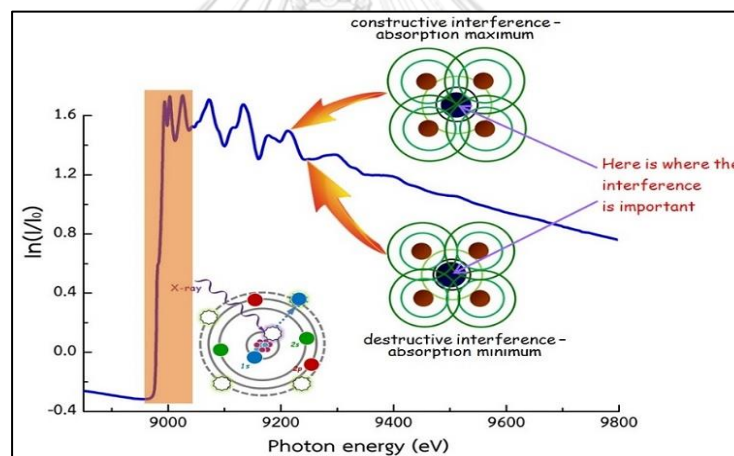
อัตราส่วนการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้บ่งบอกถึงโครงสร้างของสารตัวอย่างในระดับอะตอมได้ โดยระบบลำแสง และสถานีทดลองนี้ สามารถทำงานได้ในช่วงพลังงานแสงซินโครตรอนย่านรังสีเอกซ์ตั้งแต่ 4,000-18,000 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดยใช้เครื่องคัดเลือกพลังงานแสงแบบผลึกคู่ (Double crystal monochromator หรือ DCM) โดยอาศัยหลักการที่ธาตุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ค่าพลังงาน Absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เป็นตัวกำหนดมุมตกกระทบระหว่างแสงซินโครตรอนและผลึกในการคัดแยกรังสีเอกซ์ การศึกษาด้วยเทคนิคนี้ยังสามารถระบุสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ของธาตุในสารประกอบ สามารถจำแนกชนิดของสารที่มีองค์ประกอบธาตุชนิดเดียวกัน รวมถึงสามารถศึกษาลักษณะพันธะเคมี สมมาตร โคออดิเนชัน โครงสร้างอะตอม พันธะและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ในพืชได้ (Koren et al., 2013; Lombi et al., 2011; Lombi et al., 2009) นอกจากนี้ สามารถอนุมานรูปร่างของออร์บิทัลได้ (Orbital) และสามารถอธิบายกลไกของการสะสมสารโลหะหนักได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (Isaure et al., 2006) สำหรับสัญญาณสเปกตรัมของการใช้แสงซินโครตรอนด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอมเบอร์บั้นสเปกโทรสโกปี ประกอบด้วย 2 โครงสร้างหลัก (ดังรูปที่ 2.19) คือ

1) ช่วง X-ray absorption near edge structure (XANES) ปรากฏในสเปกตรัมของสัญญาณ XAS ตั้งแต่บริเวณใกล้ขอบการดูดกลืนรังสีของอะตอมจนถึงบริเวณช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 50 eV เนื้อหาของการดูดกลืน โครงสร้าง XANES ที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานระดับลึก (Core electron) แล้วย้ายสถานะพลังงานไปยังสถานะที่ว่างอยู่ภายในอะตอม จากโครงสร้าง XANES สามารถนำมาวิเคราะห์ได้หลายอย่าง เช่น วิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของธาตุ รูปฟอร์มทางเคมีของอะตอม และสามารถแยกองค์ประกอบทางเคมีที่มีในสารตัวอย่างได้ เป็นต้น

2) ช่วง Extended x-ray absorption fine structure (EXAFS) ปรากฏในสเปกตรัมของสัญญาณ XAS ตั้งแต่บริเวณต่อจากโครงสร้าง XANES เนื้อหาของการดูดกลืนรังสี ไปจนถึงบริเวณช่วง พลังงานโฟตอนประมาณ 500 eV ถึง 1,000 eV โครงสร้าง EXAFS เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยมาจากอะตอมในระหว่างการดูดกลืนรังสีเอกซ์ และประพัตต์ตัวเป็นคลื่นไปชนกับอะตอมรอบข้างทำให้เกิดการกระเจิง และสะท้อนกลับมาทำให้เกิดการแทรกสอด ดังนั้นจากโครงสร้าง EXAFS ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอม ความยาวพันธะ รูปแบบการจับตัว ของโมเลกุลของสารที่สนใจ รวมถึงชนิด และจำนวนของอะตอมรอบข้างอะตอมที่สนใจได้



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ทางเลนส์ (Optic) ของระบบลำเลียงแสงที่ 1.1W
 ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

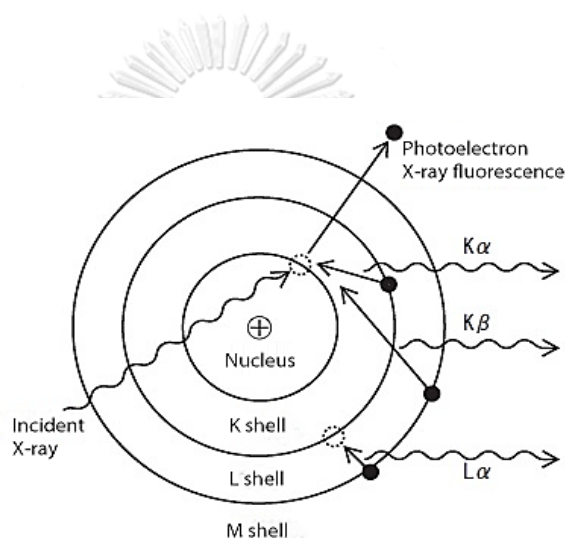


รูปที่ 2.19 สัญญาณสเปกตรัมของการใช้แสงซินโครตรอน
 ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

2.8.5 ระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF

เทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Micro-X-ray fluorescence) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการศึกษารูปแบบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของความแตกต่างของชั้นพลังงานของแต่ละธาตุ เมื่อกระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในจะทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" (ดังรูปที่ 2.20)

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างที่สนใจได้ และข้อดีของเทคนิคนี้ คือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยทั่วไปมักจะใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการคายพลังงานของอะตอมในตัวอย่าง และเนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง ทำให้สามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการหาองค์ประกอบของธาตุที่บริเวณเล็ก ๆ บนตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียว นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่างได้ (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2561)

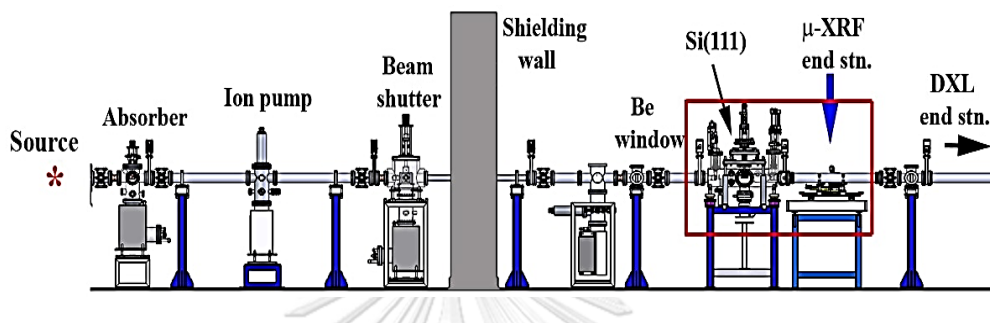


รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดการเรืองของรังสีเอกซ์

ที่มา: Theisen (1965)

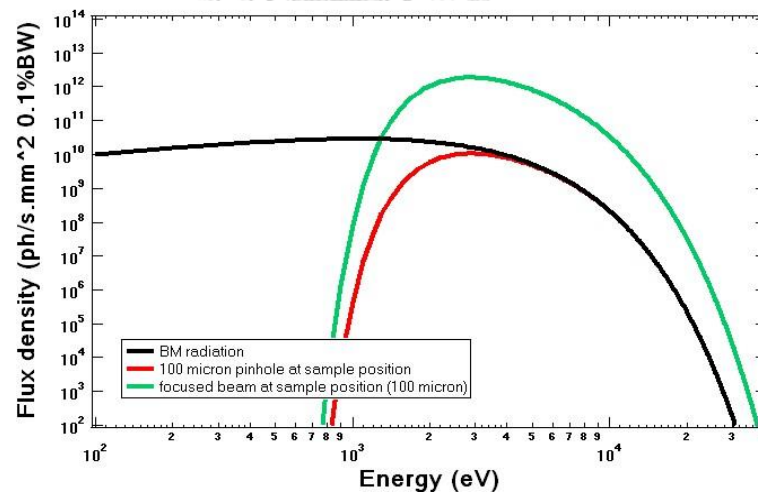
ระบบลำเลียงแสง BL6b ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ Absorber, Beam shutter, Shielding wall และ Beryllium window โดยที่อุปกรณ์สองตัวแรกจะทำหน้าที่เปิดปิด เพื่อให้แสงซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง Shielding wall หรือกำแพงกันรังสี ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนหลุดออกมายังภายนอก ส่วน Beryllium window จะถูกใช้เป็นตัวกรองแสงซินโครตรอน โดยจะยอมให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ผ่านเท่านั้น ดังรูปที่ 2.21 ระบบลำเลียงแสงนี้จะใช้แสงซินโครตรอนจากแม่เหล็กสองขั้ว หรือ Bending magnet (BM) ซึ่งจะให้แสงซินโครตรอนตามเส้นสีดำ โดยแสงซินโครตรอนนี้จะครอบคลุมพลังงานตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงรังสีเอกซ์ (แกน y จะเป็นความหนาแน่นของแสงซินโครตรอน (Flux density)) เมื่อผ่าน Beryllium window แสงซินโครตรอนจะถูกกรองให้เหลือเฉพาะย่านรังสีเอกซ์เท่านั้นดังเส้นสีแดง

และที่ตำแหน่งที่เป็นสถานีทดลอง BL6b:Micro-XRF แสงซินโครตรอนจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์รังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นชนิดที่เรียกว่า Polycapillary half lens และจะให้แสงที่จุดโฟกัส หรือตำแหน่งตัวอย่างมีขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ดังเส้นสีเขียวในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แผนผังของระบบลำแสงที่ 6 สำหรับเทคนิค Micro-XRF และ DXL

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)



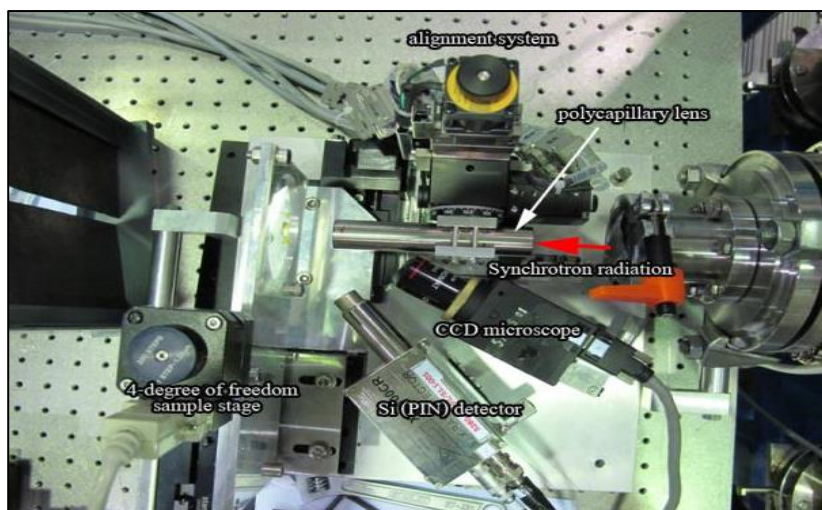
รูปที่ 2.22 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำแสงที่ 6

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

สถานีทดลอง Micro-XRF ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ (รูปที่ 2.23) ได้แก่

- 1) เลนส์รังสีเอกซ์ (Polycapillary lens) โดยจะติดตั้งอยู่บนระบบ Alignment เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูง
- 2) กล้องไมโครสโคป (CCD microscope) สำหรับตรวจสอบและบันทึกภาพตัวอย่างก่อนและขณะทำการทดลอง
- 3) ระบบจับยึดตัวอย่าง (Sample stage) โดยตัวอย่างจะ

สามารถเลื่อนซ้ายขวาตั้งฉากกับแสงเพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่าง และ 4) ระบบวัดรังสี ณ สถานีทดลอง คือ Si(PIN) detector ซึ่งมีค่า Energy resolution ที่ 160 eV ณ ตำแหน่ง Mn-K α line



รูปที่ 2.23 สถานีทดลอง Micro-XRF ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2561)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยด้านการศึกษาปุ๋ยคอกมหาวิทยาลัย

พนัส พงศ์ผลาดิสัย (2553) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึง แคลเซียมและสังกะสีด้วยข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่ อำเภอมะนัง จังหวัดตาก โดยทำการ ปลูกข้าวสี่สายพันธุ์ ได้แก่ 1) ขาวดอกมะลิ 105 2) กข 6 3) พิษณุโลก 3 และ 4) เหนียวสันป่าตอง ในโรงเรือนเพาะชำ และทำการเก็บตัวอย่างดินและข้าว (ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน) ที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน นำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและสังกะสีทั้งหมดในดิน และส่วนต่าง ๆ ของข้าว ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 120 วัน การสะสมแคลเซียมในส่วนเหนือดินมี ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนใส่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ปริมาณ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ และปลูกพันธุ์ข้าวเหนียวสันป่าตอง ส่วนการสะสมแคลเซียมในส่วนใต้ดินมีค่า ต่ำสุดในชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนใส่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ปริมาณ 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และปลูกพันธุ์ข้าว พิษณุโลก 3 โดยมีค่าเท่ากับ 9.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับการสะสมแคลเซียมในเมล็ดมีค่าต่ำสุด ในชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนใส่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ปริมาณ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ และปลูกพันธุ์ข้าว

พิษณุโลก 3 โดยมีค่าเท่ากับ 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนแต่ไม่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และปลูกพันธุ์ข้าวพิษณุโลก 3 มีค่าการสะสมแคดเมียมในเมล็ดสูงที่สุด เท่ากับ 0.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ปุ๋ยอินทรีย์สามารถช่วยตรึงแคดเมียมให้อยู่ในดินได้ โดยมีการแนะนำเกษตรกรให้ใช้หรือใส่ปุ๋ยอินทรีย์ในปริมาณ 1,000-2,000 กิโลกรัมต่อไร่

Elouear et al. (2016) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยคอกจากมูลแกะและปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว 970 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสี 9,641 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแคดเมียม 53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยใช้หญ้าอัลฟาลฟา (*Medicago sativa* L.) ผลการทดลองพบว่า หญ้าอัลฟาลฟาสามารถทนทานต่อความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีในปริมาณสูง ๆ ได้ และการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพไม่มีผลกับชุดทดลองที่เติมปุ๋ยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมปุ๋ย นอกจากนี้ยังพบว่า ปุ๋ยคอกจากมูลแกะสามารถช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า และลดระดับความเข้มข้นของโลหะหนักที่สกัดด้วย DTPA-Extractable ในดินได้ และในขณะที่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ยังช่วยเพิ่มการสะสมโลหะหนักดังกล่าวในพืช และสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดิน ตลอดจนสามารถใช้ฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโดยการนำโลหะหนักเข้าไปสะสมในพืช ในขณะที่ปุ๋ยคอกจากมูลแกะสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการตรึงโลหะหนักไว้ที่บริเวณรากพืชได้ด้วย

Kiran et al. (2017) ได้ศึกษาการใช้ปุ๋ยคอกจากมูลวัว และถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัว ในการใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อลดการสะสมของแคดเมียมในผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) โดยใช้ในอัตรา 0, 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษพบว่า ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแคดเมียมที่ใช้ได้ (Cadmium bioavailability) ดีกว่าการใช้ปุ๋ยคอกแบบธรรมดา โดยสามารถช่วยลดได้ 34.3-69.9 เปอร์เซ็นต์ และมีการสะสมในผักกาดเขียวปลีลดลง 51.2 และ 67.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวสามารถช่วยเพิ่มการสะสมของธาตุอาหารรอง ได้แก่ สังกะสี แมงกานีส เหล็ก และทองแดง และเพิ่มมวลชีวภาพด้วย ดังนั้นการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจึงเป็นวิธีที่ช่วยลดการปนเปื้อนแคดเมียม และยังสามารถส่งเสริมความปลอดภัยด้านอาหารด้วย

Sato et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการลดการดูดซับแคดเมียมเข้าไปในผักขม (*Spinacia oleracea* L.) ด้วยดินที่ปรับปรุงด้วยปุ๋ยคอก ได้แก่ มูลวัว มูลสุกร และมูลสัตว์ปีก ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในใบของผักขมเมื่อปรับปรุงด้วยมูลสัตว์ทั้งสามชนิด จะทำให้ปริมาณแคดเมียมลดลงอยู่ในช่วง 34-38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแคดเมียมในใบผักขมที่ใช้สารปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยเคมี แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารปรับปรุงดินด้วยมูลสุกรและมูลสัตว์ปีก สามารถทำให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในดินสูงเมื่อเทียบกับมูลวัว ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวควร

เลือกใช้สารปรับปรุงดินด้วยมูลวัว ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในดินต่ำ และมีคุณสมบัติในการลดการดูดดึงแคดเมียมในผักขมด้วย

2.9.2. งานวิจัยด้านการศึกษาก่านชีวภาพ

พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์ (2560) ได้ทำการศึกษาก่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ร่วมกับปุ๋ยหมัก และสารสกัดชีวภาพสำหรับปรับปรุงดินทรายเขตเงาฝนในพื้นที่ศูนย์ศึกษากการพัฒนาห้วยทราย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลสามพระยา อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ ทางกายภาพ และเคมีบางประการของก่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า ก่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวมีพื้นที่จำเพาะมากที่สุด 7.83 ตารางเมตรต่อกรัม รongลงมา คือเปลือกทุเรียน 4.25 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ก่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนและฝักสำโรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมากที่สุด คือ 208.80 และ 200.30 อังสตรอม (A°) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีด้านองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน พบว่า ก่านชีวภาพจากฝักหางนกยูงให้คาร์บอน และไฮโดรเจน ในอัตราสูงที่สุดร้อยละ 72.04 และ 4.10 ตามลำดับ และก่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน มีไนโตรเจนสูงสุตร้อยละ 1.18 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองปลูกหอมแดงพันธุ์ลับแล และผสมก่านชีวภาพ พบว่า ชุดควบคุม ชุดดินรวม ชุดดินผสมปุ๋ยหมักร่วมกับก่านชีวภาพจากกะลามะพร้าว และชุดดินผสมปุ๋ยหมักร่วมกับก่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน มีค่าการเจริญเติบโตของต้นเฉลี่ย และค่าของน้ำหนักรวมที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนชุดทดลองที่มีดินผสมปุ๋ยหมักร่วมกับก่านชีวภาพจากฝักสำโรงและฝักหางนกยูง มีค่าการเจริญเติบโต และค่าน้ำหนักรวมที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นน้อยกว่า 0.05 ($p < 0.05$)

Břendová et al. (2016) ได้ทำการศึกษาผลของก่านชีวภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมและสังกะสี โดยใช้ต้นหลิว (*Salix babylonica* L.) โดยทำการทดลองในสภาวะเรือนกระจก และดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม 43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสังกะสี 4,340 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตรวจวัดคุณภาพของน้ำชะ โดยปลูกต้นหลิวในดินปนเปื้อน และเติมก่านชีวภาพที่ทำจากกะลามะพร้าวในอัตราที่ต่างกัน คือ 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของดิน และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดย Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) ผลการศึกษาพบว่า ก่านชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของมวลชีวภาพ แคดเมียมและสังกะสีที่ดูดดึงโดยพืชลดลง ในส่วนของน้ำชะ พบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่า ก่านชีวภาพมีประสิทธิภาพในการควบคุมธาตุที่มีความเสี่ยงต่อพืชไม่ให้ปนเปื้อนไปกับน้ำชะ สามารถช่วยปรับปรุงผลผลิตพืช และเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินปนเปื้อนได้

Han et al. (2016) ได้ทำการศึกษาและฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Total petroleum hydrocarbon; TPHs) ด้วยการปลูกข้าวไรย์ (Ryegrass) และเติมถ่านชีวภาพ จากฟางข้าวที่เผาในอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแบ่งชุดการทดลองเป็น 4 ชุดทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ) 2) ชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์ และ ไม่ปลูกพืช 3) ชุดการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพและปลูกพืช และ 4) ชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์และปลูกพืช ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 90 วัน ผลการทดลองพบว่า ข้าวไรย์สามารถ ช่วยลดระดับความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนและจำนวนของแอลเคน (n-alkanes) ในดินได้ 45.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าโพลีไซคลิกอะโรมาติกคาร์บอน Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) ที่สามารถลดได้ 30.34 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพ พบว่า ไม่มีผลต่อการบำบัดไฮโดรคาร์บอนด้วยข้าวไรย์อย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามยังพบว่า การปรับปรุงดินด้วย ถ่านชีวภาพแสดงให้เห็นผลทางด้านลบต่อการเจริญเติบโตและการดูดซับไฮโดรคาร์บอนด้วยข้าวไรย์ โดยพบว่า อัตราการบำบัดไฮโดรคาร์บอนต่ำ ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่า การปลูกข้าวไรย์มีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน ในขณะที่ ถ่านชีวภาพอาจจะไม่เหมาะสมต่อการใช้ฟื้นฟูด้วยพืชในดินที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

He et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่ทำจากหญ้าเนเปียร์ในการ เคลื่อนย้ายแคดเมียมที่ปนเปื้อนและบิวทาคลอร์ในดินด้วยกวางตุ้ง (*Brassica parachinensis*) โดย ทำการเตรียมถ่านชีวภาพด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ได้แก่ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส และ ทำการเติมถ่านชีวภาพในดินที่ปลูกพืชในอัตรา 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์ปริมาณ แคดเมียมในพืชด้วย Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ผลการทดลองพบว่า การเติมถ่านชีวภาพทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และปริมาณแคดเมียมที่ ดูดซับโดยพืชลดลง ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลงมากที่สุด 66.08 เปอร์เซ็นต์จาก การเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ที่เตรียมในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ่าน ชีวภาพที่ทำจากหญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนแคดเมียม โดยสามารถยับยั้ง การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในพืชจากส่วนใต้ดินไปยังส่วนที่อยู่เหนือดินได้

Pituya et al. (2017) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของการเตรียมถ่านชีวภาพจาก ไม้กระถินสำหรับการปรับปรุงดิน โดยผ่านกระบวนการแยกสลายไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาอุณหภูมิการเผาที่ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิว เส้น ผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย และความเป็นกรด-ด่าง กับอุณหภูมิและเวลา จากผลการทดลองพบว่า

อุณหภูมิไฟโรไลซิสมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพื้นที่ผิวเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย และความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพ ในขณะที่เวลาไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมถ่านชีวภาพจากไม้กระถิน คือ 434.8 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังรายงานผลการทดลองว่า ช่วงของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 413-450 องศาเซลเซียส และช่วงเวลาที่เหมาะสม คือ 1-2 ชั่วโมง

Ibrahim et al. (2016) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม สังกะสี นิกเกิล และสารหนูในหญ้าอัลฟัลฟา (*Medicago sativa* L.) โดยเก็บตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากเมือง Luoyuan ประเทศจีน ทำการทดลองในโรงเรือน โดยปลูกหญ้าอัลฟัลฟาในดินปนเปื้อนเป็นเวลา 3 เดือน ใส่ถ่านชีวภาพที่ทำจากแกลบในแต่ละชุดการทดลองในอัตรา 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เก็บตัวอย่างพืชมาวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ และวัดปริมาณตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม สังกะสี นิกเกิล และสารหนูด้วย Inductively coupled plasma-mass spectrometer (ICP-MS) และวัดปริมาณโพแทสเซียม ฟอสฟอรัส ซิลิกอน และโซเดียม ด้วยเครื่องมือ Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเติมถ่านชีวภาพในอัตราที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้พืชมีการสะสมโพแทสเซียม ฟอสฟอรัส ซิลิกอน และโซเดียม ซึ่งจัดเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช ในส่วนราก ลำต้นและใบ เพิ่มมากขึ้น และพบว่าพืชมีการดูดซับตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และนิกเกิลไปสะสมในส่วนราก ลำต้น และใบ มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และเมื่อเพิ่มอัตราของถ่านชีวภาพ ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างในดินสูงขึ้น และเมื่อเติมถ่านชีวภาพทำให้โลหะหนักเกิดการละลายอยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้ลดลง และเกิดการตกตะกอนของเกลือเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำจะทำให้เกิดเป็นลักษณะของสารเชิงซ้อนที่เสถียรทำให้โลหะหนักเคลื่อนที่เข้าสู่พืชลดลงเช่นกัน ในขณะที่ปริมาณโครเมียม และสารหนู พืชมีการดูดซับสูงขึ้นหรือไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มอัตราของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ ผลการทดลองยังพบว่า หญ้าอัลฟัลฟามีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นในส่วนรากและลำต้นเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพด้วยอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ และมีมวลชีวภาพลดลงเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพด้วยอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการลดลงของมวลชีวภาพอาจเนื่องมาจากปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยสารหนูจะเข้าไปมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม ทำให้อวัยวะของพืชกลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถทำหน้าที่ทางเมตาบอลิซึม และมีเนื้อเยื่อที่ไม่สามารถสังเคราะห์อาหารได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งสารหนูจะไปเข้าทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อคอลโรพลาสต์ ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้มวลชีวภาพลดลง รากมีมวลลดลง รวมทั้งลดความสูงของลำต้น

อัตราการงอก การแตกกิ่งก้านและผลผลิต ซึ่งทำให้พืชมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง และส่งผลให้พืชตายได้ในที่สุด

Fellet et al. (2014) ได้ทำการศึกษาผลของการดูดตั้งแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ในพืช 3 ชนิดคือ *Anthyllis vulneraria*, *Poa alpine* และ *Noccaea rotundifolium* โดยใช้ถ่านชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ 1) เศษไม้จากการตัดแต่งสวนผลไม้ 2) ไม้สน และ 3) ปุยมูลสัตว์อัตรา 70 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับไม้สน 30 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองในอัตรา 0, 1.5 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดิน ผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพแต่ละชนิด ช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดินได้แตกต่างกัน สำหรับถ่านชีวภาพที่ทำจากปุยมูลสัตว์ และเศษไม้จากการตัดแต่งสวนผลไม้ สามารถช่วยลดการสะสมแคดเมียมและตะกั่วในส่วนเหนือดินของพืชได้มากที่สุด นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถช่วยเพิ่มมวลชีวภาพได้มากที่สุดที่อัตรา 1.5 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำถ่านชีวภาพ

Prapasdee et al. (2014) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง ต่อการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของต้นถั่วเขียว (*Vigna radiata* L.) ที่เจริญเติบโตในอัตราของถ่านชีวภาพที่ต่างกัน 3 อัตรา ได้แก่ 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ และวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีในพืชและดินด้วย Flame atomic absorption spectrometer (FAAS) ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราของถ่านชีวภาพ 10 เปอร์เซ็นต์ ต้นถั่วเขียวมีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตมากที่สุด โดยแคดเมียมและสังกะสีมีความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของพืช (Cadmium and Zinc bioavailability) ในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ อีกทั้งยังพบว่า ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมในต้นถั่วเขียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราของถ่านชีวภาพ และปริมาณการดูดตั้งสังกะสีในต้นถั่วเขียวมีค่าลดลง ผลของการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การใช้ต้นถั่วเขียวร่วมกับถ่านชีวภาพเป็นวิธีที่เหมาะสมในการส่งเสริมการตรึงสังกะสีในพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Park et al. (2011) ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพในการลดการเคลื่อนที่ของทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยการปลูกผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) ในโรงเรือนทดลอง และได้ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากเหมืองตะกั่วในเมือง Kapunda ประเทศออสเตรเลีย โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์ ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม (ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ) ชุดการทดลองใส่ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลไก่ในอัตรา 1, 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองใส่ถ่านชีวภาพที่ทำจากเศษไม้อัตรา 1, 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ เก็บ

ตัวอย่างพืชและแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ วิเคราะห์ปริมาณทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลไก่มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม ทองแดง และตะกั่วเข้าสู่พืชได้ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และยังสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้มากกว่าถ่านชีวภาพที่ทำจากเศษกิ่งไม้ด้วย งานวิจัยนี้จึงแนะนำให้มีการใช้ถ่านชีวภาพที่ทำมาจากมูลไก่ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยพืชได้

2.9.3 งานวิจัยด้านการศึกษาหญ้าเนเปียร์

ประณต มณีอินทร์ และปิติพงษ์ โต้บันลือภพ (2558) ได้ทำการศึกษาระยะเวลาของการตัดหญ้าเนเปียร์ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ หญ้าปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* Pakchong 1) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) หญ้าบาน่า (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* cv. Bana grass) และหญ้าเนเปียร์ไต้หวัน A-148 (*Pennisetum purpureum* cv. Taiwan A-148) โดยได้ทำการศึกษารอบการปลูกทางเคมี ผลผลิตชีวมวล และการผลิตก๊าซชีวภาพ และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาของการตัด 45, 60, 120 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ระยะเวลาการตัด 180 วัน ให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุดที่ 7.41 ตันต่อไร่ รองลงมา คือ หญ้าบาน่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าเนเปียร์ไต้หวัน A-148 ตามลำดับ สำหรับองค์ประกอบของผนังเซลล์ พบว่า หญ้าเนเปียร์ยักษ์มีเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่ระยะเวลาของการตัด 120 วัน มีค่าสูงสุดร้อยละ 29 ส่วนผลผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า ที่ระยะเวลาการตัด 60 วัน หญ้าเนเปียร์ยักษ์ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 126.67 ลูกบาศก์เมตรตันต่อน้ำหนักแห้งชีวมวล คิดเป็น 120.67 ลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพต่อไร่ต่อปี จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ผลผลิตชีวมวลต่อไร่ต่อปีที่ระยะเวลาของการตัดทุก ๆ 60 วัน จะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

สุริยะ สมศิริ และสุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ (2558) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบศักยภาพของการแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงาน 3 รูปแบบ คือ แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ก๊าซชีวภาพ (Biogas) และไบโอเอทานอล (Bioethanol) โดยทดลองปลูกในพื้นที่เป็นระยะเวลา 1 ปี ที่เท่ากัน และมีวิธีการศึกษาและเปรียบเทียบ 2 วิธี คือ การใช้สมการทางเคมีหรือค่าทางทฤษฎี และการใช้ผลการทดลองจากงานวิจัย โดยทั้ง 2 วิธี สามารถพิจารณาการเปลี่ยนเป็นพลังงานทั้ง 3 รูปแบบ แล้วนำมาคำนวณหาพลังงานที่ได้ จากผลการศึกษาพบว่า แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่สามารถแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงานได้มากที่สุด คือ 304.92 จิกะจูลต่อไร่ต่อปี (กรณีคำนวณทางทฤษฎี) และ 203.01 จิกะจูลต่อไร่ต่อปี (กรณีคำนวณจากผลการทดลอง) รองลงมาคือ การแปรรูป

เป็นก๊าซชีวภาพ มีค่าพลังงานที่ได้จากทางทฤษฎี และจากผลการทดลองเท่ากับ 158.70 และ 88.66 จิกะจุลต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ ส่วนการแปรรูปเป็นไบโอเอทานอลมีค่าพลังงานที่ได้ต่ำที่สุด คือ 103.15 และ 84.8 จิกะจุลต่อไร่ต่อปี จากวิธีทางทฤษฎี และจากผลการทดลอง ตามลำดับ

ซิโนรส ศรีศิริ และนักรบ กลัดกลีบ (2556) ได้ทำการศึกษาและประเมินศักยภาพพืชพลังงานเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้า 7 สายพันธุ์ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) หญ้าแพงโกล่า (*Digitaria eriantha*) หญ้ากีนีสีม่วง (*Panicum maximum*) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) หญ้าปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* Pakchong 1) หญ้าบาน่า (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* cv. Bana grass) และหญ้าเนเปียร์มวกเหล็ก (*Pennisetum purpureum* cv. Mauklek) ผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าบาน่าที่ทำการตัดในช่วงการเจริญเติบโตที่ระยะเวลา 60 วัน มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและให้ปริมาณเซลลูโลสสูง นอกจากนี้ยังพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีเปอร์เซ็นต์การผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 50.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ เท่ากับ 46.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์มีศักยภาพสูง สามารถนำมาใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับพืชพลังงานได้ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นชีวมวลเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้

Juel et al. (2018) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) และผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) ในการฟื้นฟูตะกอนจากโรงงานฟอกหนังที่ปนเปื้อนโครเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ซึ่งมีความเข้มข้น $6,845.5 \pm 50.2$, 73 ± 2.5 , 93 ± 1.5 และ 29 ± 2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทำการทดลองโดยการปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด ในตะกอนฟอกหนังและเก็บเกี่ยวหลังจากการเพาะปลูกเป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์และผักกาดเขียวปลีสามารถสะสมโครเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ได้แตกต่างกัน โดยผักกาดเขียวสามารถสะสมโครเมียมได้สูงที่สุด และรองลงมาได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ตามลำดับ ในขณะที่หญ้าเนเปียร์สามารถดูดดึงสังกะสีและสะสมโครเมียมได้สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการดูดดึงโครเมียมของหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หญ้าเนเปียร์เป็นหนึ่งในหญ้าเขตร้อนที่ให้ผลผลิตมวลชีวภาพอย่างรวดเร็วมากกว่าผักกาดเขียวปลี ซึ่งอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้หญ้าเนเปียร์สามารถสะสมโลหะหนักได้มากกว่าผักกาดเขียวปลี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์และผักกาดเขียวปลีมีศักยภาพในการใช้ประโยชน์เพื่อการฟื้นฟูหรือบำบัดตะกอนฟอกหนังที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้เช่นกัน

2.9.4 งานวิจัยด้านการศึกษการย่อยสลายของถ่านชีวภาพ

Liu et al. (2013) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการย่อยสลายของถ่านชีวภาพ และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยการใช้เทคนิคแบบจำลองการเกิดออกซิเดชันเพื่อตรวจสอบผลกระทบของการย่อยสลายต่อสมบัติของพื้นที่ผิวถ่านชีวภาพ และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของถ่านชีวภาพ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดทดลองศึกษการย่อยสลายแบบไม่รุนแรง โดยการบ่มด้วยน้ำกลั่นแบบมีอากาศที่ 30 องศาเซลเซียส และ 2) ชุดทดลองศึกษการย่อยสลายแบบรุนแรง โดยการบ่มด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ถ่านชีวภาพจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ถ่านชีวภาพแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นที่ผิวพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติการดูดซับ นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพื้นที่ผิวถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านชีวภาพ และสภาวะออกซิเดชัน ซึ่งสมบัติของพื้นที่ผิวชีวภาพ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจแสดงนัยว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว อาจส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านทางเคมี และกายภาพของดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพแล้ว

2.9.5 งานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน

กัลย์สุดา ปิ่นพา (2557) ได้ทำการศึกษาผลของคีเลต และค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่มีดินปนเปื้อน และมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 และ 2) ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนและเติมสารคีเลตที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA 2) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม DTPA และ 3) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA และ DTPA แล้วทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ ส่วนการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับต่าง ๆ มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา โดยชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA และ DTPA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 112.73 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือหน้าพบแคดเมียม เท่ากับ 14.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 90 วัน และชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง

เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียม มากที่สุดในส่วนใต้น้ำเท่ากับ 62.55 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียม เท่ากับ 10.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 30 วัน และชุดการทดลองที่เติมสาร DTPA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำเท่ากับ 61.17 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียม เท่ากับ 10.20 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 30 วัน และได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียม โดยการวิเคราะห์ใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF/XRD) จากผลการทดลองพบว่า ไม่สามารถตรวจวัดการสะสมแคดเมียมได้ทั้งในส่วนใต้น้ำและส่วนเหนือน้ำได้ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวามีปริมาณความเข้มข้นต่ำเกินไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านเครื่องมือวิเคราะห์

คำหล้า นันทวงศ์ (2555) ได้ทำการศึกษาผลของสารเร่ง NTA และ EDTA ต่อการดูดซับและสะสมของสารหนูในราก ลำต้น และใบของต้นไมยราบ การศึกษาเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสารหนูที่มีต่อต้นไมยราบ โดยการเติมสารไดโซเดียมไฮโดรเจนอซิเนท ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนูแตกต่างกัน คือ 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และทดสอบ NTA และ EDTA ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ต้นไมยราบสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ในขณะที่ความเข้มข้นอื่น ๆ แสดงความเป็นพิษต่อพืช เช่น ใบและลำต้นแห้ง หรือหงิกงอ ส่วน NTA และ EDTA ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช สำหรับการทดลองหลัก ได้เติมสารหนูที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 เดือน หลังจากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบ 1 ต้นต่อกระถาง และเติมสารเร่ง NTA และ EDTA แยกกันที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ดังกล่าว จากนั้นเก็บตัวอย่างดินและพืชทุก ๆ 30 วัน เป็นระยะเวลา 120 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารหนู ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สารหนูที่สะสมอยู่ในรากมีความเข้มข้นสูงกว่าในลำต้นและใบ ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลา 120 วัน โดยพบว่า ในรากมีค่าเท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ส่วนในลำต้นและใบ มีค่าเท่ากับ 6.32 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของสารหนูที่สะสมในทุกส่วนของต้นไมยราบตลอดระยะเวลาของการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 2.71-36.03 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช อย่างไรก็ตามพบว่า มีการสะสมสารหนูมากที่สุดในชุดการทดลองที่มีการเติมสารเร่ง EDTA 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งในการเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลาและความเข้มข้นเดียวกันของสารเร่ง พบว่า EDTA มีความสามารถในการเร่งการดูดซับ

สารหนูเข้าสู่ต้นไมยราบได้ดีกว่า NTA นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Synchrotron μ -X-ray fluorescence spectroscopy (BL6b) พบว่า ไม่สามารถพบรูปแบบการกระจายของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของต้นไมยราบที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวได้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ และความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างน้อยเกินไป ซึ่งต้องมีการพัฒนาในขั้นตอนของรายละเอียดที่สอดคล้องกับการใช้เครื่องมือตรวจวัดต่อไป



บทที่ 3 วิธีการทดลอง

การดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่สารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ มีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 การทบทวนเอกสาร

ทำการศึกษาข้อมูล ทบทวนวรรณกรรม และรวบรวมเอกสารทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในด้านต่าง ๆ ได้แก่ งานวิจัยด้านการศึกษาปุ๋ยคอก งานวิจัยด้านการศึกษาถ่านชีวภาพ งานวิจัยด้านการศึกษาหญ้าเนเปียร์ งานวิจัยด้านการศึกษาการย่อยสลายของถ่านชีวภาพ งานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน และงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.2.1 การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติในโรงเรือนทดลอง ชั้น 2 สำหรับการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์จะทำในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ชั้น 3 ของอาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดังภาคผนวกรูปที่ ก1)

3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยนำตัวอย่างพืชและกากโลหกรรมของชุดการทดลองไปวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของโลหะหนัก พร้อมศึกษารูปฟอร์มทางเคมี (Chemical speciation) ของสารหนูและแมงกานีส ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (Synchrotron light research institute (Public organization)) ภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (ดังภาคผนวกรูปที่ ก1)

3.3 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงเรือนทดลอง

- 1) ท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) (ดังภาคผนวกรูปที่ ก2)

- 2) กระจกพลาสติกสีดำที่มีรูระบายน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และจานรองกระจก
- 3) ดินสำหรับปลูกพืชทดลอง
- 4) ฝักบัวรดน้ำ
- 5) น้ำประปา
- 6) พลั่วตักดิน
- 7) กรรไกรตัดกิ่งไม้
- 8) ปากกาทำเครื่องหมาย
- 9) เรือนเพาะชำ ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 3 เมตร
- 10) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.3.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหกรรม

- 1) ถุงพลาสติกมีซิปลสำหรับเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหกรรม
- 2) พลั่วตักดิน
- 3) น้ำประปา
- 4) ตะกร้าพลาสติก
- 5) กรรไกรตัดกิ่งไม้
- 6) ปากกาทำเครื่องหมาย และฉลากสำหรับติดตัวอย่าง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.3 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
 - (1) ปิเปต (Pipet)
 - (2) บีกเกอร์ (Beaker)
 - (3) กรวยกรอง (Funnel)
 - (4) แท่งแก้ว (Glass rod)
 - (5) กระจกทรงวง (Cylinder)
 - (6) กระจกนาฬิกา (Watch glass)
 - (7) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)

- 2) กระดาษฟรอยด์
- 3) พาราฟิล์ม (Parafilm)
- 4) โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
- 5) ขวดพลาสติกสำหรับใส่สารละลายสกัด ขนาด 60 มิลลิลิตร
- 6) กระดาษกรองเบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)

3.3.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender) รุ่น RT04A, Korea
- 2) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 3) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne
- 4) ตู้ดูดควันสารเคมี (Chemical flame hood) รุ่น Wiwatsan
- 5) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น Sension2, HACH
- 6) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC meter) รุ่น Sension2, HACH
- 7) เครื่องวัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter) รุ่น Sension2, HACH
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) พิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S, Sartorius สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักสารเคมี
- 9) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion)
- 10) เครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออปติคอลลิมิสชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES)) รุ่น PQ 9000 Elite
- 11) เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

3.3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) กรดไนตริก (65% NO_3)
- 2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)
- 4) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- 5) อะซีโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)

3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การดำเนินการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส 2) การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่สารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม 3) การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ และ 4) การศึกษาการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างพืช และศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม โดยใช้เทคนิคระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยมีรายละเอียดขั้นตอนของการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส

โดยการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก ตามวิธีการ USEPA method 1312 (USEPA, 1990) ด้วยการใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟูริกผสมกันในอัตราส่วน 60:40 (w/w) และทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2, 4 และ 6 ด้วยน้ำกลั่น โดยแยกชุดการทดสอบจากนั้นซึ่งกากโลหกรรม 2 กรัม ที่อบและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ใส่ในสารชะละลาย 40 มิลลิลิตร ทั้ง 3 ชุดการทดลอง และนำเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนในอัตรา 30 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการทดสอบ 18 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 และนำส่วนของสารละลายมาวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออฟติคอล อิมิตชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; ICP-OES)

3.4.2 การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัว และถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่สารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม

1) การเตรียมภาชนะสำหรับปลูกพืชทดลอง

โดยใช้ถุงพลาสติกสีดำที่มีรูระบายน้ำ และจานรองกระถาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร จำนวน 132 ใบ

2) การเตรียมพืชทดลอง

พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ได้จากการขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำ โดยนำท่อนโดยใช้ท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ อำเภอบางบาล จังหวัดนครราชสีมา มีวิธีการเตรียมพืชทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1) การคัดเลือกท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระที่มีขนาด และน้ำหนักใกล้เคียงกัน มาทำการปักชำในดิน จากนั้นดูแลรักษาและให้น้ำทุกวัน เป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน ในโรงเรือน ทดลอง

2.2) การสุ่มตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระที่ได้จากการปักชำ จำนวน 3 ต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสก่อนนำไปทำการทดลอง ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3052 (USEPA, 1996) โดยการย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และหาปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออปติคอลลีมิสชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry; ICP-OES)

2.3) การคัดเลือกต้นหญ้าเนเปียร์แคระที่มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักใกล้เคียงกันจำนวน 132 ต้น นำมาล้างให้สะอาดก่อนย้ายลงปลูกในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้

3) การเตรียมถ่านชีวภาพ

การเตรียมถ่านชีวภาพ โดยได้รับความอนุเคราะห์มาจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี มีขั้นตอนในการทำถ่านชีวภาพ คือ ใช้ลำต้นของไม้กระถิน (*Leucocephala glauca* Benth.) ตัดแบ่งเป็นท่อน ๆ ให้มีขนาดเท่ากัน จากนั้นนำไปเผาโดยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิปกติ แล้วจึงนำถ่านชีวภาพนั้นมาบดให้มีขนาด 0.5-1 มิลลิเมตร และก่อนนำถ่านชีวภาพไปใช้ในการทดลอง ได้นำมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; CEC) พื้นที่ผิว (BET surface area) ขนาดรูพรุน (Pore size) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon; TOC) ปริมาณสารหนูและแมงกานีส และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ด้วย Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR)

4) การเตรียมปุ๋ยคอก

เตรียมปุ๋ยคอกมูลวัว นำมาจากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอลำลูกกา จังหวัดเพชรบุรี โดยนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาบดให้มีขนาดไม่เกิน 0.5-1 มิลลิเมตร และนำไปวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity; CEC) ปริมาณ

อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีส

5) การเตรียมกากโลหกรรม

กากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีส นำมาจากพื้นที่ศักยภาพของการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยทำการเก็บกากโลหกรรมที่มีการปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีสมาทำการศึกษาในโรงเรือนทดลอง และก่อนทำการทดลองได้นำตัวอย่างกากโลหกรรมมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) เนื้อดิน (Soil texture) ขนาดอนุภาคดิน (Particle size) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ธาตุอาหารพืช (Nutrient content) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และปริมาณสารหนูและแมงกานีส จากนั้นเตรียมกากโลหกรรมใส่ในภาชนะทดลองปริมาณ 5 กิโลกรัมต่อภาชนะ

6) การเตรียมชุดทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ได้มีการเตรียมชุดการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลองดังต่อไปนี้

6.1) ชุดควบคุม คือ ชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ในกากโลหกรรม และไม่มี การเติมถ่านชีวภาพและปุ๋ยคอกมูลวัว จำนวน 12 ภาชนะ

6.2) ชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพจากไม้กระถิน โดยทำการปลูกพืชจำนวน 1 ต้นต่อภาชนะ และเติมถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (%w/w) แยกชุดการทดลอง โดยในแต่ละอัตราของถ่านชีวภาพที่เติมลงไป มีจำนวน 12 ภาชนะ รวมทั้งหมดจำนวน 36 ภาชนะ

6.3) ชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกมูลวัว โดยทำการปลูกพืชจำนวน 1 ต้นต่อภาชนะ และเติมปุ๋ยคอก ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (%w/w) แยกชุดการทดลอง โดยในแต่ละอัตราของปุ๋ยคอกที่เติมลงไปจะมีจำนวน 12 ภาชนะ รวมทั้งหมดจำนวน 36 ภาชนะ

6.4) ชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถิน ในอัตราส่วน 1:1 โดยทำการปลูกหญ้าเนเปียร์จำนวน 1 ต้นต่อภาชนะ และเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ ในอัตราส่วน 0.5:0.5, 1.5:1.5 และ 2.5:2.5 เปอร์เซ็นต์ (%w/w) แยกชุดการทดลอง โดยในแต่ละอัตราของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่เติมลงไปจะมีจำนวน 12 ภาชนะ รวมทั้งหมดจำนวน 36 ภาชนะ

7) การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพ ดำเนินการด้วยการจดบันทึก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของพืชทดลอง เก็บตัวอย่างพืช ในวันที่ 30, 60, 90, 120 วัน ของการ

ทดลอง และนำมาหาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR) ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

7.1) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR) ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ สามารถหาได้จากสูตร (Hunt et al., 2002) ดังนี้

$$RGR = [\ln(W_2) - \ln(W_1)] / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ RGR = อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน)
 W_1 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง (กรัม)
 W_2 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง (กรัม)
 t_1 = เวลาเริ่มทดลอง (วัน)
 t_2 = เวลาหลังทดลอง (วัน)
 \ln = Natural logarithm

8) การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลอง (Phytotoxicity) การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบพืช เพื่อนำไปศึกษาความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยวิธีการสกัดด้วยสารละลายอะซีโตน (C_3H_6O) ประกอบกับการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 646.8 และ 663.2 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสด สามารถหาได้จากสูตร (Wellburn, 1994) ดังนี้

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ} = 12.25 A_{663.2} - 2.79 A_{646.8}$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ บี} = 12.25 A_{646.8} - 5.1 A_{663.2}$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ทั้งหมด} = \text{คลอโรฟิลล์ เอ} + \text{คลอโรฟิลล์ บี}$$

เมื่อ $A_{646.8}$ = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 646.8 นาโนเมตร

$A_{663.2}$ = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 663.2 นาโนเมตร

9) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม โดยตัวอย่างพืชทดลองทำการเก็บตัวอย่างหลังการปลูกที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling) และแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) และนำไปทำการวิเคราะห์ สำหรับกากโลหกรรม ได้ทำการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างพืช จากนั้นนำตัวอย่างพืชและกากโลหกรรมมาทำการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

9.1) การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างพืช

นำตัวอย่างพืชมาล้างด้วยน้ำประปา ก่อน 3-4 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 2-3 ชั่วโมง และแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ทำการชั่งน้ำหนักสดแบบแยกส่วน และนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ และทำการชั่งน้ำหนักแห้งแบบแยกส่วนแล้วทำการบดแบบแยกส่วน (ส่วนเหนือกากโลหกรรม และส่วนใต้กากโลหกรรม) ให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูและแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรมและส่วนใต้กากโลหกรรมของตัวอย่างพืช ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ด้วยการย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และหาปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES)

9.2) การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างกากโลหกรรม

นำตัวอย่างกากโลหกรรม แบ่งเป็น 2 ส่วน กากโลหกรรมส่วนแรก นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electro conductivity) และศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) โดยใช้ pH-meter, EC meter และ ORP meter ตามลำดับ สำหรับส่วนที่สองนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบ ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างกากโลหกรรม ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3051A (USEPA, 2007) โดยการย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และหาปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES)

3.4.3 การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ

การศึกษาการย่อยสลาย มีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1) การเตรียมภาชนะสำหรับปลูกพืชทดลอง

โดยใช้ภาชนะพลาสติกสีดำที่มีรูระบายน้ำ และจานรองกระถาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร จำนวน 6 ใบ

2) การเตรียมชุดทดลอง

โดยชุดการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่

2.1) ชุดการทดลองที่ใส่ถ่านชีวภาพที่บรรจุในถุงตาข่ายปริมาณ 10 กรัมต่อถุง และทำการปลูกหญ้าเนเปียร์จำนวน 1 ต้นต่อภาชนะ จำนวน 3 ภาชนะ และมีการวางถุงใส่ถ่านชีวภาพภาชนะละ 4 ถุง และเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 120 วัน

2.2) ชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยคอกที่บรรจุในถุงตาข่ายปริมาณ 10 กรัมต่อถุง และทำการปลูกหญ้าเนเปียร์จำนวน 1 ต้นต่อภาชนะ จำนวน 3 ภาชนะ โดยมีการวางถุงใส่ปุ๋ยคอกภาชนะละ 4 ถุง และเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 วัน ถึง 120 วัน และนำไปทำการวิเคราะห์

3) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างถุงบรรจุปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพในวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน นำมาคัดแยกเฉพาะปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ และทำความสะอาดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ จากนั้นนำปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และนำมาคำนวณอัตราการย่อยสลายจากสูตร Exponential decay model พร้อมทั้งประเมินเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายจากสูตร (Olson, 1963) ดังต่อไปนี้

3.1) สูตรคำนวณอัตราการย่อยสลาย

$$\ln(X_t/X_0) = -kt$$

เมื่อ k = อัตราการย่อยสลาย

X_t = น้ำหนักแห้งที่เหลือจากการย่อยสลายในเวลา t

X_0 = น้ำหนักแห้งเริ่มต้นก่อนการย่อยสลาย

t = ช่วงเวลาที่ศึกษา

\ln = Natural logarithm

3.2) สูตรคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย

$$\text{เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (\%)} = (1 - e^{-kt}) \times 100$$

เมื่อ k = อัตราการย่อยสลาย

T = ช่วงเวลาที่ศึกษา

e = Euler's number มีค่าประมาณ 2.718

3.4.4 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ศึกษาการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในพืช และศึกษารูปฟอร์มทางเคมี (Chemical speciation) ของสารหนูและแมงกานีสในพืชและกากโลหะกรรม สำหรับการศึกษาศักยภาพ การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในพืช โดยนำตัวอย่างพืชที่มีการดูดซับและสะสมสารหนูและแมงกานีสสูงสุด ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลองไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยนำหญ้าเนเปียร์แคระมาล้างด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง แล้วนำตัวอย่างพืชสดมาตัดแบบขวาง (Cross-section) แบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก (root) ลำต้น (stem) และใบ (leave) จากนั้น ทำการรักษาตัวอย่างโดยการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง และเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง จนกว่าทำการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์นั้นใช้ลำแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Micro-X-ray fluorescence; Micro-XRF) ของระบบลำเลียงแสงที่ BL6b สำหรับการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมี (Chemical speciation) ของสารหนูและแมงกานีสในพืชและกากโลหะกรรม โดยนำพืชและกากโลหะกรรมของแต่ละชุดการทดลองที่ระยะเวลา 120 วัน มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส บดให้เป็นเนื้อเดียวกันและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการรักษาตัวอย่างโดยการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dry) แล้วทำการอัดเม็ดตัวอย่าง และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอสซอร์บชันสเปกโทรสโกปี (x-ray absorption spectroscopy; XAS) ของระบบลำเลียงแสงที่ 1.1W ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จัหวัดนครราชสีมา

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจากปริมาณการดูดตั้งและสะสมสารหนูและแมงกานีสที่ได้จากการทดลองปลูกหญ้าเนเปียร์ในภาคโลหกรรมที่ปนเปื้อน โดยใช้ ANOVA เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์การทดลอง

การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัว และถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่ สารหนู และแมงกานีสในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ โดยแบ่งชุด การทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ) 2) ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (CM1%, CM3% และ CM5%) 3) ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (BC1%, BC3% และ BC5%) และ 4) ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (MIX1%, MIX3% และ MIX5%) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 วัน และมีการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส

การทดสอบความสามารถในการชะละลาย (Potential leachability) ของสารหนูและแมงกานีส โดยใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟูริกผสมกันในอัตราส่วน 60:40 (w/w) และทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2, 4 และ 6 ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นชั่งกากโลหกรรม 2 กรัม ใส่สารชะละลาย 40 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนในอัตรา 30 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสด้วยเครื่อง ICP-OES ตามวิธีการของ USEPA method 1312 (USEPA, 1990) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1.1 สารหนู

จากการทดสอบการชะละลายของสารหนู พบว่า เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงสามารถทำให้ความเข้มข้นของสารหนูถูกชะออกมาจากกากโลหกรรมเพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้นของสารหนูเฉลี่ย เท่ากับ 2, 1.4 และ 1.3 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2, 4 และ 6 ทั้งนี้ เนื่องจากความสามารถในการชะละลายของโลหะหนัก (Solubility constant) มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง จึงทำให้โลหะหนักในกากโลหกรรมชะละลายออกมามากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonsrang et al. (2017) ที่ทำการศึกษาศักยภาพที่มีผลต่อการควบคุมการชะละลายโลหะหนักบริเวณเหมืองแร่ทองคำในประเทศไทย พบว่า กากโลหกรรมบริเวณเหมืองแร่ทองคำมีการปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด ได้แก่ เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล สังกะสี แมงกานีส

และสารหนู อีกทั้งยังพบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวสามารถชะละลายออกมาได้มากขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง

4.1.2 แมงกานีส

การทดสอบการชะละลายของแมงกานีส พบว่า ความเข้มข้นของแมงกานีสในน้ำชะกาก โลหกรรมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.9, 12.5 และ 8 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการชะละลายของสารหนู พบว่า แมงกานีสสามารถ ชะละลายออกมาได้มากกว่า ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นในกากโลหะกรรม ประกอบกับ แมงกานีสมีความสามารถในการชะละลายได้ง่ายกว่าธาตุอื่น ๆ (จุฬาลักษณ์ ชาญกุล, 2551)

เมื่อนำความเข้มข้นของสารหนู และแมงกานีสที่ถูกชะละลายออกมาเปรียบเทียบกับคุณภาพ น้ำผิวดิน พบว่า สารหนูและแมงกานีสมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยกำหนดให้สารหนูมีค่า ไม่เกิน 0.01 และแมงกานีส ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติ ฉบับที่ 8 พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 ของแหล่งน้ำ ประเภทที่ 2,3 และ 4 ดังนั้น หากกากโลหะกรรมอยู่ในสถานะที่ค่อนข้างเป็นกรด สารหนูและแมงกานีส สามารถถูกชะละลายออกมาได้ เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน จึงอาจ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่บริเวณโดยรอบพื้นที่ของการทำเหมืองแร่ทองคำได้

4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหะกรรม ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ

4.2.1 กากโลหะกรรม

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหะกรรม พบว่า กากโลหะกรรม ประกอบด้วยอนุภาคของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เฉลี่ยเท่ากับ 83.8, 15.2 และ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อดินโดยใช้ไดอะแกรมสามเหลี่ยมมาตรฐานเพื่อจำแนกประเภทเนื้อดินแล้ว พบว่า มีลักษณะเป็นดินทรายปนดินร่วน (Loam Sandy) มีปริมาณสารหนูปนเปื้อน เท่ากับ 68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณแมงกานีสปนเปื้อน เท่ากับ 958.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.68 มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.65 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร มีปริมาณสารอินทรีย์ เท่ากับ 1.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 0.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีธาตุ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.029, 35.1 และ 102 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งกากโลหะกรรมมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโต ของพืช เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์น้อยมากเมื่อเทียบกับดินที่มีความอุดมสมบูรณ์โดยทั่วไปที่

ควรมีสารอินทรีย์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 5 และมีความเป็นกรด-ต่างอยู่ในช่วง 5.5-6.5 และหากมีค่าความเป็นกรด-ต่างต่ำกว่า 4.50 มักมีอะลูมิเนียมทั้งในรูปอะลูมิเนียมแคทไอออน (Al^{+3}) และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($AlOH^{+2}$) มาก จนกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ (Brady et al., 2002)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และกากโลหกรรม

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วิเคราะห์ได้		
	กากโลหกรรม	ปุ๋ยคอก	ถ่านชีวภาพ
ความเป็นกรด-ต่าง	7.68	8.65	9.13
สภาพการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	1.65	2.02	0.68
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	271	186.43	269.53
การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	3	36.9	14.54
ปริมาณสารอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	1.58	28.8	16.84
ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.92	16.71	9.77
ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	0.03	1.2	0.8
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	35.1	0.4	0.13
โพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	102	1.34	0.97
สารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	68	-	-
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	958.33	0.29	-
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	-	-	90.51
ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	-	-	2.56
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	-	-	0.04

4.2.2 ปุ๋ยคอก

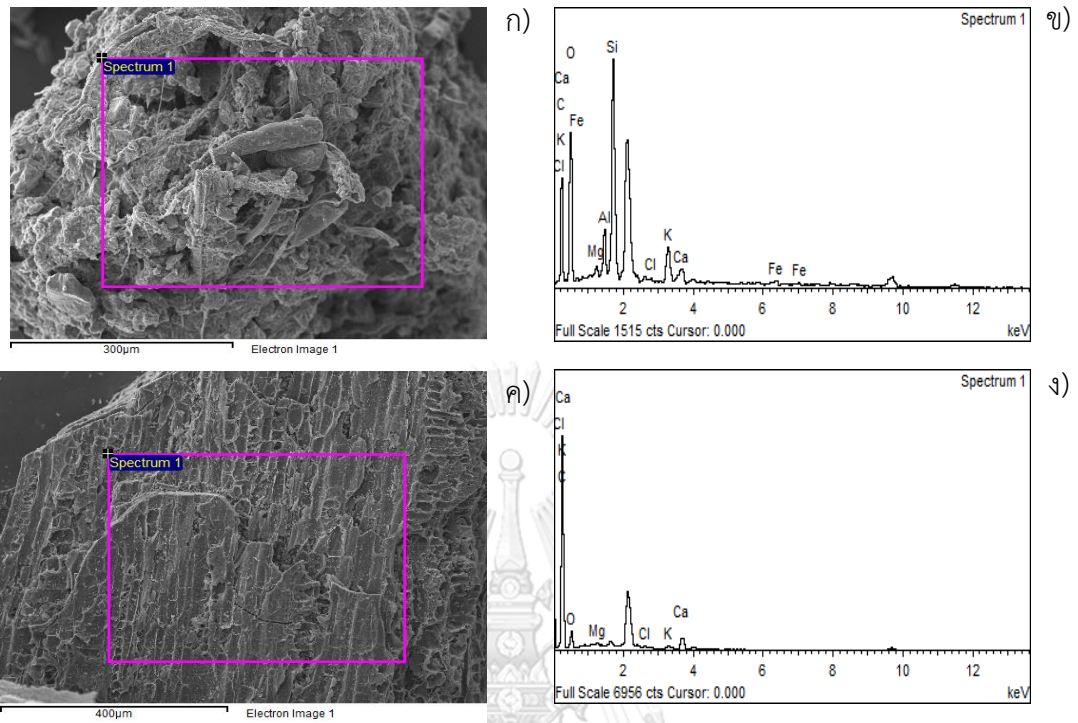
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยคอก พบว่า ปุ๋ยคอกมีค่าความเป็นกรด-ต่าง เท่ากับ 8.65 มีปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 28.8 และ 16.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เฉลี่ยเท่ากับ 36.9 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีค่าการนำไฟฟ้า เฉลี่ยเท่ากับ 2.02 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เฉลี่ยเท่ากับ 1.2, 0.4 และ 1.34 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าว มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของกากโลหกรรม แสดงให้เห็นว่า

การเติมปุ๋ยคอกอาจเป็นวิธีที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดี นอกจากนี้ ปุ๋ยคอกยังมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมากกว่ากากโลหกรรม ซึ่งอาจช่วยในการดูดจับและแลกเปลี่ยนกับธาตุที่มีประจุบวกได้ดี และมีสมบัติในการช่วยตรึงสารโลหะหนักให้อยู่บริเวณรากพืชได้ (Leburn et al., 2018) สำหรับลักษณะและโครงสร้างทางกายภาพของปุ๋ยคอกสามารถตรวจวัดได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy X-ray Spectroscopy; EDS) ดังรูปที่ 4.1 ก) เป็นการแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของปุ๋ยคอก ซึ่งพบว่า มีลักษณะพื้นที่ผิวขรุขระ นอกจากนี้ ในปุ๋ยคอกยังพบธาตุอะลูมิเนียม, ซิลิกอน และเหล็ก ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชมาก ดังรูปที่ 4.1 ข) เมื่อทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของปุ๋ยคอกด้วยเครื่องมือ Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) พบว่า หมู่ฟังก์ชันของปุ๋ยคอก ประกอบด้วย แอลคิล (Alkyl group), ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) , อะมิโน (Amino group) และแอลิแฟติก แอลกอฮอล์ (Aliphatic alcohol) ดังรูปที่ 4.2

4.2.3 ถ่านชีวภาพ

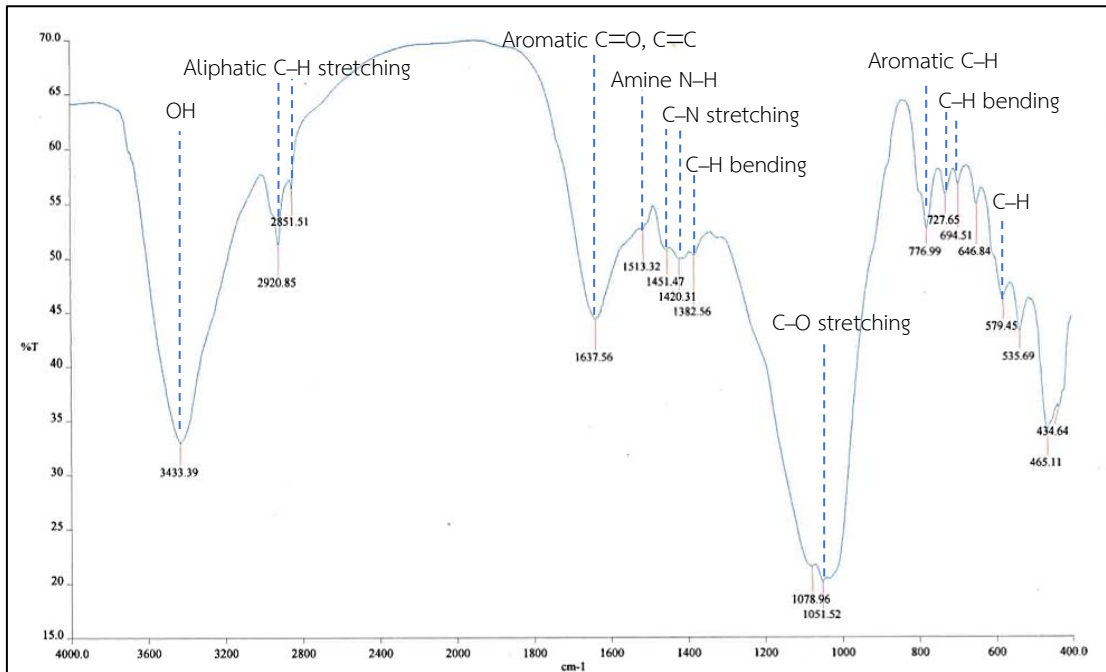
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 9.13 ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะเป็นตัวช่วยลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในกากโลหกรรมได้ หรือทำให้อยู่ในรูปฟอร์มที่สามารถตกตะกอนได้ เพราะความสามารถในการละลายของโลหะหนัก (Solubility constant) ส่วนใหญ่จะละลายออกมาได้มากในช่วงที่ค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างต่ำ (Jang et al., 2002; van der Sloot et al., 2012) สำหรับแมงกานีส พบว่า สามารถละลายออกมาได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5.5 ซึ่งสภาพการละลายได้ (Solubility) ของสารหนูและแมงกานีสจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุ อย่างไรก็ตามในขณะสภาพแวดล้อมมีสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ทำให้สารหนูและแมงกานีสเคลื่อนที่ได้น้อยหรือไม่เคลื่อนที่เลย ดังนั้น จึงทำให้การดูดซับของสารหนูและแมงกานีสโดยพืชลดลง (Lima et al., 2014) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 14.54 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 16.84 และ 9.77 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เฉลี่ยเท่ากับ 0.8, 0.13 และ 0.97 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ด้วยคุณสมบัติที่มีรูพรุน จึงทำให้ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติพิเศษว่า ปุ๋ยคอกและกากโลหกรรม เมื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดของพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพจากไม้กระถิน ด้วยวิธีการของ Brunauer-Emmett-teller (BET) multipoint method พบว่า ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 90.51 ตารางเมตรต่อกรัม

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน เท่ากับ 2.56 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 0.03574 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของปุ๋ยคอก พบว่า ค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าปุ๋ยคอกแต่มากกว่ากากโลหกรรม แสดงให้เห็นว่า การเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพนอกจากจะช่วยตรึงโลหะหนักไม่ให้เข้าสู่ลำต้น และใบพืชแล้ว ยังอาจช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าการปลูกพืชในกากโลหกรรม สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ถ่านชีวภาพมีลักษณะพื้นที่ผิวเรียบ และปรากฏลักษณะของรูพรุน ดังรูปที่ 4.1 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากมีลักษณะของรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มการสะสมของธาตุอาหาร และยังช่วยกักเก็บความชื้นในดิน และเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ และหากพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นไอออนลบบริเวณผิวสัมผัส จะส่งผลให้คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนของดินกับธาตุที่มีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น (Ahmad et al., 2014; Edenborn et al., 2015; Mohamed et al., 2017) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพจากไม้กระถินมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมาก และมีรูพรุนมาก จึงทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการช่วยดูดซับสารพิษได้ในปริมาณที่มากขึ้น (Fellet et al., 2014; Rodríguez-Vila et al., 2016) เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณธาตุต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (SEM-EDS) พบว่า ถ่านชีวภาพมีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน และออกซิเจนบนพื้นที่ผิวมากกว่าปุ๋ยคอก และพบธาตุแมกนีเซียม คลอไรด์ โพแทสเซียม และแคลเซียมในสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 4.1 ง) เมื่อทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของถ่านชีวภาพด้วยเครื่องมือ Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) ดังรูปที่ 4.3 พบว่า หมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพประกอบด้วย คาร์บอกซิลิก (Carboxylic), ฟีนอลิก (Phenolic), คาร์บอนิล (Carbonyl), อะโรมาติก (Aromatic), อะมิโน (Amino) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl) โดยที่อิเล็กตรอนอิสระที่อะตอมของไนโตรเจน และออกซิเจน จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโลหะหนักได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับโลหะหนัก (Park et al., 2011)

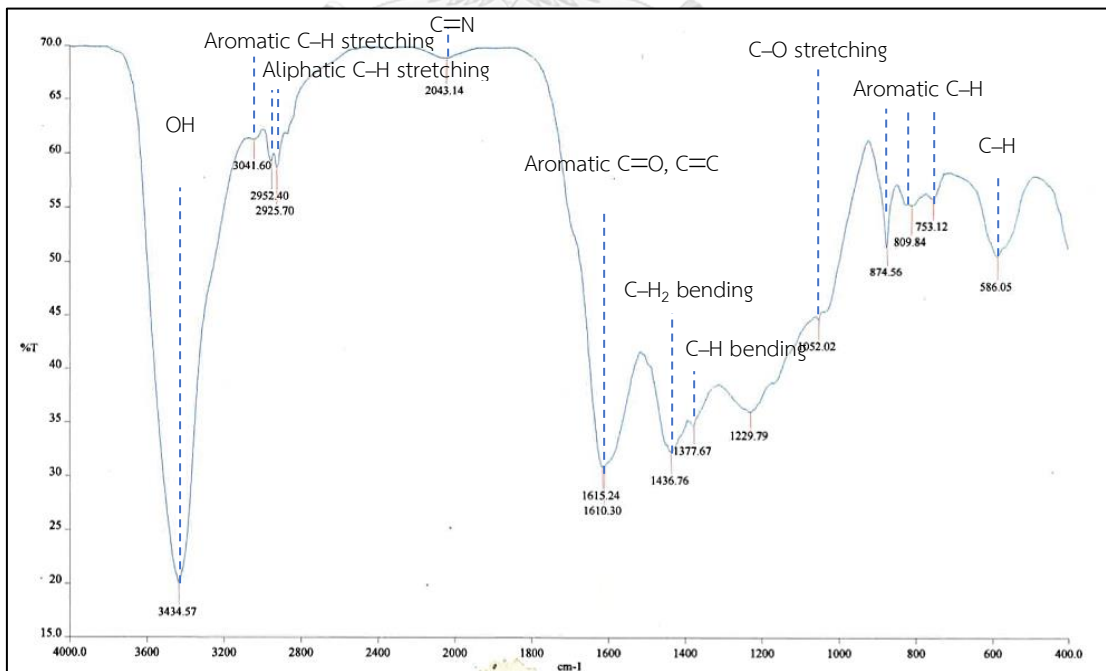


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นที่ผิวและธาตุต่าง ๆ ของปุยคอกและถ่านชีวภาพ

ก) ลักษณะพื้นที่ผิวของปุยคอก ข) ธาตุต่าง ๆ ที่พบในปุยคอก ค) ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ และ ง) ธาตุต่าง ๆ ที่พบในถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของปุ๋ยคอก



รูปที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพ

4.3 ผลของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพต่อสมบัติของกากโลหกรรม

4.3.1 ความเป็นกรด-ด่าง

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ของกากโลหกรรม ในการทดลองที่แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม 2) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก 3) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ 4) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมในวันเริ่มต้น (วันที่ 0) พบว่า ชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.68 ± 0.01 สำหรับชุดการทดลอง ที่ทำการเติมถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมเพิ่มขึ้น มากที่สุด โดยกากโลหกรรมที่เติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เฉลี่ย เท่ากับ 8.11 ± 0.02 รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เฉลี่ยเท่ากับ 7.98 ± 0.06 และชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพในอัตรา 3 และ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่าง เฉลี่ยเท่ากับ 7.87 ± 0.02 และ 7.85 ± 0.01 ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ และชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ โดยชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เฉลี่ยเท่ากับ 7.78 ± 0.03 รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เฉลี่ยเท่ากับ 7.82 ± 0.02 และ 7.82 ± 0.02 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Brendova et al. (2016) ที่ ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวในการช่วยลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม และ สังกะสี โดยใช้ต้นหลิว (*Salix babylonica* L.) โดยพบว่า ถ่านชีวภาพส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า ความเป็นกรด-ด่างในดินเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากขึ้นตามอัตราของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Ibrahim et al. (2016) พบว่า การใช้ถ่านชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มความเป็นกรด-ด่างของดิน รวมทั้ง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณมวลชีวภาพ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลาย น้ำ และธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การบำบัดพื้นที่ ปนเปื้อนด้วยพืชร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพนั้น พบว่า ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่าน ชีวภาพ และอัตราของการใส่ถ่านชีวภาพ สำหรับการเติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น พบว่า ค่า ความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงลดลง ยกเว้นชุดควบคุม ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อพืชมีการเจริญเติบโตขึ้น และมีการดูดดึงแร่ธาตุต่าง ๆ จากกากโลหกรรมมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ธาตุที่เป็นประจุบวกหรือ โปรตอน (H^+) ทำให้กากโลหกรรมในชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น หรือพืชมีการดูดดึงใน

เตรท (NO_3^-) เป็นส่วนใหญ่ และปล่อยไฮโดรเจนคาร์บอเนต (HCO_3^-) ออกมาทำให้สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น (Zhao et al., 2016) สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ดังรูปที่ 4.4 ก) เนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุในกากโลหกรรม และปุ๋ยคอกสามารถสลายตัวเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น กรดฮิวมิก (Humic acid) จึงมีผลทำให้กากโลหกรรมมีแนวโน้มเป็นกรดมากขึ้น และอาจเป็นสาเหตุในการลดพื้นที่ของการดูดซับ เพราะถูกแทนที่ด้วยโปรตอน (H^+) (Shan et al., 2016) สำหรับชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และชุดการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ (pH buffer capacity) สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ (Li et al., 2019) ดังรูปที่ 4.4 ข) และรูปที่ 4.4 ค)

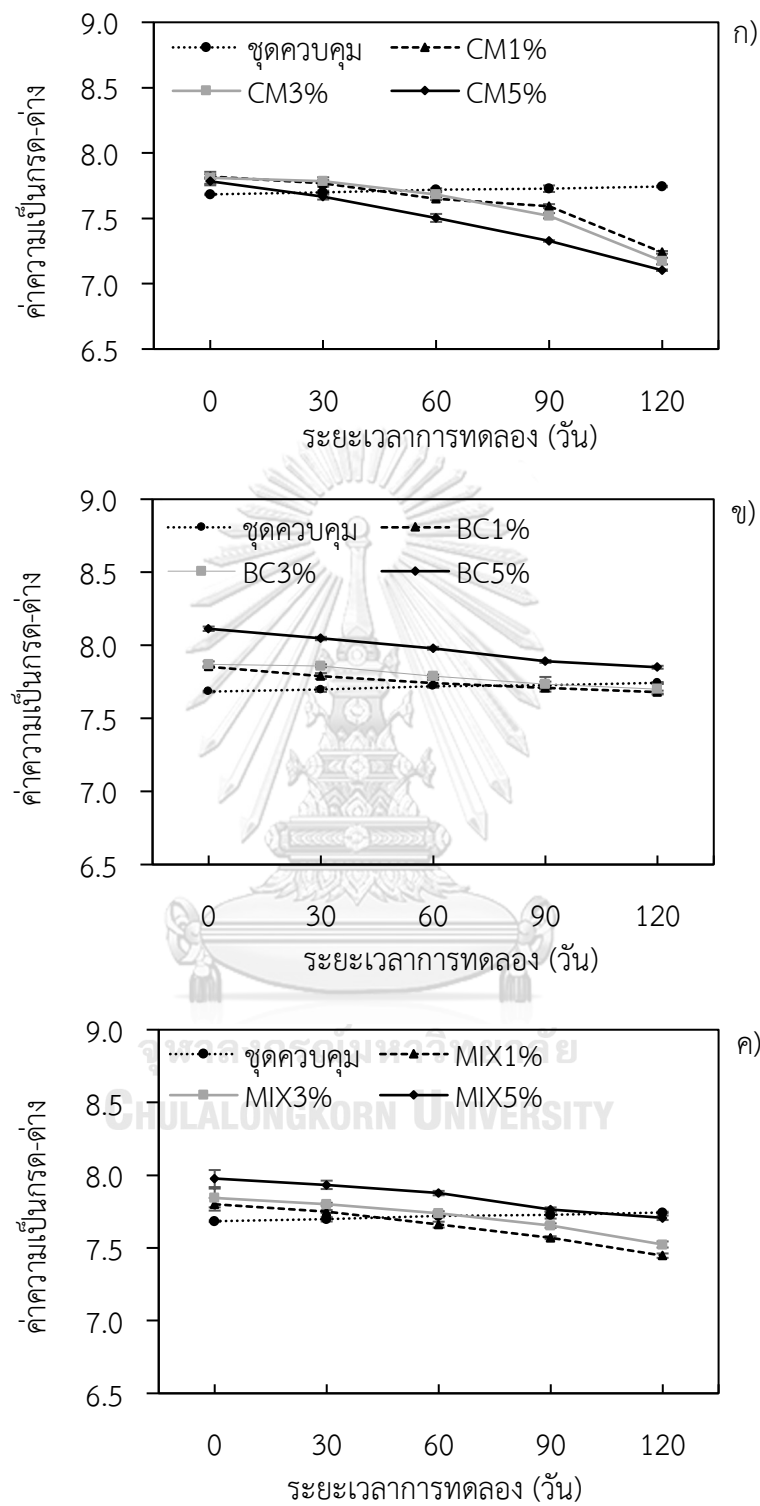
4.3.2 การนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ของกากโลหกรรมในชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยได้มีการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง และพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,651.16 \pm 34.93$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ $2,117.21 \pm 15.42$, $2,292.20 \pm 36.67$ และ $2,422.45 \pm 11.53$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,873.03 \pm 13.71$, $1,984.48 \pm 13.40$ และ $2,025.19 \pm 11.86$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ $1,965.73 \pm 11.60$, $2,102.79 \pm 17.78$ และ $2,233.29 \pm 16.13$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น (วันที่ 0) ของแต่ละชุดการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอกมีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ และชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพเป็นการเพิ่มปริมาณประจุในกากโลหกรรม เมื่อเริ่มต้นการทดลองและมีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Brendova et al. (2016) พบว่า ถ่านชีวภาพส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าในดินเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากขึ้นตามอัตราของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าของการนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่ลดลง เนื่องจากปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพมี

องค์ประกอบของแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งเป็นธาตุที่มีประจุ ที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ไนโตรเจน โพแทสเซียม และฟอสฟอรัส ที่จัดเป็นธาตุอาหารหลักของพืช จึงมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งไอออนดังกล่าวจะแปรผันตรงกับค่าการนำไฟฟ้า (Tananonchai and Sampanpanish, 2014)

4.3.3 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกาบไลทอกรม

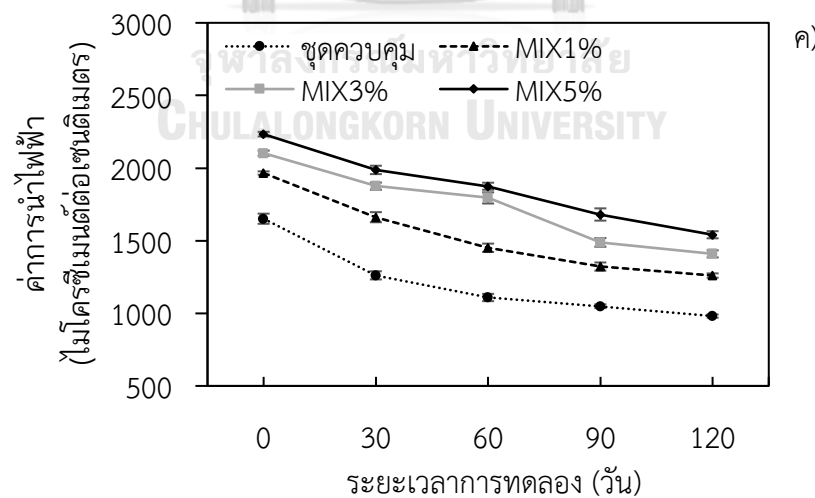
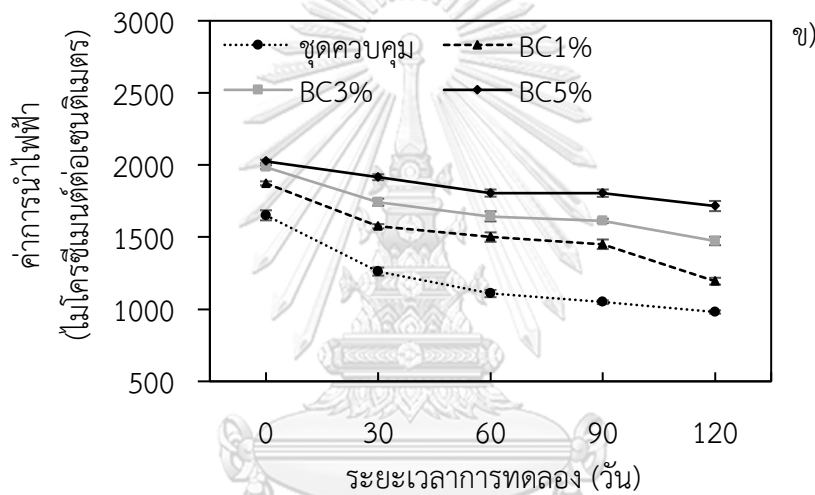
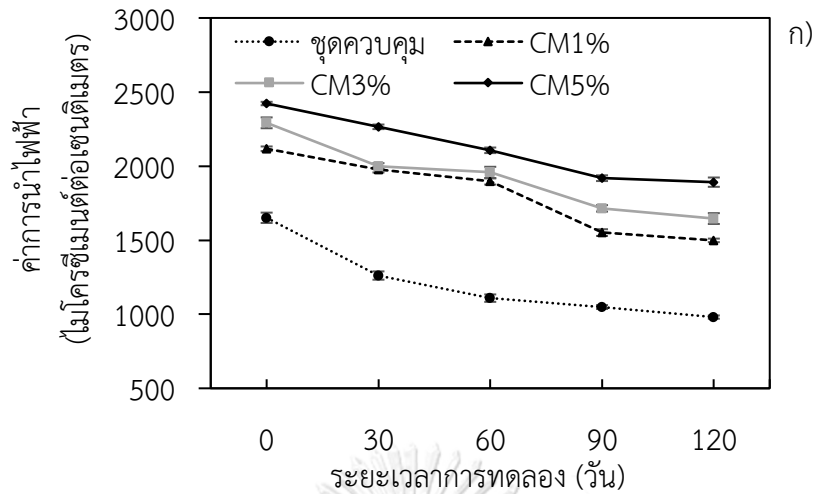
การวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกาบไลทอกรม (รูปที่ 4.6) พบว่า เมื่อระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 0) ชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 271.00 ± 5.57 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 286.27 ± 2.90 , 292.03 ± 1.86 และ 299.27 ± 6.93 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 278.97 ± 2.35 , 290.83 ± 5.66 และ 309.20 ± 2.21 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 276.60 ± 4.35 , 283.40 ± 3.29 และ 292.80 ± 2.20 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เมื่อเริ่มต้นการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าลดลง และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก สามารถทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตได้ดี เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ในเซลล์ โดยจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน มีความต้องการค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (Eh) ที่เป็นบวก แต่จะมีสภาพเป็นออกซิไดซ์ที่ลดลง จึงทำให้ค่า Eh ของกาบไลทอกรมลดลง นอกจากนี้ สารที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีผลทำให้ค่า Eh ลดลง (Thangavel et al., 2004)



รูปที่ 4.4 ความเป็นกรด-ด่างในกากโลหกรรม

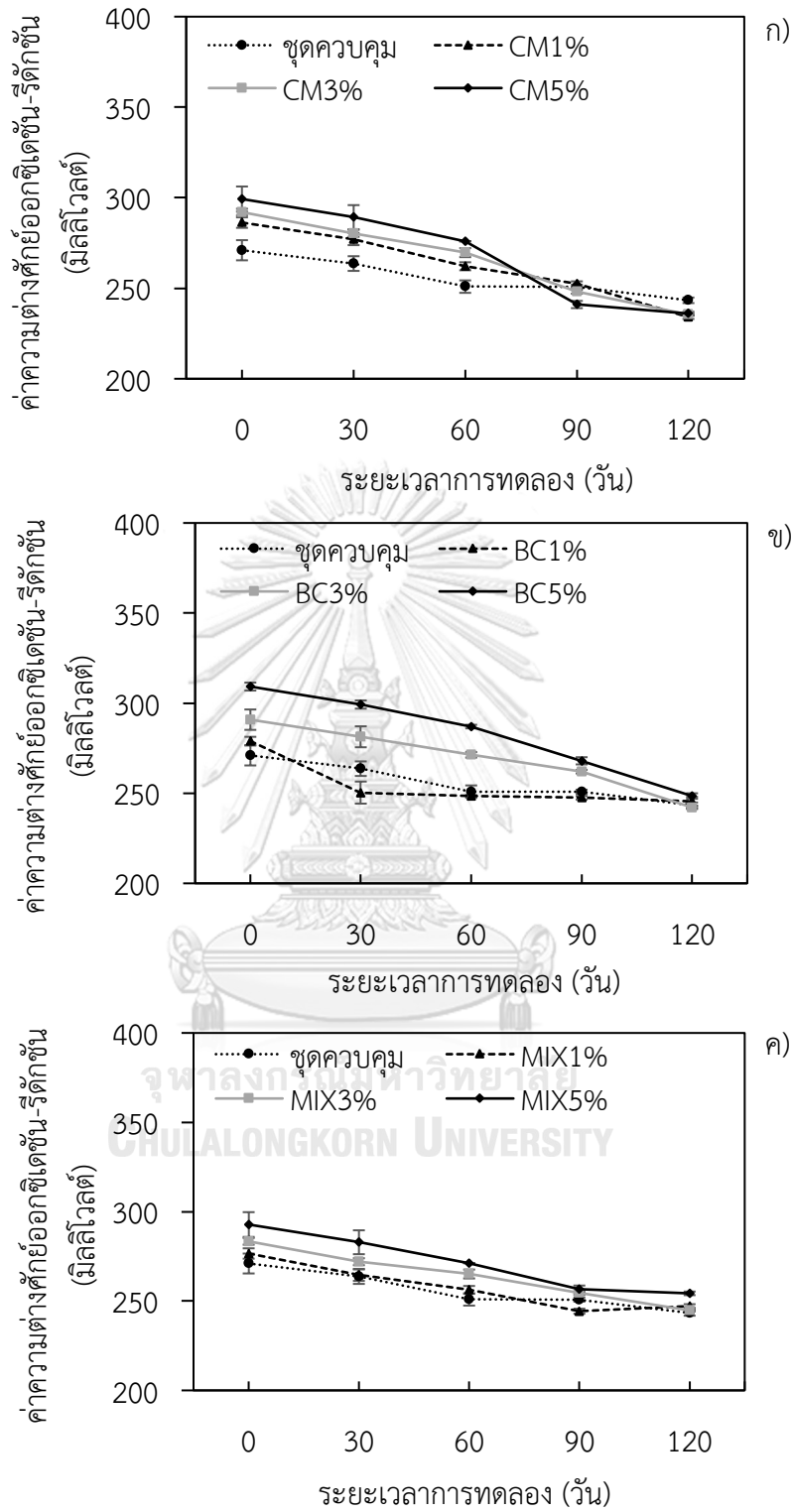
ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ

ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.5 การนำไฟฟ้าในกากโลหะกรรม

ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ
ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.6 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหกรรม

ก) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก ข) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ

ค) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ

4.4 การเจริญเติบโตและการแสดงความเป็นพิษของพืช

การศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม 2) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก 3) ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ และ 4) ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ได้ทำการบันทึกน้ำหนักแห้งที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วันของการทดลอง แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังรูปที่ 4.7 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.4.1 ปุ๋ยคอก

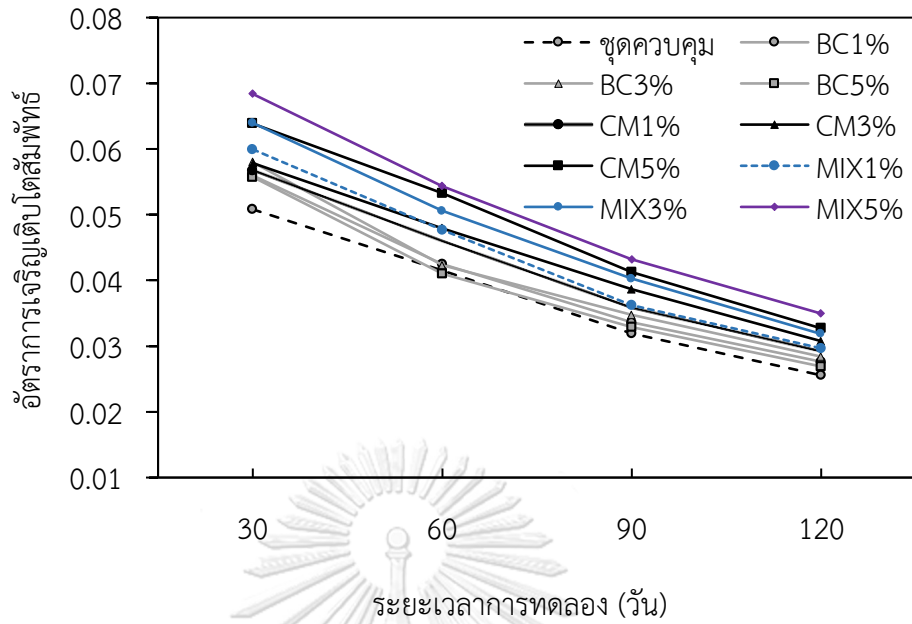
การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วัน มวลชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17 ± 0.39 กรัม ในชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีมวลชีวภาพทั้งต้นสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40.39 ± 2.05 กรัม รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 3 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.96 ± 1.69 กรัม และ 26.77 ± 3.23 กรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 เมื่อนำมาคำนวณค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ พบว่า ที่ระยะเวลา 30 วันของการทดลอง ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มากที่สุด รองลงมา คือ ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 3 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.068, 0.064 และ 0.060 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 แต่เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง หญ้าเนเปียร์แคระมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.035, 0.032 และ 0.030 ที่อัตราของการเติมปุ๋ยคอก 5, 3 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่า มวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้นนั้นสอดคล้องกับการเพิ่มอัตราของการเติมปุ๋ยคอก ทั้งนี้ เนื่องจากปุ๋ยคอกประกอบด้วยสารอินทรีย์ และธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช และเมื่อเกิดการย่อยสลายจะให้ฮิวมัส (Humus) ซึ่งมีประจุลบ และมีพื้นที่ผิวที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (COO^-) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง จึงส่งผลต่อคุณสมบัติของกากโลหกรรมในลักษณะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ดีขึ้น อีกทั้ง ทำให้มีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Cao et al., 2010; Kim et al., 2017) ในขณะที่หญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในชุดควบคุมมีมวลชีวภาพต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกชุดการทดลอง เนื่องจากกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลองนั้น มีสมบัติที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช หรือไม่มีความอุดมสมบูรณ์เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช

4.4.2 ถ่านชีวภาพ

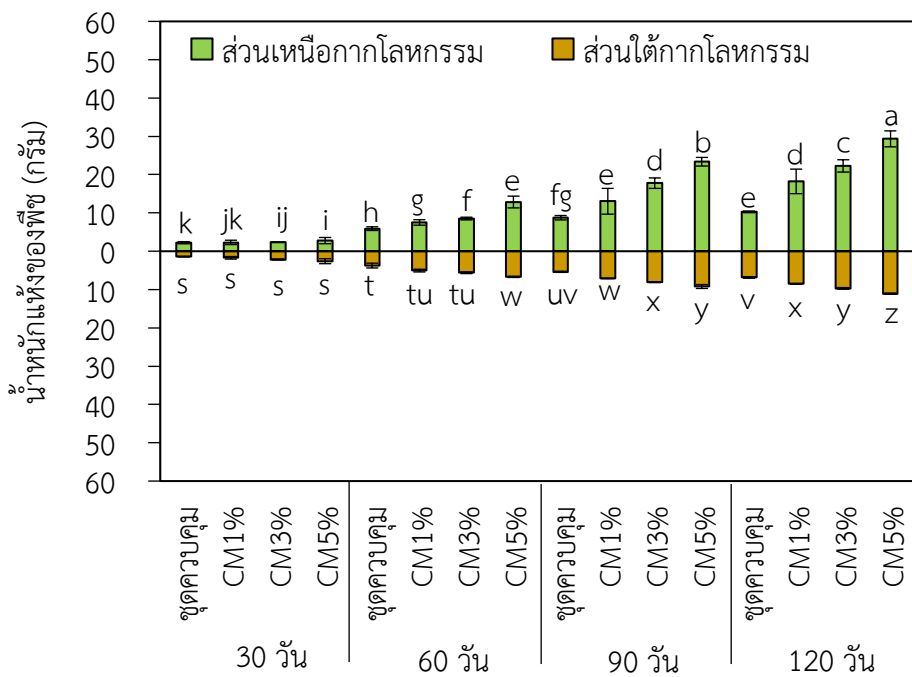
จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลา 120 วัน ของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มวลชีวภาพทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.12 ± 0.63 , 24.06 ± 0.40 และ 21.94 ± 0.41 กรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพให้มวลชีวภาพสูงที่สุดเมื่อเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 3 เปอร์เซ็นต์ และมีมวลชีวภาพลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของถ่านชีวภาพ โดยลดลงมากที่สุดเมื่อเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อเติมถ่านชีวภาพทำให้มวลชีวภาพลดลง อาจเนื่องมาจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช และธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอาจเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ยาก ส่งผลทำให้พืชมีลักษณะแคระเกร็น และมีมวลชีวภาพลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ He et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่ทำจากหญ้าเนเปียร์แคระเพื่อใช้ตรึงการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยการปลูกพืชกวาดตุ้ง (*Brassica parachinensis*) โดยพบว่า กวาดตุ้งมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zhang et al. (2013) พบว่า ถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินได้ หากแต่ไม่ได้ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ประกอบกับการศึกษาของ Prapagdee et al. (2014) พบว่า การเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้มากที่สุด ในขณะที่การเติมถ่านชีวภาพ 15 เปอร์เซ็นต์ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อพืช แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพมีผลต่อมวลชีวภาพของพืชซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของพืช ชนิดของถ่านชีวภาพ อัตราที่เติม และสมบัติของดิน (Leburn et al., 2018) นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพสามารถส่งผลทั้งในทางด้านบวกและด้านลบต่อผลผลิตของพืช (Borchard et al., 2014; Xu et al., 2016) และยังพบว่า ปุ๋ยหมัก หรือปุ๋ยอินทรีย์ ช่วยสนับสนุนและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าการถ่านชีวภาพ (Kamau et al., 2018; Schulz et al., 2013) สำหรับการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ ดังรูปที่ 4.7 พบว่า พืชทดลองมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยอัตราของถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีการลดลงของการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มากที่สุด ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง และมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.027

4.4.3 ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ

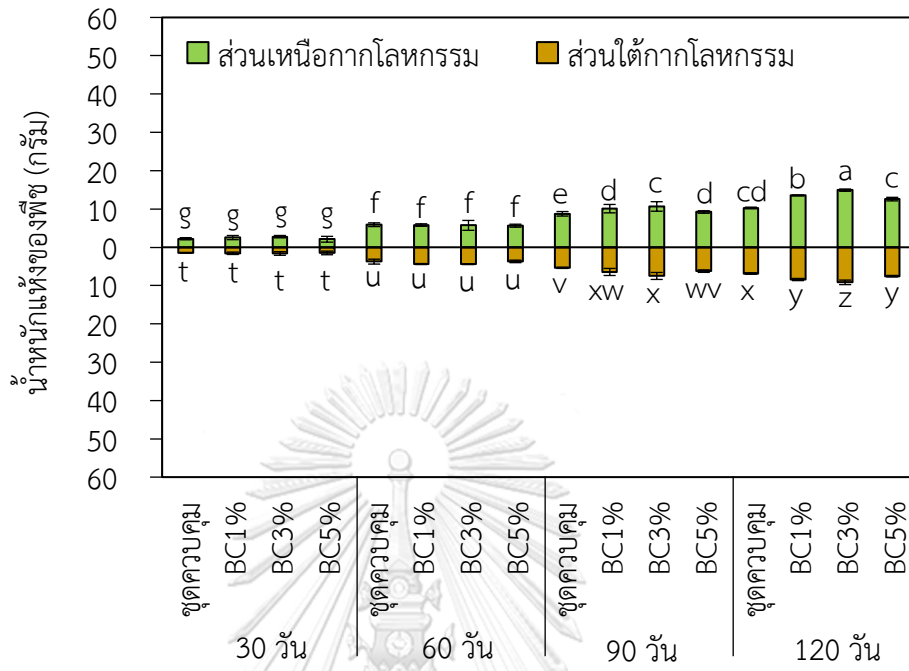
มวลชีวภาพของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ผลการศึกษพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีมวลชีวภาพทั้งต้นสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.86 ± 1.77 กรัม รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 3 และ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.39 ± 0.96 และ 28.02 ± 0.21 กรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 สำหรับการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น หญ้าเนเปียร์แคระมีการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลง โดยลดลงมากที่สุดที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง และในชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.030 รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.032 และ 0.035 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของทุกชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีมวลชีวภาพสูงที่สุด ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ มีธาตุอาหารต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้เมื่อปุ๋ยคอกเกิดการย่อยสลายจึงทำให้ถ่านชีวภาพซึ่งมีคุณสมบัติในการกักเก็บธาตุอาหาร สามารถกักเก็บธาตุอาหารต่าง ๆ ในกากโลหกรรมไว้ที่บริเวณรอบ ๆ รากพืชได้ เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจึงปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ออกมาให้พืชค่อย ๆ นำธาตุอาหารเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้ (Dias et al., 2010; Khorram et al., 2018) นอกจากนี้ การเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพยังสามารถช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในดิน (Soil organic matter; SOM) ช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของดิน และเพิ่มร่วนซุยของดิน ทำให้เกิดช่องว่างระบายอากาศ และมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี (Bonanomi et al., 2017; Naeem et al., 2018) จึงทำให้หญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลา 120 วัน ของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีมวลชีวภาพมากกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว



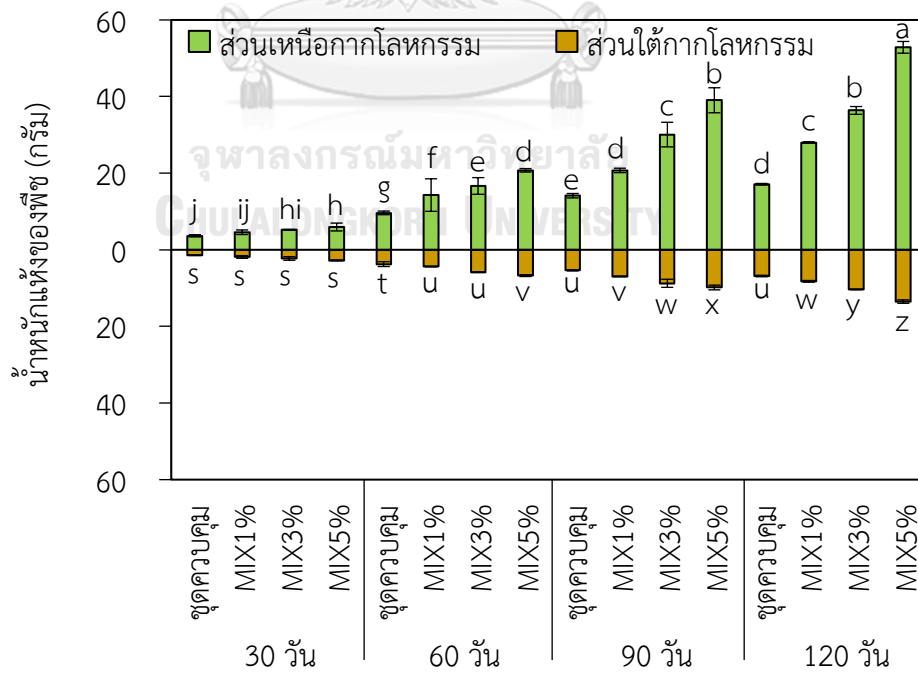
รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก

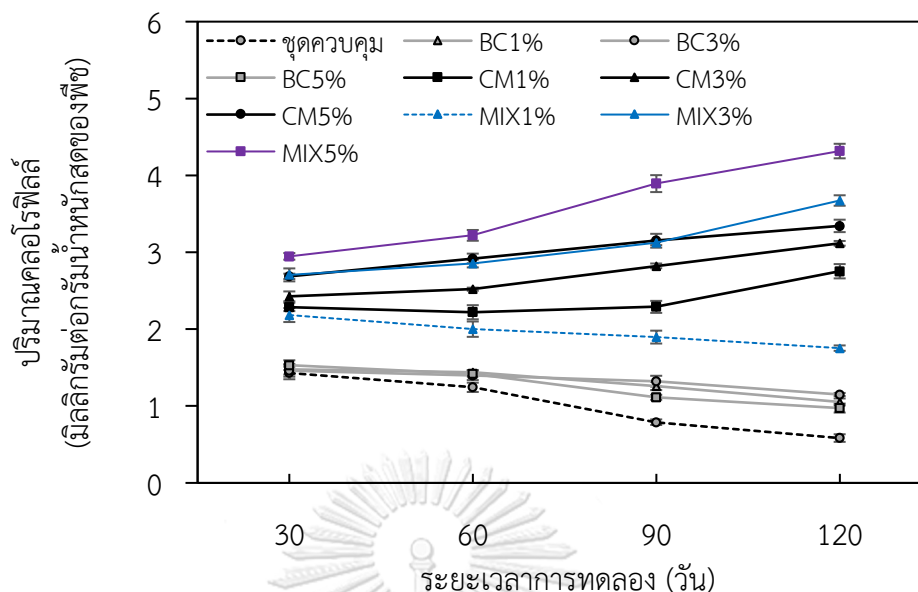


รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ

สำหรับการศึกษาผลของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์ แคระ (Phytotoxicity) สามารถบ่งชี้ได้จากการศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยพืช ที่แสดงความเป็นพิษจะทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชลดลง (Pavlovic et al., 2014) โดยคลอโรฟิลล์ จะสร้างรูปแบบที่ซับซ้อนกับไอออนของโลหะหนักบางชนิด ซึ่งเป็นสาเหตุการเปลี่ยนสีของใบพืช (Yilmaz et al., 2016) และความเครียดจากการสะสมโลหะหนักในพืช สามารถทำให้เกิดการลดลง ของปริมาณคลอโรฟิลล์ (Lui et al., 2015) ดังนั้น จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดควบคุมมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 120 วัน ของการทดลอง พบว่า มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เท่ากับ 0.58 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสดของพืช สำหรับการ ชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก และชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า ปริมาณ คลอโรฟิลล์ของหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 โดยเฉพาะการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับ ถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า มีปริมาณคลอโรฟิลล์มากที่สุด เท่ากับ 3.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสดของพืช รองลงมา คือ ชุดการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เฉลี่ยเท่ากับ 3.67 และ 3.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสดของพืช ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ พบว่า ปริมาณ คลอโรฟิลล์มีแนวโน้มลดลง โดยการเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 120 วัน มีปริมาณ คลอโรฟิลล์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.97 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักสดของพืช ดังนั้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ ลดลงนั้นอาจเนื่องมาจากปริมาณสารหนูที่สะสมในพืชมากขึ้น ซึ่งสารหนูไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็น สำหรับพืช หากแต่ถ้าในพืชมีความเข้มข้นของสารหนู 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก็แสดงความเป็นพิษ ต่อพืชอย่างเห็นได้ชัด (Sharma et al., 2009) พืชจะดูดดึงสารหนูจากดินที่ปนเปื้อนแล้วลำเลียง เคลื่อนย้ายเข้าสู่ส่วนพืชและสะสมในส่วนต่าง ๆ โดยจะไม่มีการย่อยสลายสารพิษ (Tangahu et al., 2011) อย่างไรก็ตาม สารหนูที่สะสมในพืชจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมตาบอลิซึม ส่งผลให้ มวลชีวภาพลดลง ราก และความยาวหน่อมีมวลลดลง รวมทั้งความสูงของลำต้น และอัตราการงอก ด้วย จึงส่งผลให้พืชตายในที่สุด สำหรับชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ อาจทำให้ธาตุอาหารที่จำเป็น ต่อพืชลดลง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีการดูดซับธาตุต่าง ๆ ไว้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่เติม ปุ๋ยคอก พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปุ๋ยคอกมีองค์ประกอบของธาตุ อาหารต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และเมื่อเกิดการย่อยสลายจะมีการปลดปล่อยธาตุอาหาร เหล่านั้นออกมา ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ กล่าวคือ เมื่อพืชมีการ แสดงความเป็นพิษทำให้พืชมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง จึงส่งผลทำให้การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืช ลดลงเช่นกัน



รูปที่ 4.11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของกล้วยาเนเปียร์แคระ

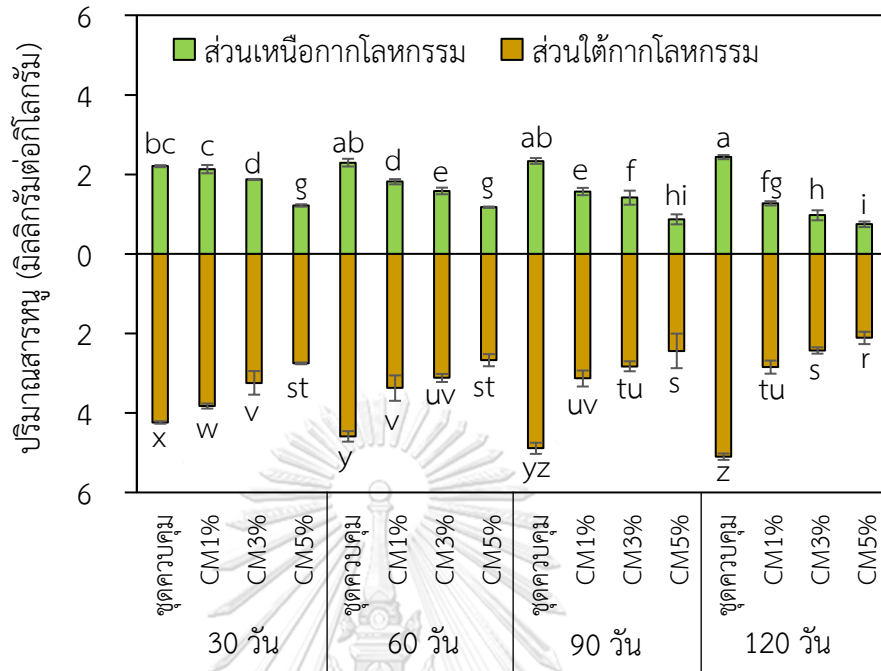
4.5 ผลของการตัดกิ่งและสะสมสารหนู และแมงกานีสในพืช

การศึกษาผลของการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณความเข้มข้นของการตัดกิ่งและสะสมสารหนู และแมงกานีสในกล้วยาเนเปียร์แคระ โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างที่ 30, 60, 90 และ 120 วันของการทดลอง ซึ่งผลของการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ ต่อปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของพืช พบว่า ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในพืชทุกชุดของการทดลอง มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

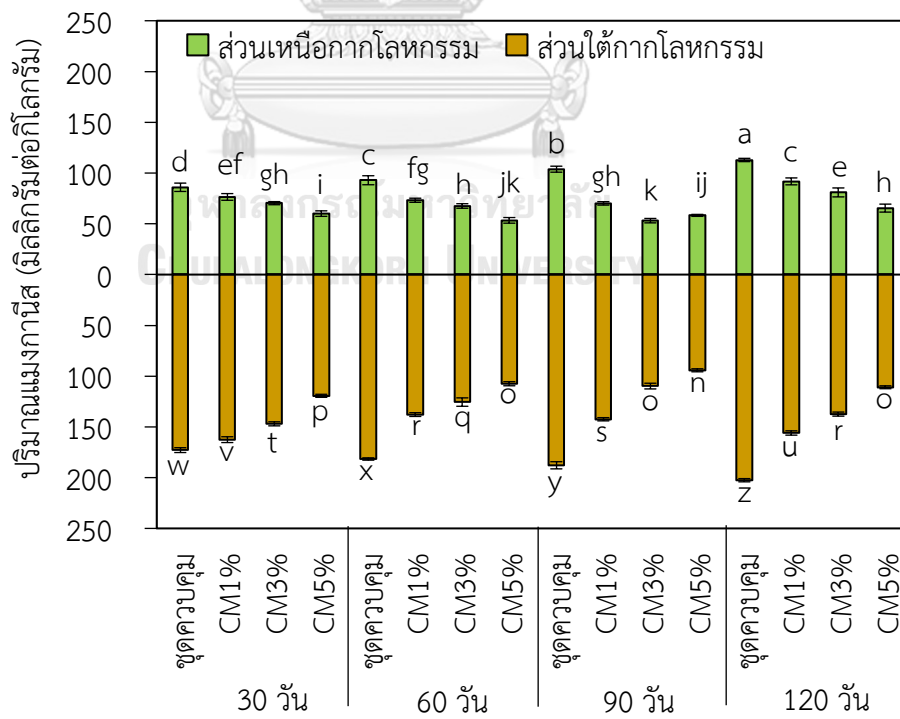
4.5.1 ปุ๋ยคอก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กาบโลหกรรม (ราก) ของกล้วยาเนเปียร์แคระในการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง มีการตัดกิ่งและสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรมได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.74 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 2.11 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 0.97 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 2.43 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก 1 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 1.27 ± 0.05 และ 2.85 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับ

การสะสมแมงกานีสที่ระยะเวลา 60 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในพืชส่วนเหนือภาคโลหกรรม และส่วนใต้ภาคโลหกรรมได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 53.42 ± 2.77 และ 107.50 ± 2.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกที่อัตรา 3 เปอร์เซ็นต์ มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสได้ต่ำที่สุดที่ระยะเวลา 90 วัน เท่ากับ 53.10 ± 2.20 และ 109.82 ± 2.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีแนวโน้มของการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปุ๋ยคอกสามารถช่วยตรึงสารหนูและแมงกานีสได้ หรือสามารถอธิบายได้ว่า สารอินทรีย์ที่มีประจุลบ มีอยู่เป็นจำนวนมากทำให้ความสามารถในการดูดยึดของประจุบวกสูงกว่าคอลลอยด์อื่น ๆ ประมาณ 2-30 เท่า (Noroozisharaf and Kaviani., 2018) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปุ๋ยคอกที่ใส่ลงไปสามารถจับกับโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดี ซึ่งความสามารถในการดูดซับมาจากประจุลบที่ส่วนใหญ่เกิดจากการแตกตัว (Dissociation) ของสารประกอบบางกลุ่มโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มคาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) และฟีนอลิก (Phenolic group) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะที่ค่อนข้างเป็นกรดสามารถทำให้สารโลหะหนักมีความเสถียรน้อยลง และสามารถละลายออกมาแล้วพืชสามารถดูดดึงนำไปใช้ได้มากขึ้น ถึงแม้จะมีปริมาณสารอินทรีย์มาก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Elouear et al. (2016) ที่ทำการศึกษผลของการใช้ปุ๋ยคอกจากมูลแกะ และปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว 970 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสี 9,641 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแคดเมียม 53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยใช้หญ้าอัลฟัลฟา (*Medicago sativa* L.) ผลการทดลองพบว่า หญ้าอัลฟัลฟาสามารถทนทานต่อระดับความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีได้ในปริมาณที่สูง และไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของชุดทดลองที่เติมและไม่เติมปุ๋ย นอกจากนี้ยังพบว่า ปุ๋ยคอกจากมูลแกะสามารถช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า และลดระดับความเข้มข้นของโลหะหนักที่สกัดด้วย DTPA-Extractable ในดินได้ ในขณะที่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์สามารถช่วยเพิ่มการสะสมโลหะหนักดังกล่าวในพืช และสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินได้ ตลอดจนสามารถใช้ฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืชได้ ในขณะที่ปุ๋ยคอกจากมูลแกะสามารถใช้ประโยชน์เพื่อการตรึงโลหะหนักไว้ที่บริเวณรากพืชได้ด้วย จากผลการทดลองในครั้งนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลาของการทดลอง 120 วัน หญ้าเนเปียร์แคะมีการสะสมสารหนู และแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปุ๋ยคอกมีการสลายตัวเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง และเกิดการปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ออกมาอยู่ในรูปฟอร์มที่ง่ายต่อการนำไปใช้ของพืช (Available form) หรือปริมาณของปุ๋ยคอกไม่เพียงพอต่อการตรึงด้วยพืช จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พืชมีการดูดดึงและสะสมสารหนู และแมงกานีสเพิ่มมากขึ้น (Igalavithana et al., 2017)



รูปที่ 4.12 ผลของปุ๋ยคอกต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ

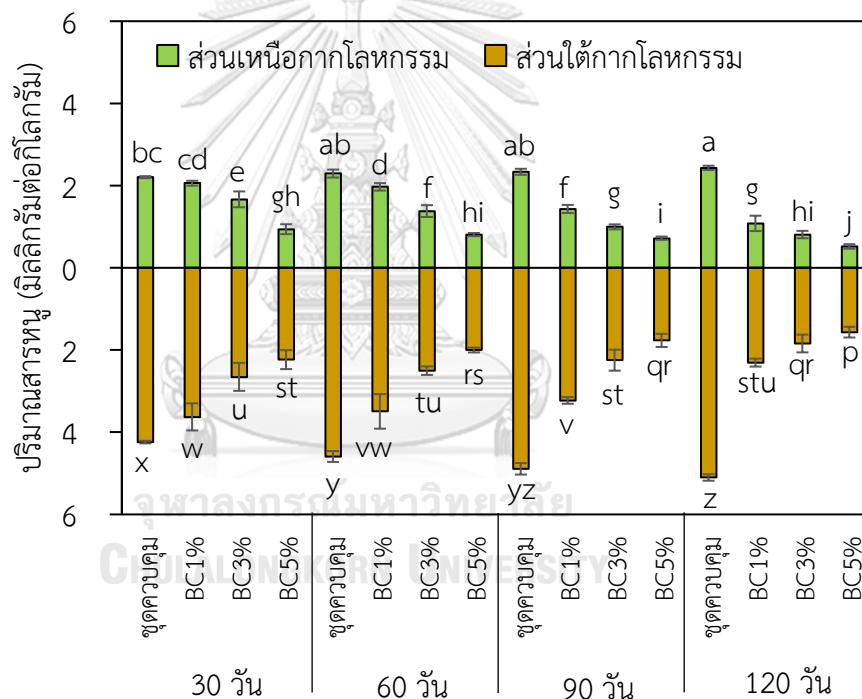


รูปที่ 4.13 ผลของปุ๋ยคอกต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ

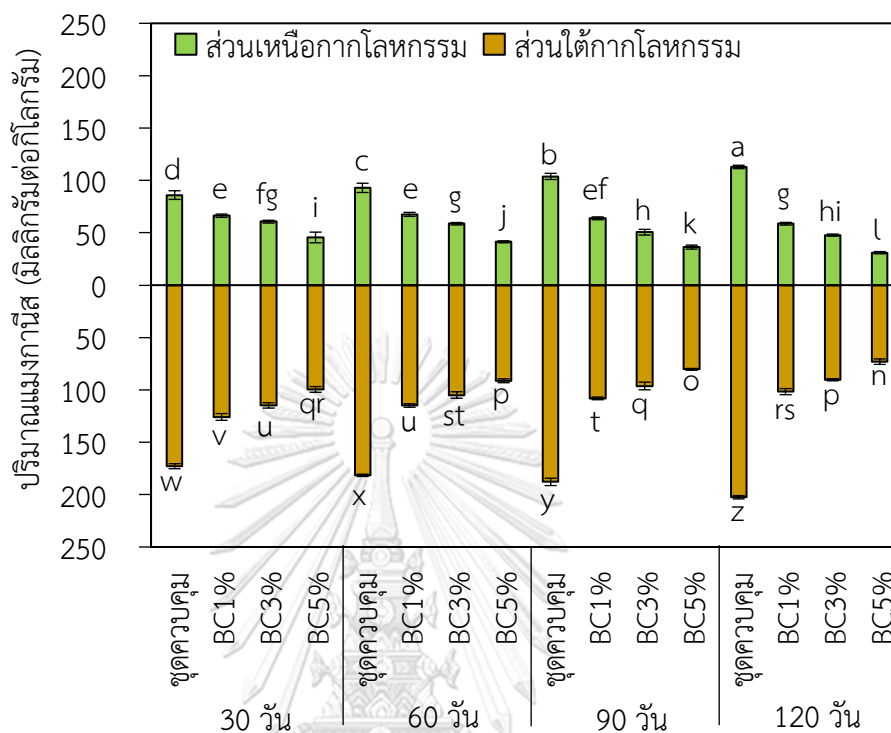
4.5.2 ถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กาบโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่มีการเติมถ่านชีวภาพ พบว่า เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดตั้งและสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรมลดลง โดยพบว่า ที่ระยะเวลาการทดลอง 120 วัน ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรมได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.52 ± 0.05 และ 1.57 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 0.81 ± 0.09 และ 1.84 ± 0.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 1.08 ± 0.19 และ 2.31 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการดูดตั้งและสะสมแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดตั้งและสะสมแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรมได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 31 ± 1.08 และ 73.05 ± 2.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่มีการเติมถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีการดูดตั้งและสะสมแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 47.83 ± 0.97 และ 90.33 ± 1.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีการดูดตั้งและสะสมแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกาบโลหกรรม และส่วนใต้กาบโลหกรรม เท่ากับ 58.67 ± 1.28 และ 101.67 ± 2.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดการดูดตั้งและสะสมสารหนู และแมงกานีสในกาบโลหกรรมได้ ในขณะที่หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดตั้งและสะสมสารหนู และแมงกานีสได้มากที่สุดในพื้นที่ปลูกในพืชส่วนใต้กาบโลหกรรม (ราก) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Park et al. (2011) พบว่า ถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดการดูดตั้งและสะสมของแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ในผักกาดเขียวปลี จากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมได้ และมีการสะสมมากที่สุดในส่วนราก นอกจากนี้การศึกษาของ (Souza et al., 2019) พบว่า การดูดตั้งและการสะสมของโลหะหนักมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราของถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวของคาร์บอนมาก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก และมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง จึงทำให้ถ่านชีวภาพสามารถช่วยดูดซับสารโลหะหนักไว้ที่บริเวณพื้นผิว

ได้ นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้โลหะหนักเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้ น้อยลงหรือละลายน้ำได้น้อยลง จึงทำให้ยากต่อการที่พืชจะดูดดึงแร่ธาตุต่าง ๆ รวมทั้งโลหะหนักด้วย นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) ฟีนอลิก (Phenolic group) คาร์บอนิล (Carbonyl group) อะโรมาติก (Aromatic group) อะมิโน (Amino group) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) โดยที่อิเล็กตรอนอิสระที่อะตอมของไนโตรเจน และออกซิเจนจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโลหะหนักได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับโลหะหนัก อีกทั้งช่วยลด การเคลื่อนที่หรือการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้ (Hossain et al., 2014; Kiran et al., 2017)



รูปที่ 4.14 ผลของถ่านชีวภาพต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ

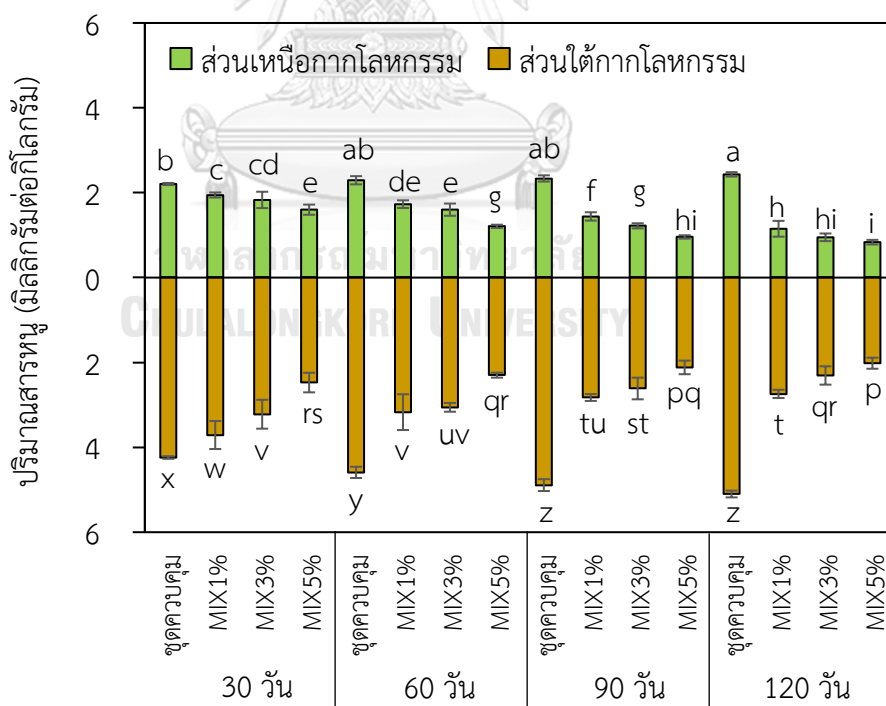


รูปที่ 4.15 ผลของถ่านชีวภาพต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ

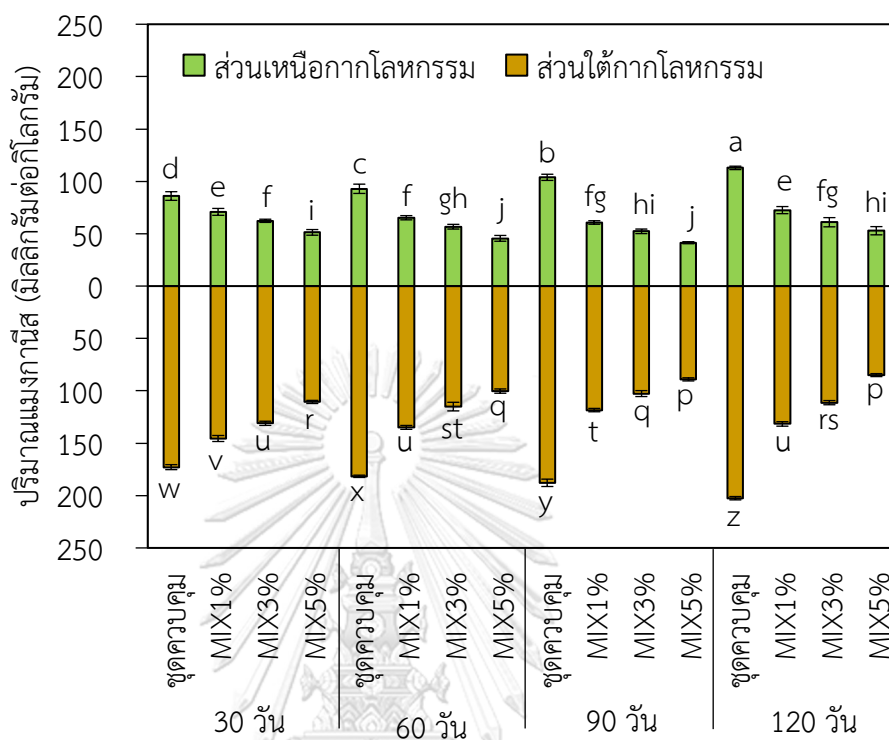
4.5.3 ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพที่อัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับและสะสมสารหนูมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ ดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนูต่ำที่สุดในส่วนเหนืออากาศโลหกรรม และส่วนใต้อากาศโลหกรรม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.83 ± 0.06 และ 2.02 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณการสะสมสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนเหนืออากาศโลหกรรม และมีการสะสมสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 2.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนใต้อากาศโลหกรรม สำหรับการดูดซับและสะสมแมงกานีส พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณการสะสมแมงกานีสต่ำที่สุดในส่วนเหนืออากาศโลหกรรม และส่วนใต้กา

โลหะกรรม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.42 ± 2.69 และ 85.00 ± 2.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ รองลงมา คือ ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.97 ± 1.42 และ 111.30 ± 3.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณการสะสมแมงกานีสมากที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.42 ± 2.69 และ 85.00 ± 2.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนูและแมงกานีสของหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราของ ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพมากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ชุดควบคุมมีปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.17 ทั้งนี้ เนื่องจากหญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดซับและสะสมธาตุต่าง ๆ จากกากโลหะกรรม โดยที่ธาตุเหล่านั้น อยู่ในรูปที่พร้อมนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Bioavailable) และไม่มีการยึดเกาะกับตัวกลางใด ๆ หรือ บางส่วนอาจยึดติดอยู่กับอนุภาคของดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รวมไปถึงคุณสมบัติของกากโลหะกรรมที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนบวกต่ำ จึงทำให้พืชมีการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง (Khorram et al., 2018; Sun et al., 2016)



รูปที่ 4.16 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อการสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ 4.17 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

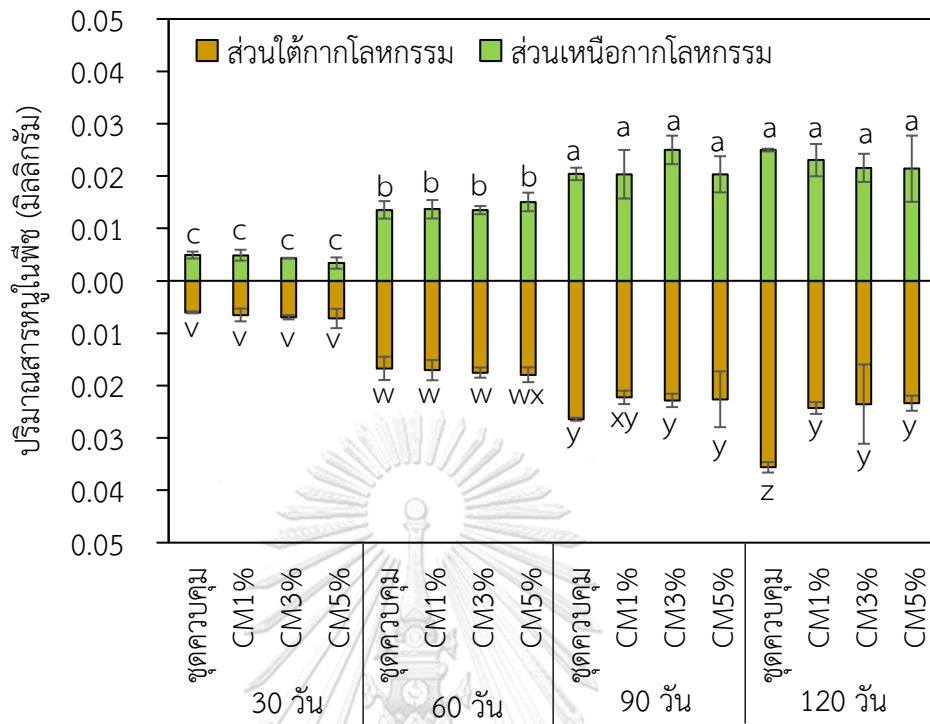
เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างชุดทดลองที่มีการเติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ มีการดูดซับและสะสมสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระน้อยที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Kiran et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ปุ๋ยคอกจากมูลวัว และถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวเพื่อใช้เป็นสารปรับปรุงดิน และลดการสะสมของแคดเมียมในผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) โดยใช้ในอัตรา 0, 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแคดเมียมที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ (Cadmium bioavailability) ดีกว่าการใส่ปุ๋ยคอกแบบธรรมดา ทั้งนี้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่สูง และเป็นประจุลบที่สามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดีกว่าสารอินทรีย์ของปุ๋ยคอก นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักทั้งทางด้านการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และเคมี (Chemical adsorption) และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่าปุ๋ยคอก (Zhu et al., 2017) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถ่าน

ชีวภาพและปุ๋ยคอกในอัตราเท่ากัน สามารถสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพจากไม้กระถินที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ช่วยตรึงสารหนูและแมงกานีสในกากโลหะกรรมได้ดีกว่าปุ๋ยคอกมูลวัว อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราการใส่ปุ๋ยคอกให้มากขึ้น อาจทำให้พืชมีการตรึงสารหนู และแมงกานีสได้มากขึ้นได้ ประกอบกับการใส่ปุ๋ยคอกยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดียิ่งขึ้นด้วย

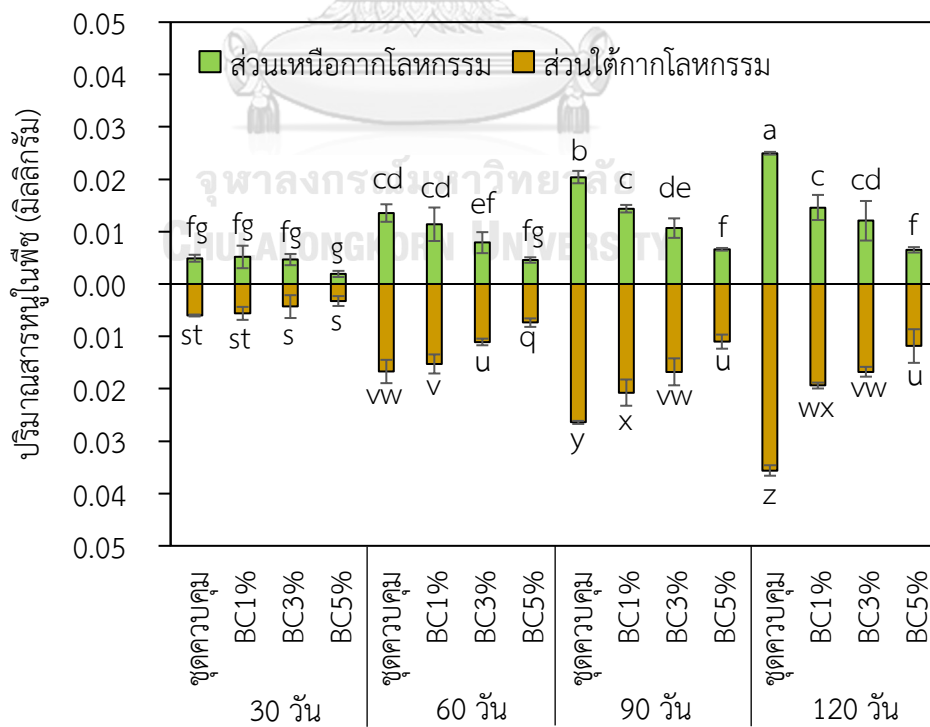
จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืช เมื่อนำมาคำนวณกับปริมาณการสะสมสารหนูต่อน้ำหนักทั้งต้น ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองควบคุมมีความสามารถในการสะสมสารหนูสูงที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม มีค่าเท่ากับ 0.0250 ± 0.0003 และ 0.0356 ± 0.0010 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 5 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการช่วยลดการสะสมสารหนูได้น้อยที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรมและส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 0.0214 ± 0.0063 และ 0.0234 ± 0.0014 มิลลิกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 3 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.18 สำหรับปริมาณการสะสมแมงกานีส พบว่า ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้พืชมีการสะสมแมงกานีสได้น้อยที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม เท่ากับ 1.6686 ± 0.2532 มิลลิกรัม และชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก 3 เปอร์เซ็นต์ ทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแมงกานีสน้อยที่สุดในส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 1.3305 ± 0.0200 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 4.19 ในชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ พบว่า การเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมสารหนูต่ำที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 0.0065 ± 0.0005 และ 0.0118 ± 0.0032 มิลลิกรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 0.0121 ± 0.0038 และ 0.0168 ± 0.0010 มิลลิกรัมตามลำดับ ดังรูปที่ 4.20 สำหรับปริมาณการสะสมแมงกานีสที่ระยะเวลาของการทดลองที่ 120 วัน พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดทดลองควบคุมมีความสามารถในการสะสมแมงกานีสได้สูงที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 1.1591 ± 0.0402 และ 1.3860 ± 0.0402 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมแมงกานีสน้อยที่สุดในส่วนเหนือกากโลหะกรรม และส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 0.3898 ± 0.0226 และ 0.5509 ± 0.0060 มิลลิกรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ ชุดทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ มีการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหะกรรมและส่วนใต้กากโลหะกรรม เท่ากับ 0.7133 ± 0.0183 และ 0.8267 ± 0.0588 มิลลิกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 สำหรับชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า มีการสะสมสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระมากกว่าชุดการทดลองใส่ถ่านชีวภาพ โดยชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์

มีการดูดติ่งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรมและส่วนใต้กากโลหกรรมได้มากที่สุด เท่ากับ 0.0227 ± 0.0019 และ 0.0273 ± 0.0011 มิลลิกรัม ตามลำดับ รองลงมา คือ ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 สำหรับปริมาณการสะสมแมงกานีส พบว่า ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้พืชมีการสะสมแมงกานีสได้น้อยที่สุดในส่วนเหนือกากโลหกรรม เท่ากับ 1.4356 ± 0.026 มิลลิกรัม และส่วนใต้กากโลหกรรม เท่ากับ 0.0227 ± 0.0373 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 4.23

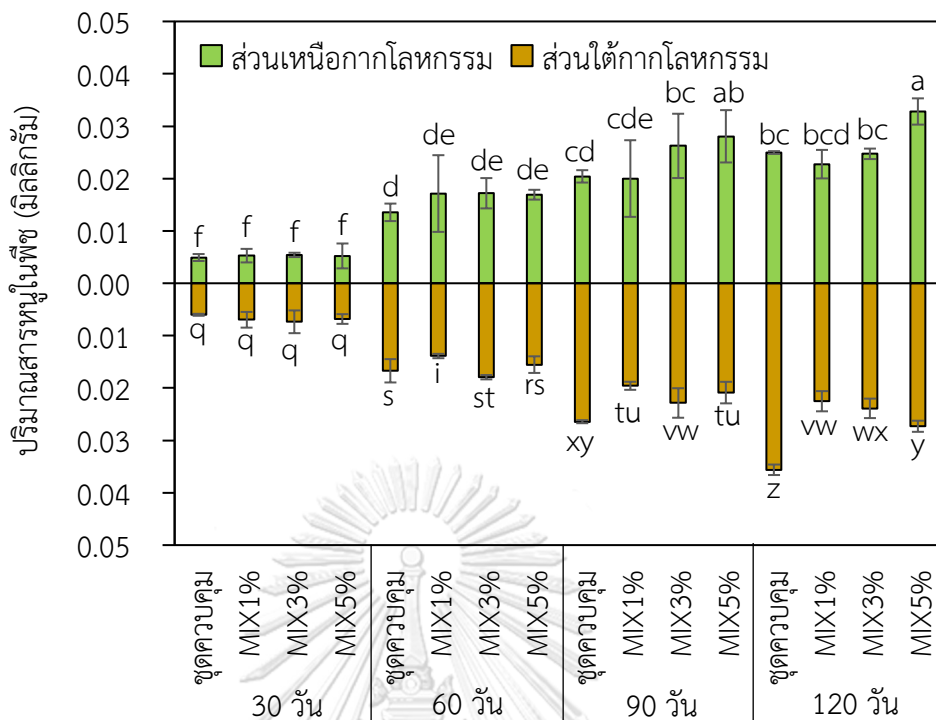
การทดลองครั้งนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการช่วยลดการสะสมสารหนูและแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระได้มากกว่าชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกและชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ แม้ว่าชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอก และชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ มีความสามารถในการลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนูและแมงกานีสที่สะสมในพืชได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ เนื่องจากการเติมปุ๋ยคอก โดยเฉพาะชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ สามารถทำให้พืชมีมวลชีวภาพมาก เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมในพืชร่วมกับน้ำหนักแห้งทั้งต้นแล้ว จึงสรุปได้ว่า พืชมีการสะสมสารหนูและแมงกานีสได้มากกว่าชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาอัตราการใส่ที่เหมาะสมต่อการลดการดูดติ่งและสะสมหรือการตรึงสารหนูและแมงกานีสโดยใช้หญ้าเนเปียร์แคระ สามารถแนะนำอัตราที่เหมาะสมได้คือ การเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 120 วัน สำหรับการอัตราของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพที่เหมาะสมในการตรึงสารหนู คือ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 120 วัน และอัตราของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพที่เหมาะสมในการตรึงแมงกานีส คือ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วัน อัตราของปุ๋ยคอกที่เหมาะสมในการตรึงสารหนู คือ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 120 วัน สำหรับการตรึงแมงกานีสไว้ในกากโลหกรรมนั้น มีการแนะนำที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ หรือ 3 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ขึ้นอยู่กับการพิจารณาและคัดเลือกลงไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ซึ่งหากต้องการใช้ประโยชน์จากมวลชีวภาพเป็นหลัก สามารถเลือกใช้หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยคอก แต่ถ้าต้องการใช้ประโยชน์จากพืชที่มีการสะสมสารหนูและแมงกานีสในปริมาณต่ำ ควรเลือกใช้ถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ จึงจะมีความเหมาะสมและดีที่สุด



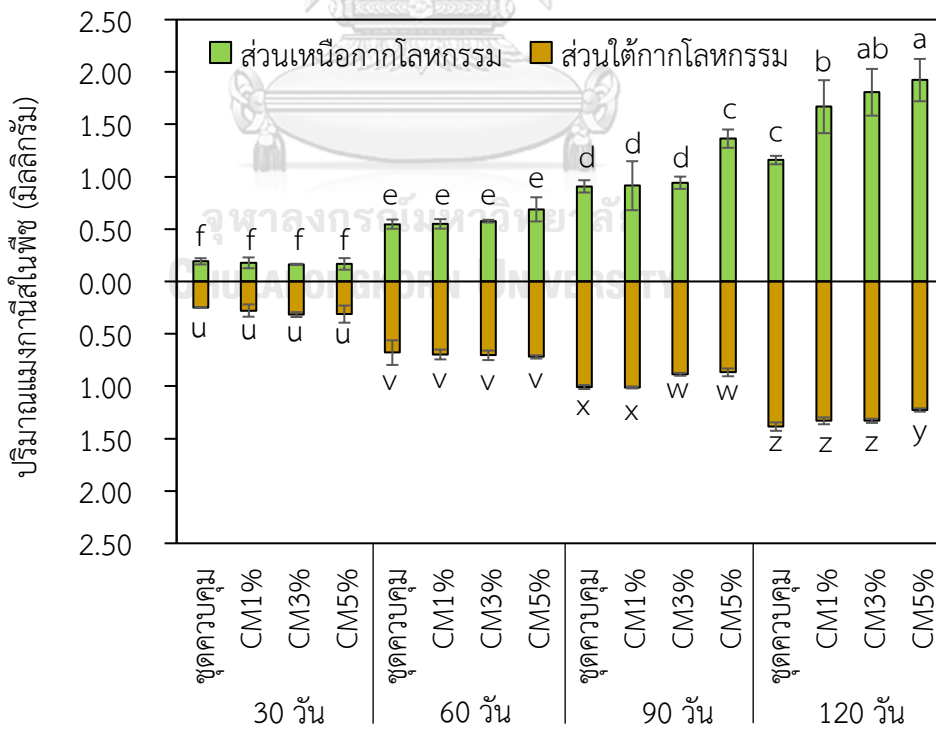
รูปที่ 4.18 ผลของปุ๋ยคอกต่อปริมาณการสะสมสารหนูนต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ



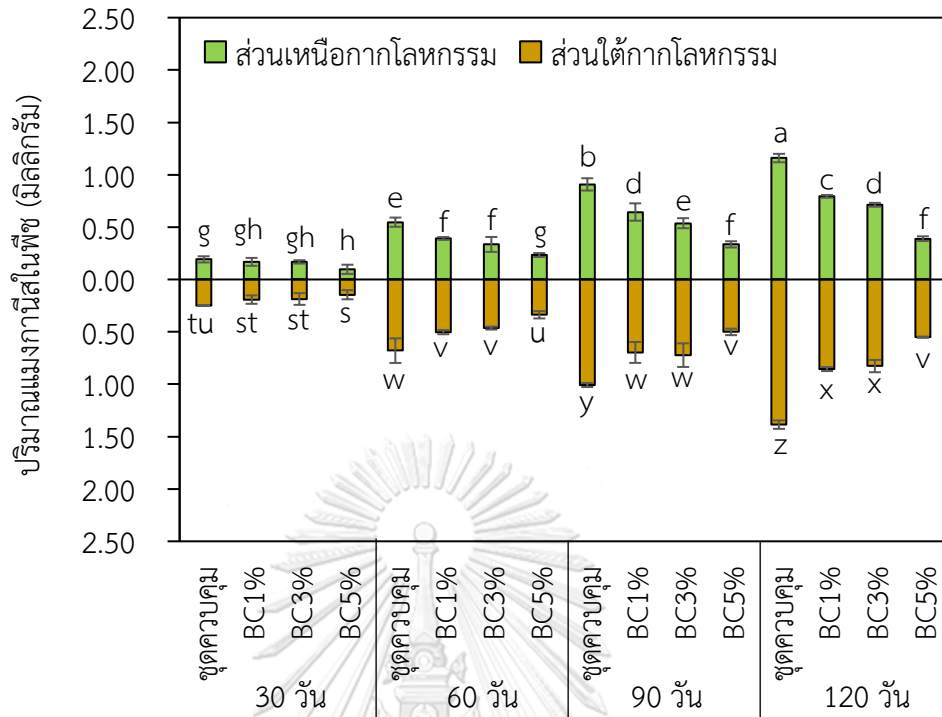
รูปที่ 4.19 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมสารหนูนต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ



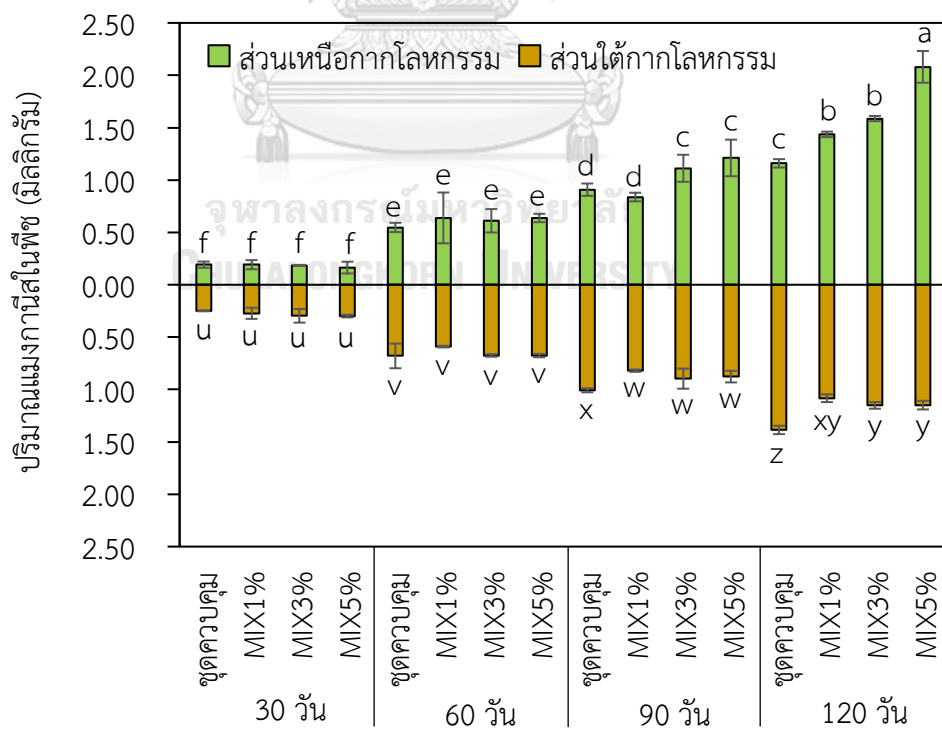
รูปที่ 4.20 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมสารหนูนํ้าหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ 4.21 ผลของปุ๋ยคอกต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ



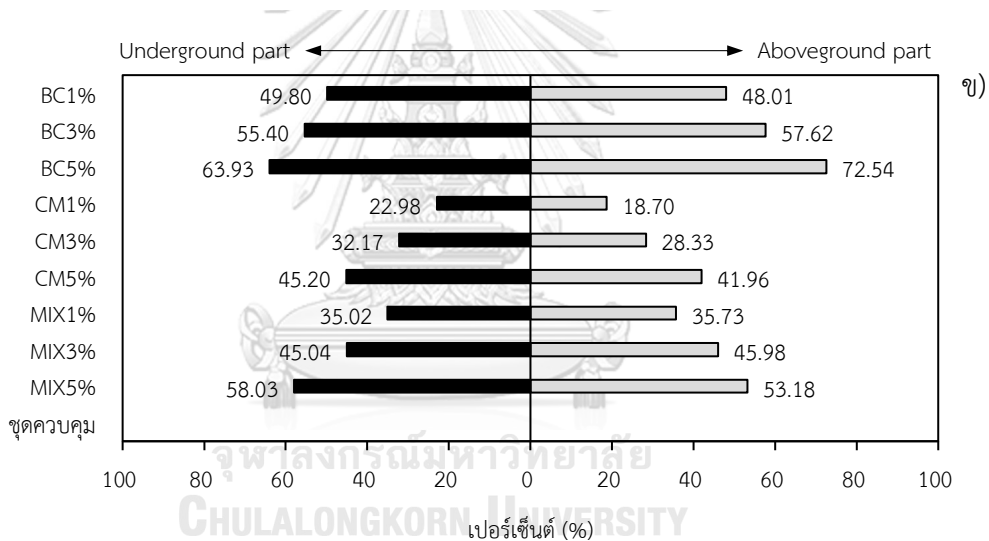
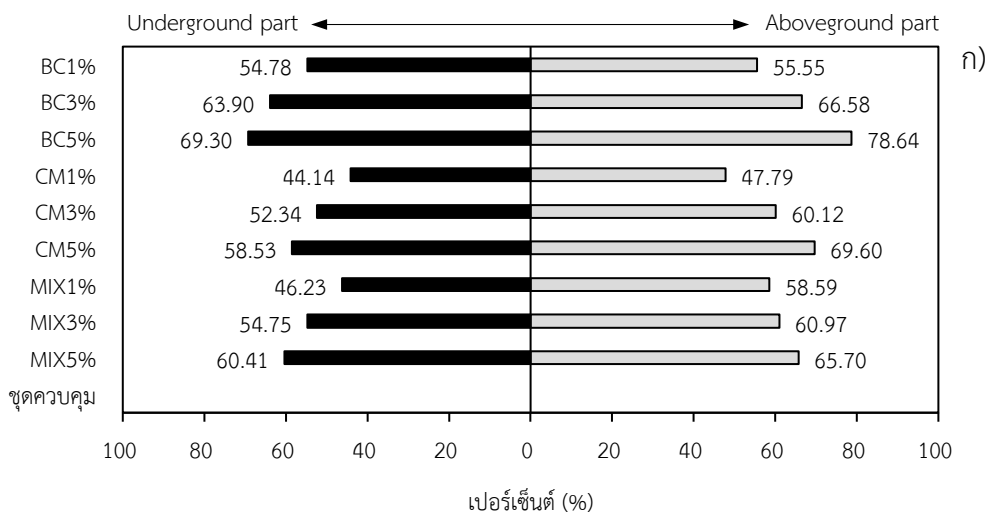
รูปที่ 4.22 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ 4.23 ผลของปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสต่อน้ำหนักทั้งต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ

4.6 ประสิทธิภาพของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพในการตรึงสารหนูและแมงกานีสด้วยหญ้าเนเปียร์ แคระ

เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด คิดเป็น 69.30 และ 78.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รองลงมาคือ อัตราส่วนของการใส่ถ่านชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้ เท่ากับ 63.90 และ 66.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และการใส่ปุ๋ยคอกที่ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด คิดเป็น 58.53 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด คิดเป็น 69.60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด เท่ากับ 60.41 และ 65.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24 ก) สำหรับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของการดูดซับและสะสมแมงกานีส พบว่า อัตราการใส่ถ่านชีวภาพที่ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดการดูดซับและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพืชได้มากที่สุด คิดเป็น 69.93 และ 72.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24 ข) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ พืชมีการสะสมของสารหนูและแมงกานีสในพืชได้น้อยที่สุด หรือกากโลหกรรมช่วยในการตรึงสารหนูและแมงกานีสได้ดี ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kiran et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ปุ๋ยคอกจากมูลวัว และถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวในการใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อลดการสะสมของแคดเมียมในผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) พบว่า ถ่านชีวภาพที่ทำจากมูลวัวมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Cadmium bioavailability) ดีกว่าการใส่ปุ๋ยคอกแบบธรรมดา และสามารถช่วยลดได้ประมาณ 34.3-69.9 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการสะสมในผักกาดเขียวปลีลดลง คิดเป็น 51.2 และ 67.4 เปอร์เซ็นต์ของการใส่อัตราถ่านชีวภาพที่ 6 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจึงเป็นวิธีการที่สามารถช่วยลดการปนเปื้อนแคดเมียมได้ และยังช่วยส่งเสริมความปลอดภัยด้านอาหารด้วย



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การลดลงของการสะสมสารหนูและแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์

ก) การดูดซับและสะสมสารหนูในส่วนเหนือและส่วนใต้กากโภชนากรรมของหญ้าเนเปียร์ และ

ข) การดูดซับและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือและส่วนใต้กากโภชนากรรมของหญ้าเนเปียร์

4.7 ผลของการสะสมสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง พบว่าที่ระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 0) กากโลหกรรมมีปริมาณการสะสมสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณการสะสมแมงกานีสเฉลี่ยเท่ากับ 958.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อระยะเวลาของการทดลองผ่านไป 120 วัน พบว่า สารหนูและแมงกานีสมีปริมาณลดลงจากช่วงเริ่มต้นของการทดลอง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชที่มีการดูดซับและสะสมสารหนูและแมงกานีสได้ เนื่องจากพืชมีความสามารถในการสะสมสารหนูและแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากพืชมีกลไกในการดูดซับแร่ธาตุและโลหะหนักต่าง ๆ รวมทั้งสารปนเปื้อนอื่น ๆ จากในดินและน้ำ ผ่านรากพืชไปสะสมไว้ยังส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ แต่การเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติในการตรึงหรือลดการดูดซับ และสะสมสารหนูและแมงกานีส จึงทำให้ความเข้มข้นของสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และลดลงได้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพที่เติมลงไป ดังตารางที่ 4.2 หากแต่ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการตรึงด้วยพืช (Phytostabilization) คือ สารโลหะหนักยังคงสะสมอยู่ในพื้นที่ จึงทำให้พบความเข้มข้นของโลหะหนักในกากโลหกรรมลดลงเพียงเล็กน้อย แต่สารที่เติมลงไปจะสามารถช่วยลดการชะละลายของสารโลหะหนัก หรือโลหะหนักที่พืชนำไปใช้ได้ (Metal bioavailability) รวมทั้งลดการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ (Bolan et al., 2011)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสในกากโลหกรรม

ชุดการทดลอง	ปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
สารหนู				
ชุดควบคุม	61.60±0.81 ^e	59.74±1.24 ^c	59.00±0.23 ^e	58.02±0.34 ^e
BC1%	64.72±0.24 ^{ab}	62.22±0.71 ^{abc}	61.30±0.37 ^{cd}	60.51±0.89 ^{cd}
BC3%	65.73±0.03 ^a	64.20±0.46 ^a	63.30±1.00 ^{ab}	62.09±0.30 ^{abc}
BC5%	64.10±0.40 ^{bcd}	63.61±1.10 ^a	64.03±0.78 ^a	63.71±0.71 ^a
CM1%	61.68±1.29 ^e	60.05±2.52 ^{bc}	59.86±1.35 ^{de}	59.00±0.81 ^{de}
CM3%	62.92±0.62 ^{de}	61.80±1.19 ^{abc}	61.01±0.34 ^{cd}	60.77±1.82 ^{bcd}
CM5%	64.16±0.20 ^{bcd}	63.31±1.47 ^a	62.61±1.20 ^{abc}	62.50±2.01 ^{abc}
MIX1%	60.23±1.20 ^f	59.96±2.00 ^{bc}	59.14±1.06 ^e	58.79±0.89 ^{de}
MIX3%	63.23±1.02 ^{cd}	62.47±0.80 ^{ab}	62.00±1.05 ^{bc}	61.85±1.89 ^{abc}
MIX5%	64.32±0.31 ^{bc}	64.19±0.52 ^a	63.71±1.03 ^a	63.00±1.64 ^{ab}
แมงกานีส				
ชุดควบคุม	891.00±4.36 ^{abc}	859.33±9.02 ^{bc}	832.67±16.62 ^c	815.67±7.64 ^e
BC1%	890.33±2.52 ^{abc}	882.33±4.04 ^{ab}	865.33±3.51 ^{ab}	847.00±9.64 ^{bc}
BC3%	907.67±22.19 ^{abc}	894.67±3.51 ^a	860.00±7.94 ^{ab}	857.00±4.58 ^{ab}
BC5%	877.33±53.13 ^{cd}	874.33±6.66 ^{abc}	870.67±7.77 ^a	861.67±3.79 ^a
CM1%	922.00±11.00 ^{ab}	895.33±11.15 ^a	876.33±11.59 ^a	827.33±2.52 ^{de}
CM3%	926.67±5.77 ^a	892.00±29.91 ^a	862.00±14.73 ^{ab}	821.33±13.32 ^e
CM5%	896.67±28.85 ^{abc}	885.33±5.13 ^{ab}	855.00±23.39 ^{abc}	836.67±4.16 ^{cd}
MIX1%	926.67±13.32 ^a	864.33±31.09 ^{abc}	853.00±18.19 ^{abc}	838.33±7.64 ^{cd}
MIX3%	891.33±30.66 ^{abc}	850.00±1.73 ^c	839.00±17.00 ^{bc}	840.33±5.03 ^{cd}
MIX5%	871.00±16.09 ^c	867.00±25.06 ^{abc}	851.00±3.00 ^{abc}	844.00±7.94 ^{bc}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

4.8 สมดุลมวล (Mass balance)

การศึกษาสมดุลมวล (Mass balance) เป็นการศึกษาปริมาณสารหนู และแมงกานีสที่อยู่ในหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดในกากโลหกรรม โดยผลการศึกษาดังกล่าว ได้ทำการคำนวณที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณสารหนู และแมงกานีสที่สูญหายไปในระบบทุก ๆ ชุดการทดลอง (ดังภาคผนวกตารางที่ ง17 และ ง18) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสารหนู และแมงกานีสบางส่วนมีการติดอยู่กับภาชนะทดลอง และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และบางส่วนติดอยู่กับหญ้าเนเปียร์แคระ ในช่วงทำการเก็บตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระ แล้วนำมาล้างก่อนนำไปวิเคราะห์ ส่งผลให้ปริมาณสารหนู และแมงกานีสบางส่วนอาจสูญหายไปจากระบบได้ และเมื่อพิจารณาจากการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูและแมงกานีส พบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสได้ในปริมาณน้อยมาก ทั้งนี้ จากผลการทดลองศึกษาปริมาณสารหนู และแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) มากกว่าส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ)

4.9 การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์การย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพด้วยวิธีการบรรจุปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพในถุงตาข่าย (Litter bag) ประมาณ 10 กรัม ต่อถุง ใส่ในกระถางที่ปลูกหญ้าเนเปียร์จำนวน 4 ถุงต่อกระถาง ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน นำมาชั่งน้ำหนักที่หายไป คำนวณอัตราและเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายตามสมการของ Exponential decay model (Olson, 1963) ซึ่งสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.9.1 ปุ๋ยคอก

ผลการศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอก พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ปุ๋ยคอกมีการย่อยสลายเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ปุ๋ยคอกมีน้ำหนักที่เหลืออยู่ 2.12 ± 0.35 กรัม ดังตารางที่ 4.3 เมื่อคำนวณอัตราการย่อยสลายแล้ว พบว่า มีค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (k) เท่ากับ 0.0130 และมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายคิดเป็น 78.83 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง

4.9.2 ถ่านชีวภาพ

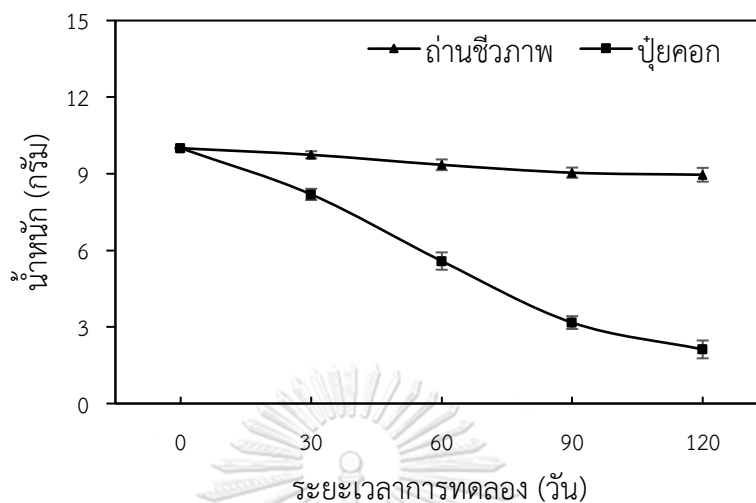
ผลการศึกษการย่อยสลายของถ่านชีวภาพ พบว่า ที่ระยะเวลาของการทดลอง 120 วัน ถ่านชีวภาพมีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.96 ± 0.15 กรัม ดังตารางที่ 4.3 มีค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย (k) เท่ากับ 0.0009 และมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง คิดเป็น 10.43 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.25 ทั้งนี้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนในขณะให้ความร้อน (Liu et al., 2013) อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจน และไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ด้วยลักษณะดังกล่าว จึงทำให้คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพมีความเสถียรสูง จึงสามารถเก็บกักไว้ในดินได้เป็นระยะเวลายาวนาน และมีคุณสมบัติคงทนต่อการย่อยสลาย (Beesley et al., 2014; Paz-Ferreiro et al., 2014)

เมื่อทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเฉลี่ยทุก ๆ 30 วัน พบว่า ปุ๋ยคอกมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายลดลงคิดเป็น 19.71 เปอร์เซ็นต์ ต่อเดือน และถ่านชีวภาพลดลงคิดเป็น 2.61 เปอร์เซ็นต์ ต่อเดือน หรือสามารถกล่าวได้ว่า ปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพจะมีการย่อยสลายหมดไปภายใน 5 เดือน และ 3 ปี ตามลำดับ ดังนั้น จะต้องมีการเติมปุ๋ยคอกทุก ๆ 5 เดือน และเติมถ่านชีวภาพทุก ๆ 3 ปี ทั้งนี้ ควรพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ คุณสมบัติ หรือองค์ประกอบด้านอื่น ๆ ร่วมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 การย่อยสลายของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ

ชุดการทดลอง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)				
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดทดลองที่เติม ปุ๋ยคอก	10.00±0.00	9.74±0.14	9.35±0.21	9.04±0.20	8.96±0.27
ชุดทดลองที่เติม ถ่านชีวภาพ	10.00±0.00	8.19±0.22	5.58±0.34	3.17±0.25	2.12±0.35



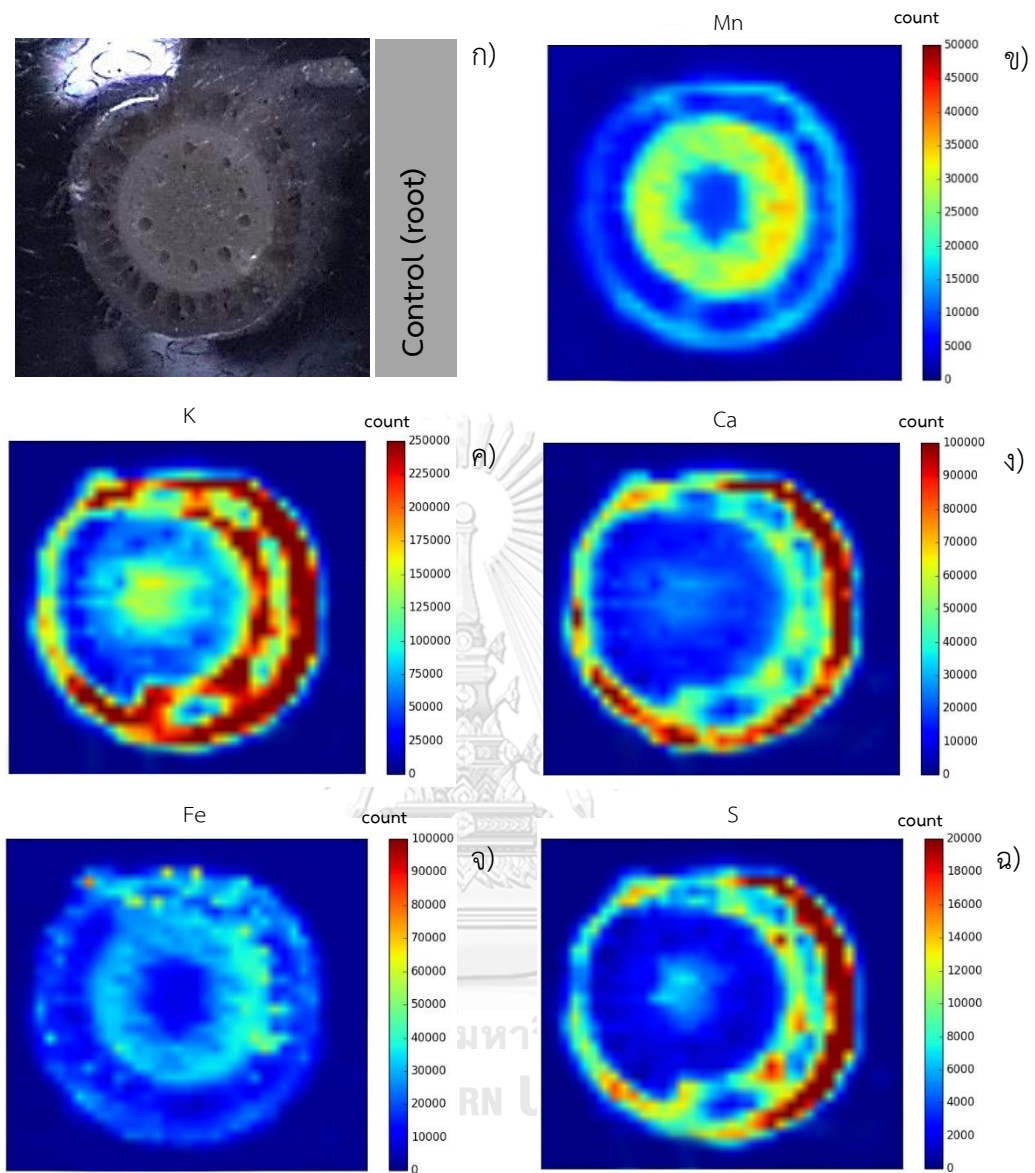
รูปที่ 4.25 การย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

4.10 การกระจายตัว และสะสมของสารหนูและแมงกานีสในพืช

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยการวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายของสารหนู และแมงกานีสไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) เป็นการศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมสารหนู และแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำตัวอย่างพืชอีกส่วนหนึ่งมาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง และนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (synchrotron radiation x-ray fluorescence; SR-XRF) ของระบบแสงที่ 6 (BL6b) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การสะสม และการกระจายตัวของสารหนู และแมงกานีส ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ ส่วนราก (root) ส่วนลำต้น (stem) และส่วนใบ (leaves) โดยการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาหญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ประกอบด้วย ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพ ในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีความสามารถในการตรึงสารหนูและแมงกานีสได้ดีที่สุด และชุดควบคุม ซึ่งมีการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสได้สูงที่สุด เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง 2 ชุดการทดลอง จากการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชด้วยลำแสงซินโครตรอนเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ผลการวิเคราะห์พบว่าเทคนิคดังกล่าวมีขีดจำกัดในการศึกษาการกระจายตัว เนื่องจากตัวอย่างมีการสะสมสารหนูที่ระดับความเข้มข้นต่ำเกินกว่าที่สามารถตรวจวัดได้ จึงทำให้ไม่ประสบความสำเร็จในการศึกษาด้วยเทคนิคหรือวิธีดังกล่าว แต่สามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุแมงกานีสได้

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า กล้วยาเนเปียร์แคะที่ปลูกในภาคโลทรกรรมที่ไม่มีการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ (ชุดควบคุม) ในส่วนราก พบธาตุโพแทสเซียม ซึ่งมีการกระจายตัว และการสะสมสูงที่สุด เช่นเดียวกับ แคลเซียม และซิลเฟอร์ ดังรูปที่ 4.26 สำหรับในส่วนของลำต้น (รูปที่ 2.27) และใบ (รูปที่ 2.28) ของกล้วยาเนเปียร์แคะ พบว่า มีธาตุโพแทสเซียม แคลเซียม ซิลเฟอร์ แมงกานีส และเหล็ก ซึ่งมีการกระจายตัว และการสะสมของธาตุแตกต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายตัว และการสะสมของโพแทสเซียม แคลเซียม และซิลเฟอร์ ในส่วนรากของกล้วยาเนเปียร์แคะในชุดควบคุม และชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ส่วนรากของกล้วยาเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ มีการกระจายตัว และการสะสมของธาตุดังกล่าว น้อยกว่าในส่วนรากของกล้วยาเนเปียร์แคะที่ปลูกในชุดควบคุม ดังรูปที่ 4.29 สำหรับในส่วนลำต้นของกล้วยาเนเปียร์แคะที่ปลูกในภาคโลทรกรรมที่มีการเติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีการกระจายตัว และการสะสมของธาตุโพแทสเซียมมากที่สุด ดังรูปที่ 4.30 เช่นเดียวกับส่วนใบของกล้วยาเนเปียร์แคะ นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัว และการสะสมแมงกานีส แคลเซียม เหล็ก และซิลเฟอร์ น้อยกว่ากล้วยาเนเปียร์แคะที่ปลูกในชุดควบคุม ดังรูปที่ 4.31

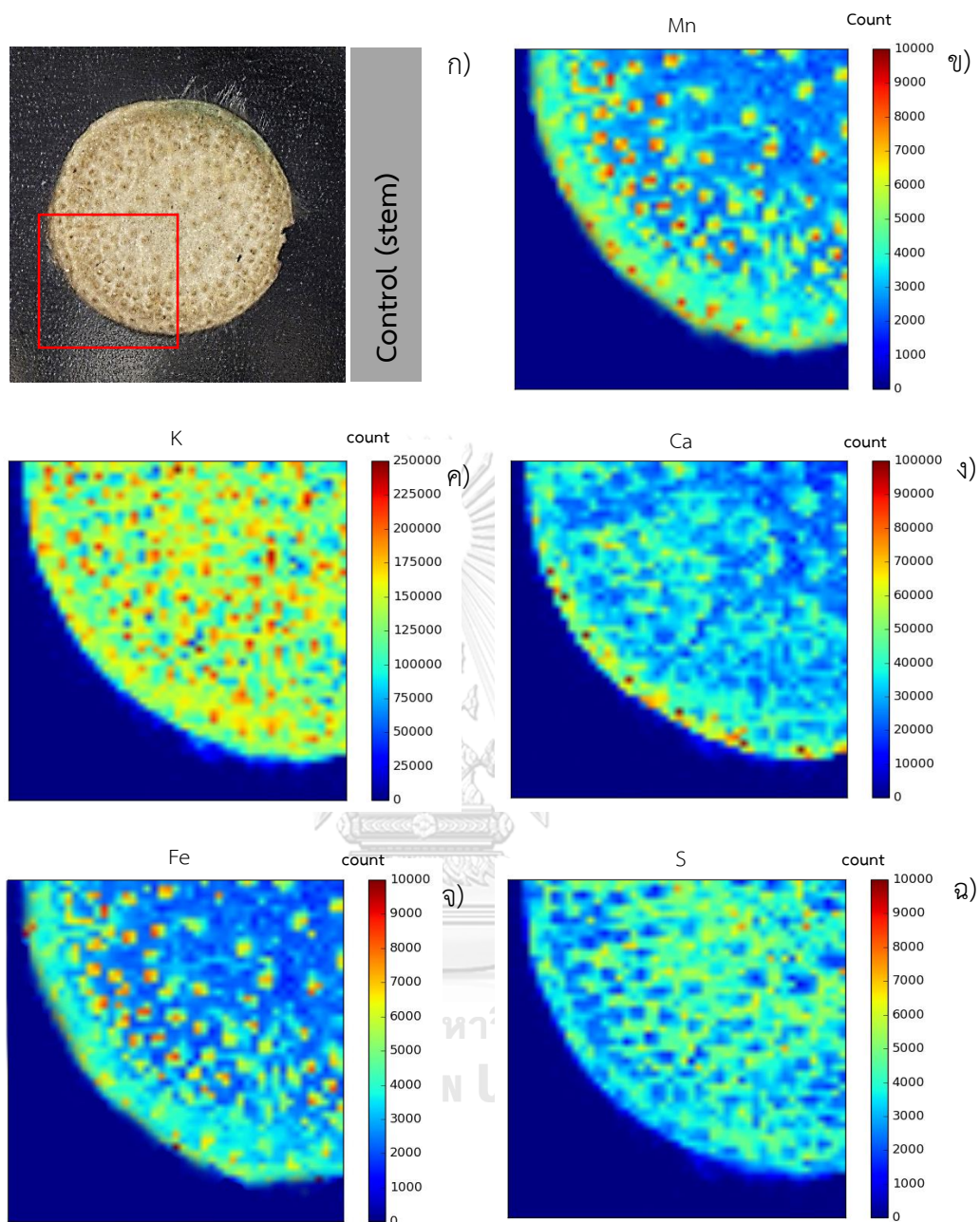
จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการลดการกระจายตัว และการสะสมโลหะหนักในพืชได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ การศึกษาในครั้งนี้ นอกจากพบการกระจายตัวและการสะสมของธาตุดังกล่าวแล้ว ยังพบธาตุอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส อะลูมิเนียม คลอรีน และซิลิกอน เป็นต้น หากแต่มีการกระจายตัว และสะสมในระดับต่ำ นอกจากนี้ ในทุกชุดการทดลอง พบว่า ธาตุมีการกระจายตัว และสะสมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และท่อลำเลียงอาหารมากที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Tananonchai et al. (2019) ได้ทำการศึกษาผลของสารอีดีทีเอ และเอนทีเอต่อการกระจายตัวของแคดเมียมด้วยกล้วยาเนเปียร์แคะ โดยใช้ลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) และเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICPMS) ผลการศึกษาพบว่า แคดเมียมมีการกระจายตัว และสะสมในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกเป็นหลัก ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ พบว่า มีการกระจายตัว และสะสมแคดเมียมในเนื้อเยื่อชั้นในได้มากขึ้น จึงสามารถกล่าวได้ว่า สารอีดีทีเอมีผลทำให้เกิดการลำเลียงแคดเมียมไปสะสมยังส่วนลำต้น และใบ เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.26 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนรากของกล้วยเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม)

ก) ส่วนรากของกล้วยเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม

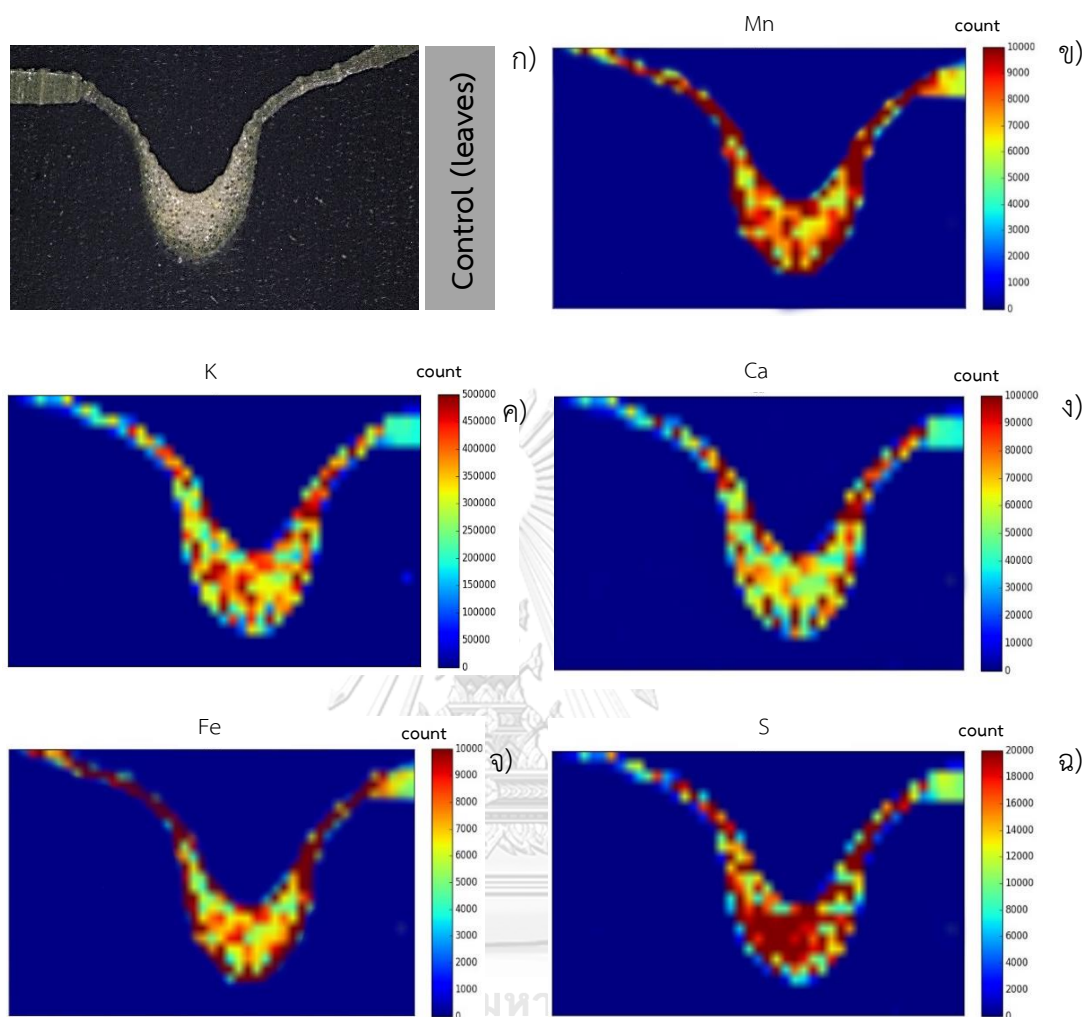
จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์



รูปที่ 4.27 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้นของกล้วยเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม)

ก) ส่วนลำต้นของกล้วยเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม

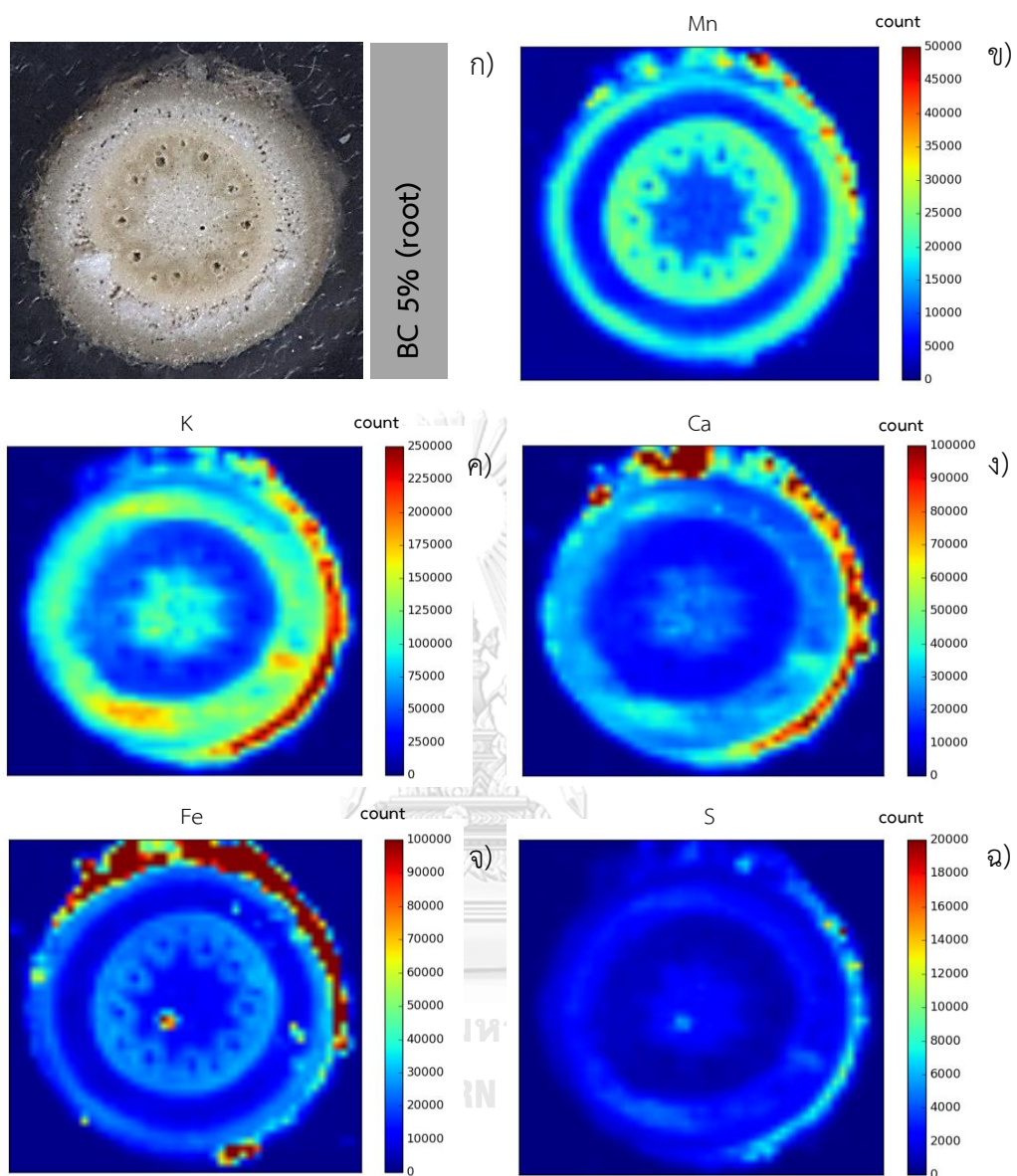
จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์



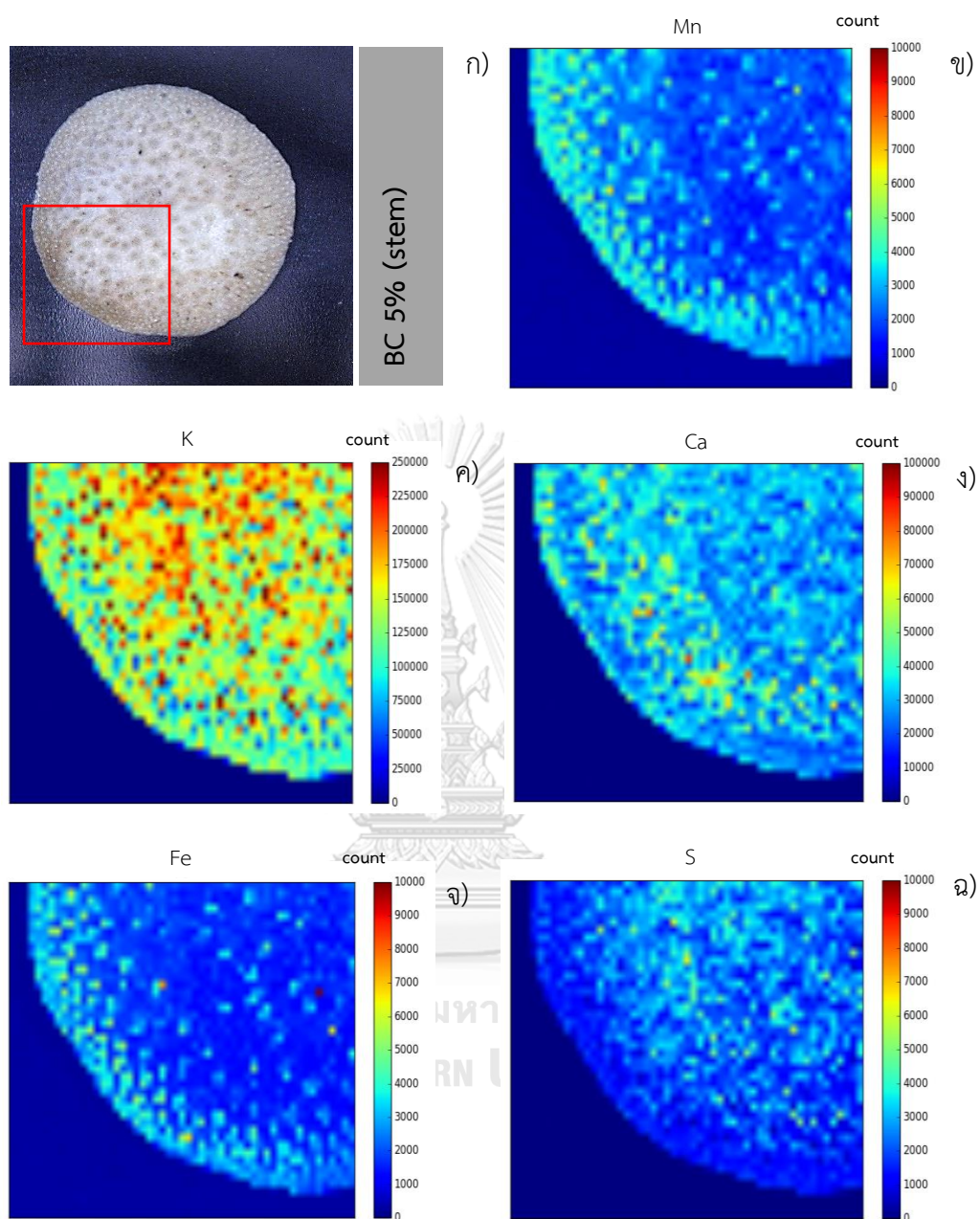
รูปที่ 4.28 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนใบของพริกเนเปียร์แคระ (ชุดควบคุม)

ก) ส่วนใบของพริกเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม

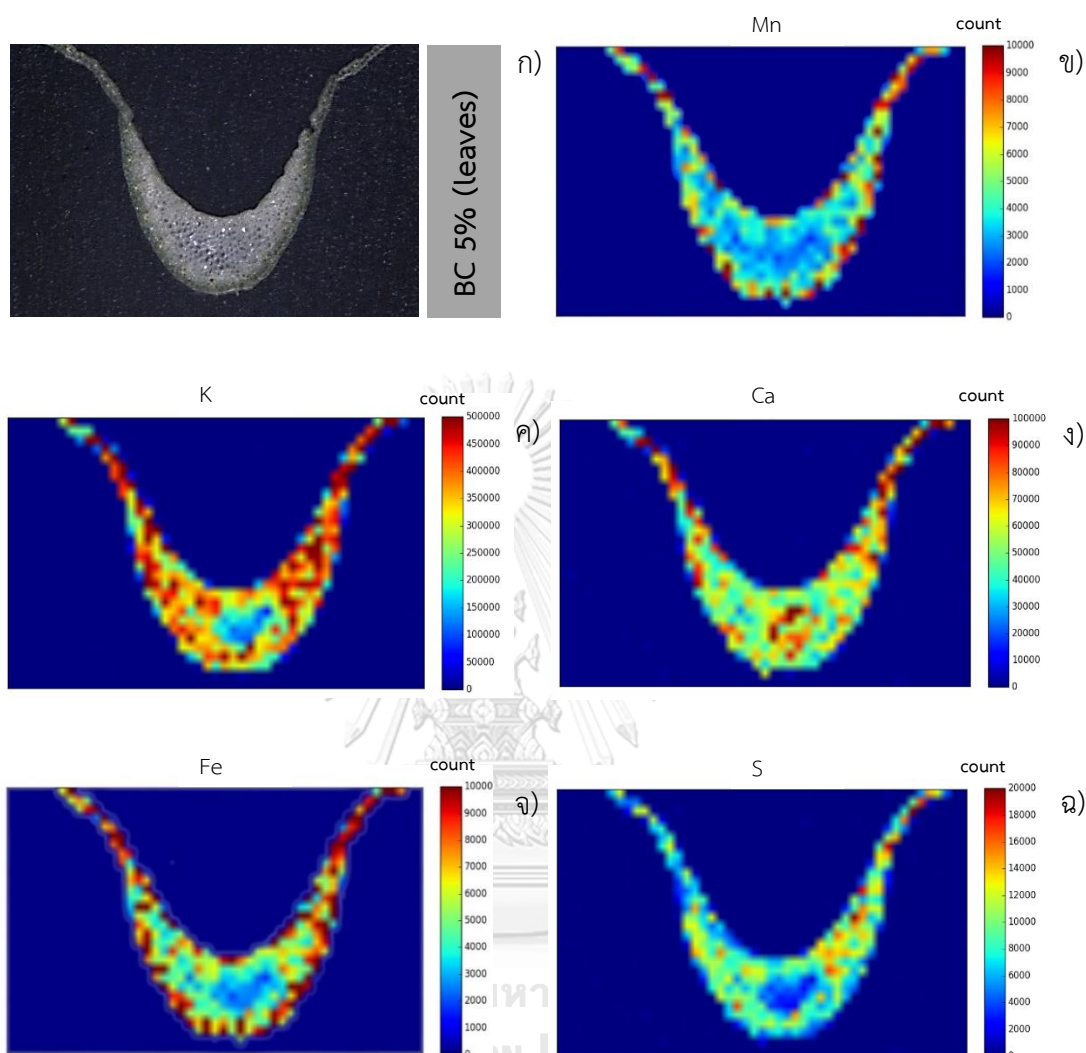
จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์



รูปที่ 4.29 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนรากของกล้วยเนเปียร์แคระ
 ในชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของกล้วยเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส
 ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์



รูปที่ 4.30 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้นของกล้วยเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เดิมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของกล้วยเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์



รูปที่ 4.31 การกระจายตัว และการสะสมธาตุต่าง ๆ ในส่วนใบของกล้วยเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ก) ส่วนใบของกล้วยเนเปียร์แคระ ข) ธาตุแมงกานีส ค) ธาตุโพแทสเซียม ง) ธาตุแคลเซียม จ) ธาตุเหล็ก และ ฉ) ธาตุซัลเฟอร์

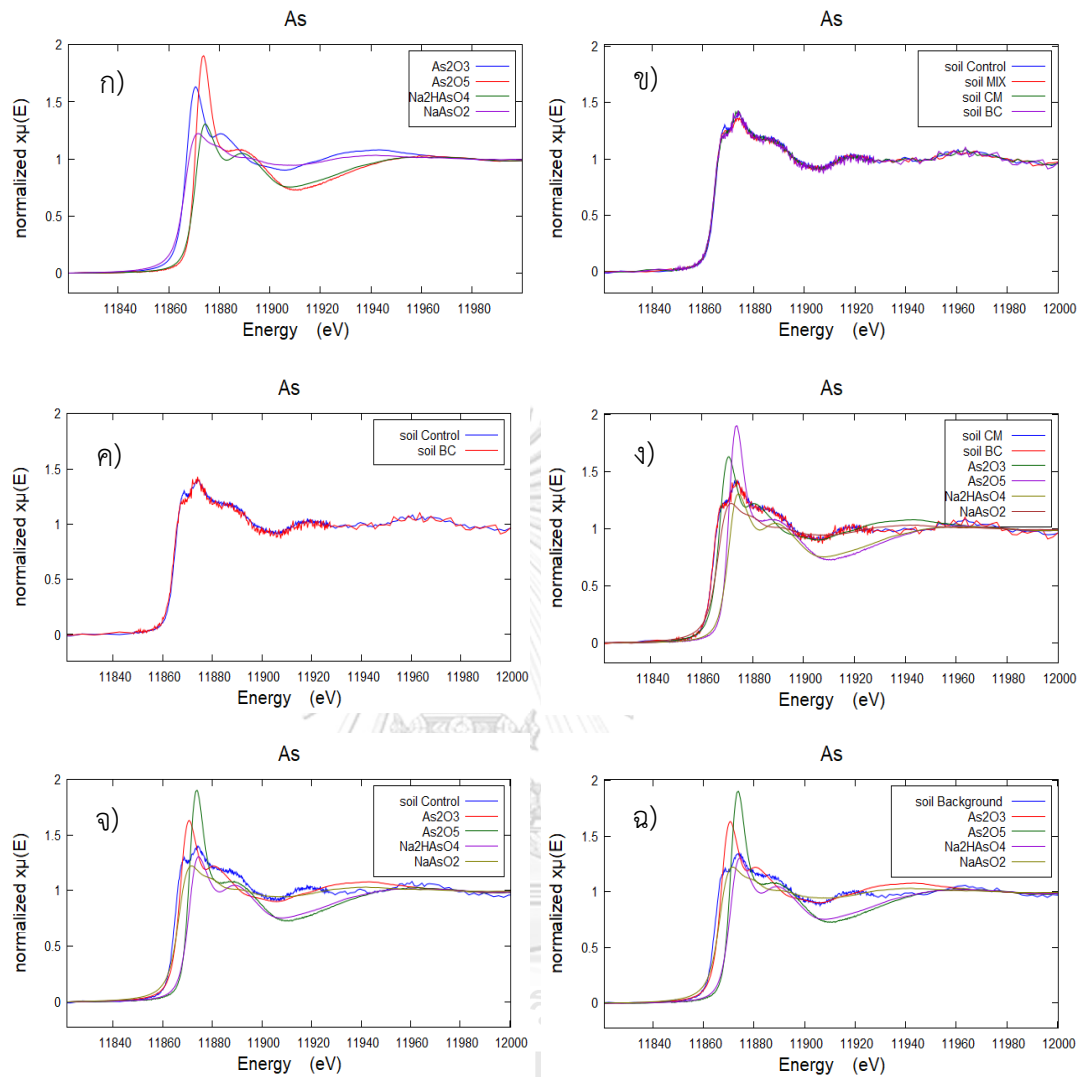
4.11 รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในพืช และกากโลหะกรรม

การศึกษารูปฟอร์มทางเคมี (Chemical form) ของสารหนู และแมงกานีสในกล้วยเนเปียร์แคระ และกากโลหะกรรม ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยการนำตัวอย่างพืชทดลอง ที่ทำการแยกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนใต้กากโลหะกรรมเหนือ (ลำต้น และใบ) และส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) และตัวอย่างกากโลหะกรรม มาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dry)

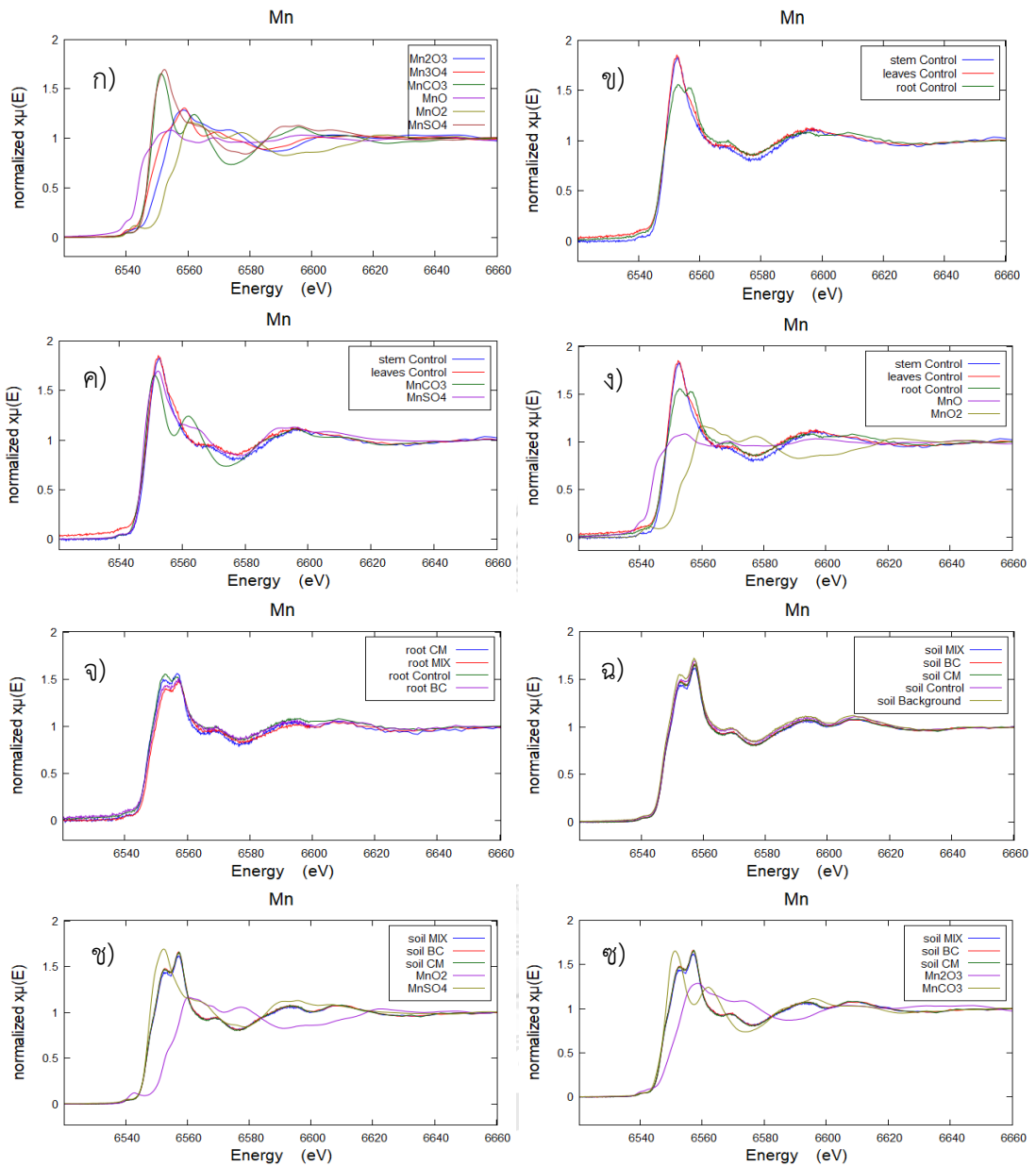
จากนั้นทำการการบดแยกส่วน และบดอัดเป็นเม็ดขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.75 เซนติเมตร) ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิคเอกซเรย์แอมบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี (X-ray absorption near-edge spectroscopy; XANES) ของระบบแสงที่ 1 (BL1.1W) โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 4-18 keV โดยได้ทำการวิเคราะห์ที่ห้วยาเนเปียร์ แคระ และกากโลหกรรม ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง โดยทำ Linear correlation fit เพื่อศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู และแมงกานีสที่สะสมในห้วยาเนเปียร์ แคระ และกากโลหกรรมที่เป็นไปได้ ผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในพืช พบว่า ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากมีระดับความเข้มข้นของสารหนูต่ำกว่าที่สามารถตรวจวัดได้ (<10ppm) สำหรับรูปฟอร์มทางเคมีของกากโลหกรรม พบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีสเปกตรัมที่ไม่เหมือนกับสารมาตรฐาน ดังรูปที่ 4.32 โดยได้ทำการวิเคราะห์อ้างอิงกับสารมาตรฐาน 4 ชนิด ได้แก่ As_2O_3 , As_2O_5 , $NaAsO_2$ และ Na_2HAsO_4 ดังรูปที่ 4.32 ก) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากโลหกรรมของแต่ละชุดการทดลอง พบว่า กากโลหกรรมของชุดควบคุมมีความแตกต่างจากชุดทดลองที่เติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ โดยสังเกตได้จากเส้นสเปกตรัมสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.32 ข) แสดงให้เห็นได้ว่า สารหนูในกากโลหกรรมของชุดควบคุมอยู่ในลักษณะไตรวาเลนซ์ (+3) หรือ อาร์เซไนต์ (Arsenite) ซึ่งอยู่ที่ค่าพลังงาน 11,869.73 eV มากกว่า เมื่อมีการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ ทำให้พีคของสเปกตรัมมีลักษณะที่เป็นเพนตะวาเลนซ์ (+5) หรือ อาร์เซเนต (Arsenate) ที่ค่าพลังงาน 11,873.65 eV ซึ่งอยู่ในรูปฟอร์มที่ความสามารถเคลื่อนที่ได้ต่ำ (Low mobility) และมีความเป็นพิษต่ำกว่าอาร์เซไนต์ (Arsenite) (Bissen and Frimmel et al., 2003; Pigna et al., 2015) แสดงให้เห็นได้ว่า ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพที่เติมลงไป ส่งผลทำให้สารหนูในกากโลหกรรมอยู่ในรูปฟอร์มของออกซิเดชันสเตต +5 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ปรากฏสเปกตรัมสีน้ำเงิน และชุดที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ปรากฏสเปกตรัมสีแดง เห็นได้ว่า มีสเปกตรัมที่มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.32 ค) เมื่อเปรียบเทียบกากโลหกรรมชุดที่มีการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ (รูปที่ 4.32 ง) ไม่พบสเปกตรัมที่มีลักษณะคล้ายกับสารมาตรฐาน เช่นเดียวกับกากโลหกรรมในชุดควบคุม (รูปที่ 4.32 จ) และกากโลหกรรมที่ไม่มีการปลูกห้วยาเนเปียร์ และไม่เติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ (รูปที่ 4.32 ฉ) สำหรับสารหนูในกากโลหกรรมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปฟอร์มของออกซิเดชันสเตต +5 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ ซึ่งมีคุณสมบัติในการปรับปรุงโครงสร้างของกากโลหกรรม โดยช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้อากาศหรือออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในกากโลหกรรมมากขึ้น และมีผลทำให้กากโลหกรรมซึ่งเดิมเป็นรูปฟอร์มของอาร์เซไนต์ (+3) เกิดการออกซิไดซ์ กลายเป็นกากโลหกรรมที่อยู่ในรูปฟอร์มของอาร์เซเนต (+5)

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม (7.68) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (271 มิลลิโวลต์ (mV)) ทำให้สามารถคาดการณ์รูปฟอร์มทางเคมีในกากโลหกรรมของสารหนูได้ โดยพบว่า สารหนูอยู่ในรูปฟอร์มของสารประกอบเชิงซ้อนกรดอาร์เซนิก (HAsO_4^{2-}) ดังภาคผนวกรูปที่ จ1 ก)

สำหรับการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีของแมงกานีส ได้ทำการวิเคราะห์อ้างอิงกับสารมาตรฐาน 6 ชนิด ได้แก่ MnO , MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , MnCO_3 และ MnSO_4 ดังรูปที่ 4.33 ก) เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างส่วนราก ลำต้น และใบของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในชุดควบคุมพบว่า รูปฟอร์มของแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะมีลักษณะเหมือนกัน และแตกต่างจากรูปฟอร์มในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะเมื่อพิจารณาตำแหน่งจุดกึ่งกลางของพีค และค่าพลังงานอิเล็กตรอนแล้ว พบว่า รูปฟอร์มของแมงกานีสในส่วนลำต้น และใบ อยู่ในรูปของแมงกานีสไดวาเลนซ์ หรือ Mn^{2+} ดังรูปที่ 4.33 ข) ซึ่งอาจพบใน Mn(II)-(oxalate) , Mn(II)-(citrate) หรือ Mn(II)-(malate) ได้ แสดงให้เห็นว่าพืชสามารถดูดดึงแมงกานีสในรูปฟอร์ม Mn^{2+} (Fernando et al., 2010; Xu et al., 2008) เมื่อเปรียบเทียบรูปฟอร์มของแมงกานีสในส่วนลำต้น และใบของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในชุดควบคุมกับสารมาตรฐาน MnCO_3 และ MnSO_4 ดังรูปที่ 4.33 ค) และรูปฟอร์มของแมงกานีสในส่วนราก ลำต้น และใบของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในชุดควบคุมกับสารมาตรฐาน MnO และ MnO_2 ดังรูปที่ 4.33 ง) พบว่า ไม่มีรูปฟอร์มที่ตรงกับสารมาตรฐาน สำหรับหญ้าเนเปียร์แคะในส่วนรากของแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.33 จ) พบว่า สเปกตรัมไม่มีความแตกต่างกัน สำหรับการศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของแมงกานีสในกากโลหกรรมของแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.33 ฉ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน MnO_2 และ MnSO_4 ดังรูปที่ 4.33 ช) และสารมาตรฐาน Mn_2O_3 และ MnCO_3 ดังรูปที่ 4.33 ซ) พบว่า ไม่มีลักษณะสเปกตรัมที่ตรงกัน แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าเป็นรูปฟอร์มใด เนื่องจากข้อจำกัดของทางด้านเทคนิคนี้ ที่ต้องมีการเตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปฟอร์มทางเคมีในตัวอย่างที่เฉพาะนี้ได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า รูปฟอร์มของแมงกานีสมีอยู่ในรูปฟอร์มอื่นที่นอกเหนือจากนี้ สำหรับการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มทางเคมีทั้งในพืช และกากโลหกรรม เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรม และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันเริ่มต้น พบว่า แมงกานีสในกากโลหกรรมอยู่ในรูปฟอร์มของแมงกานีส (III) ออกไซด์ (Mn_2O_3) ดังภาคผนวกรูปที่ จ1 ข)



รูปที่ 4.32 รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู ก) สารมาตรฐาน ข) กากโลหะกรรมของแต่ละชุดการทดลอง
 ค) ชุดทดลองกากโลหะกรรมที่เติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับสารมาตรฐาน
 ง) กากโลหะกรรมชุดควบคุม และกากโลหะกรรมชุดทดลองที่เติมถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์
 จ) กากโลหะกรรมชุดควบคุมเทียบกับสารมาตรฐาน และ ฉ) กากโลหะกรรมเทียบกับสารมาตรฐาน



รูปที่ 4.33 รูปฟอร์มทางเคมีของแมงกานีส ก) สารมาตรฐาน ข) หย้าเนเปียร์แคระในส่วนเหนือากา
 โลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากลอกรรม (ราก) ของชุดควบคุม ค) หย้าเนเปียร์แคระใน
 ส่วนเหนือากาโลกรรม (ลำต้นและใบ) ของชุดควบคุมเทียบกับสารมาตรฐาน ง) หย้าเนเปียร์แคระ
 ในส่วนเหนือากาโลกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากลอกรรม (ราก) เทียบกับสารมาตรฐาน
 จ) หย้าเนเปียร์แคระในส่วนใต้กากลอกรรม (ราก) ของแต่ละชุดการทดลอง ฉ) กากลอกรรมของ
 แต่ละชุดการทดลอง ช) กากลอกรรมของชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และปุ๋ยคอก
 ร่วมกับถ่านชีวภาพเทียบกับสารมาตรฐาน (MnO_2 และ $MnSO_4$) และ ซ) กากลอกรรมของชุด
 การทดลองที่เติมปุ๋ยคอก ถ่านชีวภาพ และปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพเทียบกับ

สารมาตรฐาน (Mn_2O_3 และ $MnCO_3$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการตรึงสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมโดยใช้หญ้าเนเปียร์แคระ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส 2) การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่สารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม 3) การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ และ 4) การศึกษาการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างพืช และรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างกากโลหกรรม โดยใช้เทคนิคระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อทำการทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส

ผลการทดสอบการชะละลายของสารหนูและแมงกานีส พบว่า เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง สามารถทำให้ความเข้มข้นของสารหนูถูกชะออกมาจากโลหกรรมเพิ่มขึ้น โดยที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2, 4 และ 6 มีความเข้มข้นของสารหนูที่ถูกชะออกมาเฉลี่ย เท่ากับ 2, 1.4 และ 1.3 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของแมงกานีสเฉลี่ยเท่ากับ 14.9, 12.5 และ 8 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการยับยั้งการเคลื่อนที่สารหนูและแมงกานีส ในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการตรึงสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ ในอัตรา 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดควบคุมมีการดูดซับและสะสมสารหนู และแมงกานีสในพืชทดลองได้สูงที่สุด และเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า สามารถช่วยลดปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสในพืชส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ได้สูงที่สุด แม้ว่าชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอก และชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอก สามารถช่วยลดการดูดซับและสะสมแมงกานีสได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูง และมีการแสดงความเป็นพิษต่ำ โดยชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพจากไม้กระถินในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงที่สุด และมีการแสดงความเป็นพิษต่ำที่สุด

แต่เมื่อนำมาคำนวณในรูปแบบของสมมูลมวลสาร เพื่อพิจารณาการสะสมสารหนูและแมงกานีสต่อต้านของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า มีปริมาณการสะสมสารหนู และแมงกานีสมากกว่าชุดการทดลองที่เดิม ถ่านชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพในการตรึงสารหนู และแมงกานีสด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพีชได้มากที่สุด คิดเป็น 63.93 และ 78.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถช่วยลดการดูดซับและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม และส่วนเหนือกากโลหกรรมของพีชได้มากที่สุด คิดเป็น 69.93 และ 72.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.3 การศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

จากการศึกษาผลการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ พบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ปุ๋ยคอกมีน้ำหนักเหลืออยู่ 2.12 ± 0.35 กรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 10 กรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเท่ากับ 78.83 เปอร์เซ็นต์ และถ่านชีวภาพมีน้ำหนักเหลืออยู่ 8.96 ± 0.15 กรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย 10.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพมีอัตราการย่อยสลายต่ำหรือช้า สามารถคงสภาพอยู่ได้นานถึง 3 ปี ในขณะที่ปุ๋ยคอกมีอัตราการย่อยสลายสูง และสามารถคงสภาพอยู่ในดินได้นานเพียง 5 เดือน เท่านั้น

5.1.4 การศึกษาการกระจายตัว การสะสม และรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูและแมงกานีสในตัวอย่างพีชและกากโลหกรรม โดยใช้เทคนิคระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron)

การศึกษาระยะการกระจายตัว และการสะสมสารหนู และแมงกานีสในส่วนราก (root) ลำต้น (stem) และใบ (leaves) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ที่ระยะเวลา 120 วันของการทดลอง ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) พบว่า เทคนิคดังกล่าวมีขีดจำกัดในการศึกษาการกระจายตัว และการสะสมสารหนู เนื่องจากสารหนูในตัวอย่างพีชมีระดับความเข้มข้นต่ำเกินกว่าที่เครื่องจะสามารถตรวจวัดได้ จึงทำให้ไม่ประสบความสำเร็จในการศึกษาด้วยเทคนิคหรือวิธีดังกล่าว หากแต่สามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุแมงกานีสได้ และพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองเดิม ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีการกระจายตัว และสะสมแมงกานีส และธาตุอื่น ๆ ได้แก่ แคลเซียม เหล็ก และซิลิเคอร์ น้อยกว่าชุดควบคุม และพบการสะสมในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และท่อลำเลียงอาหาร แสดงให้เห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพในอัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการลดการกระจายตัว และการสะสมโลหะหนักในพีชได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ นอกจากนี้ ยังพบการกระจายตัว และการสะสมของแมงกานีส เข็ม โพสฟอรัส อะลูมิเนียม คลอรีน และซิลิกอน หากแต่มีระดับความเข้มข้นต่ำ

การศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู และแมงกานีสในตัวอย่างพืช และกากโลหะกรรม ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอสซอร์บชันสเปกโทรสโกปี (SR-XAS) พบว่า รูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู ในหญ้าเนเปียร์แคระไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากมีระดับความเข้มข้นในตัวอย่างพืชต่ำ (<10ppm) สำหรับรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนูในกากโลหะกรรม พบว่า การเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ มีผล ทำให้รูปฟอร์มของสารหนูเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปฟอร์มของสารหนูที่มีออกซิเดชันสเตท +5 มากขึ้น สำหรับรูปฟอร์มของแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระในส่วนเหนือกากโลหะกรรม (ลำต้น และใบ) และ ส่วนใต้กากโลหะกรรม (ราก) พบว่า แมงกานีสที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้อยู่ในรูปฟอร์มของแมงกานีสที่มี ออกซิเดชันสเตท +2 (Mn^{+2}) สำหรับรูปฟอร์มของแมงกานีสในกากโลหะกรรม พบว่า ไม่สามารถระบุ รูปฟอร์มได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดด้านเทคนิคที่ต้องการเตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะ ใกล้เคียงกับรูปฟอร์มทางเคมีในตัวอย่างที่เฉพาะนี้ได้

ดังนั้น ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่า ปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินมี ความสามารถในการช่วยลดการดูดดึงและสะสมสารหนู และแมงกานีสในหญ้าเนเปียร์แคระได้ และมี ส่วนช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และปรับปรุงสมบัติของกากโลหะกรรม โดยอัตราที่ เหมาะสมต่อการลดการดูดดึงและสะสมหรือการตรึงสารหนู และแมงกานีสในกากโลหะกรรมด้วย หญ้าเนเปียร์แคระนั้น สามารถสรุปได้ว่า การเติมถ่านชีวภาพที่อัตรา 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลด ความเข้มข้นของสารหนู และแมงกานีสในพืชส่วนใต้กากโลหะกรรม และส่วนเหนือกากโลหะกรรมได้ มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้เทคโนโลยีการตรึงโลหะหนักด้วยพืช (Phytostabilization) ยังมี ข้อจำกัดเนื่องจากสารโลหะหนัก หรือสารมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในพื้นที่ที่มีปริมาณความเข้มข้น มาก อาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่ำ ดังนั้น ควรใช้ เทคโนโลยีการสกัดด้วยพืช (Phytoextraction) เริ่มต้นก่อน แล้วจึงใช้เทคโนโลยีการตรึงด้วยพืชตาม เพื่อลดการสะสมสารโลหะหนักในพืช ให้สามารถนำพืชไปใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้ง เป็นแนวทางในการ ลดความเสี่ยงของการกระจายโลหะหนักเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ และสามารถใช้เป็นข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาดิน และกากโลหะกรรมที่ปนเปื้อนโลหะ หนักด้วยพืช และยังสามารถช่วยเปลี่ยนแปลงพื้นที่นั้นให้เกิดการนำมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยต้องมีการ พิจารณาเลือกพืชที่เหมาะสม เช่น พืชพลังงาน เป็นต้น มาทำการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนให้เกิด ประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาสารตัวกลางอื่น ๆ ที่ใช้ในการตรึงโลหะหนัก เช่น ถ่านชีวภาพที่ทำจากวัสดุเหลือใช้อื่น ๆ หรือสารอนุภาคนาโนที่เคลือบด้วยเหล็กเพื่อการตรึงสารหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพราะประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ขนาดของอนุภาค และอัตราที่เติมลงไป เป็นต้น และอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการเพิ่มอัตราของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพให้มากขึ้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการตรึงโลหะหนัก และการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชด้วย

5.2.2 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากห้องทดลอง และในพื้นที่ปนเปื้อนจริง เพื่อให้ทราบอิทธิพลของปัจจัยอื่น ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ แสงแดด อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ต่อการดูดซับและสะสมสารหนูและแมงกานีส การเจริญเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ เป็นต้น

5.2.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายธาตุสารหนูไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 ด้วยเทคนิค Micro-XRF/XRD ควรมีการศึกษาในระยะเวลาการทดลองที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้เห็นลักษณะการสะสมและกระจายตัวของสารหนูในพืชที่ชัดเจนขึ้น หรือควรเลือกใช้ระบบลำเลียงแสงอื่นที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้สามารถตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ และสามารถแสดงผลของข้อมูลได้อย่างถูกต้องและชัดเจน

5.5.4 การศึกษาอัตราการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพด้วยการวัดน้ำหนักที่หายไปนั้นอาจไม่ครอบคลุม และชัดเจนในผลที่มีต่อประสิทธิภาพของการตรึงโลหะหนัก ดังนั้น อาจมีวิธีการอื่น ๆ ในการศึกษา เช่น ระยะเวลาการเติมสารตัวกลางที่เหมาะสม เป็นต้น

5.5.5 ควรมีการศึกษาอัตราของการเติมปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอัตราของการเติมปุ๋ยคอกเป็น 25 หรือ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลการทดลองในด้านความเหมาะสมในการตรึงโลหะหนักที่ชัดเจน และครอบคลุม



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สถานที่ดำเนินการทดลอง



ก)



ข)



ค)



ง)



จ)



ฉ)

รูปที่ ก1 ก) บริเวณด้านหน้าโรงเรือนทดลอง ข) บริเวณภายในโรงเรือนทดลอง ค) ห้องเตรียมสารเคมี
ง) ห้องปฏิบัติการสำหรับเตรียมตัวอย่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อน จ) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การ
มหาชน) และ ฉ) ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน



ก)



ข)



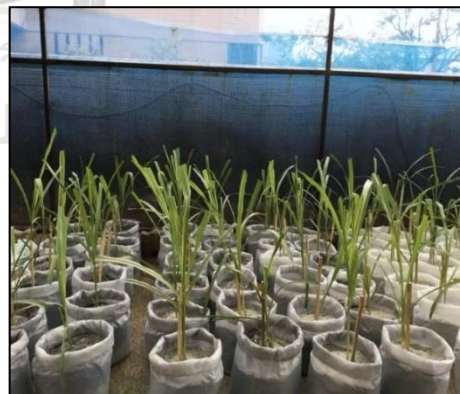
ค)



ง)



จ)



ฉ)

- รูปที่ ก2 ก) ท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ ข) การปักชำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ
 ข) หญ้าเนเปียร์แคระหลังจากการเพาะชำ 2 สัปดาห์ ง) การคัดเลือกต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ
 จ) การเริ่มต้นการทดลองปลูกหญ้าเนเปียร์หญ้าเนเปียร์ในภาคไลทเธอร์ม
 และ ฉ) หญ้าเนเปียร์หลังจากการทดลอง 4 สัปดาห์



ก)



ข)



ค)



ง)

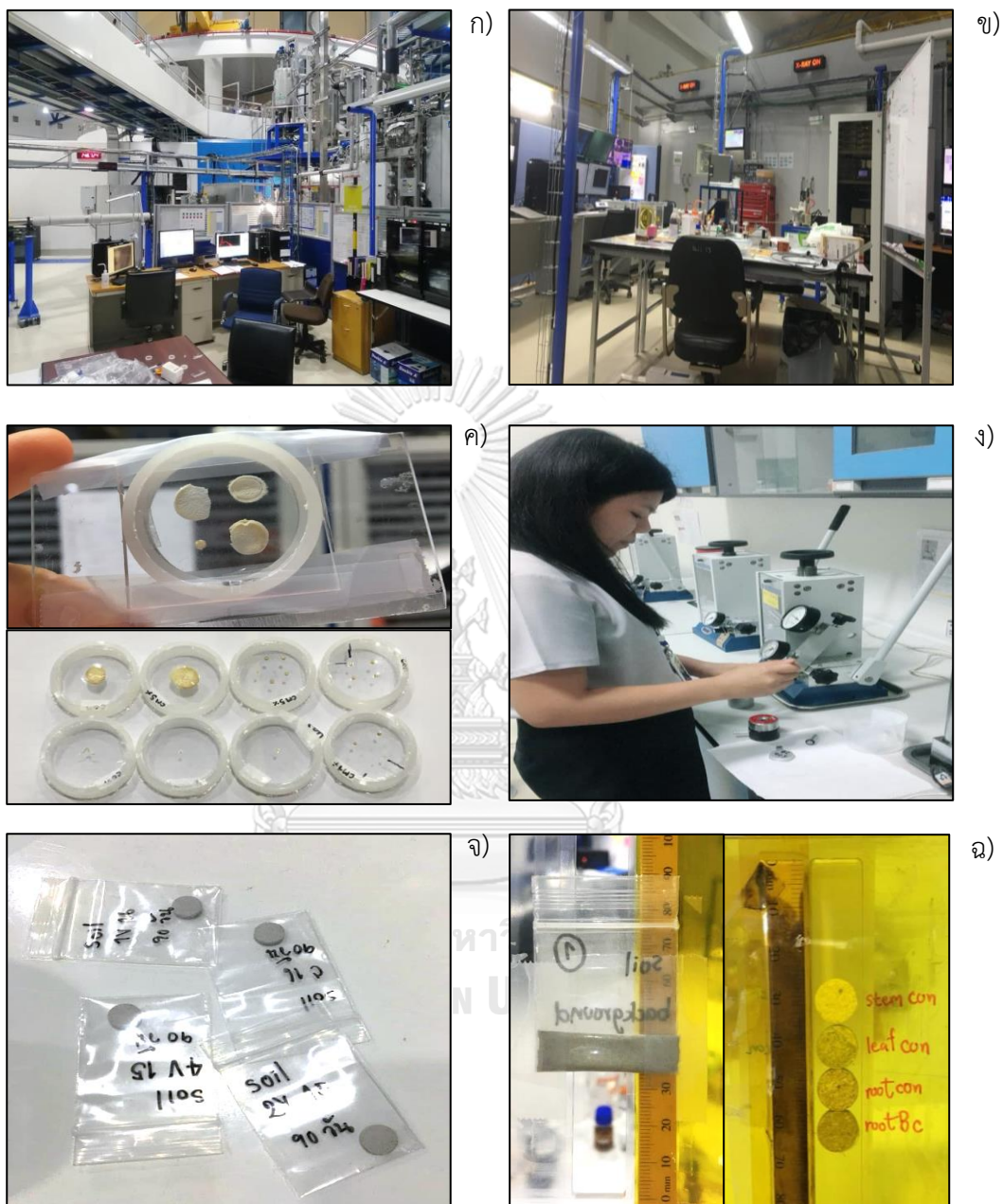


จ)



ฉ)

รูปที่ ก3 ก) เครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dryer) ข) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) ค) เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ง) เครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออปติคอลลิมิชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively coupled Plasma-optical emission spectrometry; ICP-OES) จ) เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Scanning electron microscope-energy x-ray spectroscopy; SEM-EDS) และ ฉ) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker)



รูปที่ 4 ก) สถานีวิจัยที่ BL6b ข) สถานีวิจัยที่ BL1.1W ค) การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Micro-XRF ง) กระบวนการอัดเม็ดตัวอย่างโดยเพิ่มเป็นลำดับขั้น จ) ตัวอย่างอัดเม็ดของกากโลหะกรรม และ ฉ) การเตรียมตัวอย่างแบบอัดเม็ดและแบบผงเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XAS

ภาคผนวก ข
วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1) การศึกษาผลของปุ๋ยคอกมูลวัวและถ่านชีวภาพจากไม้กระถินต่อการตรึงสารหนูและแมงกานีสใน
กากโลหะกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

ตารางที่ ข1 ค่าความเป็นกรด-ด่างในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
ชุดควบคุม	3	7.68				
CM5%	3		7.78			
MIX1%	3		7.80	7.80		
CM3%	3		7.81	7.81		
CM1%	3		7.82	7.82		
MIX3%	3		7.84	7.84		
BC1%	3		7.85	7.85		
BC3%	3			7.87		
MIX5%	3				7.98	
BC5%	3					8.11

ตารางที่ ข10 ค่าการนำไฟฟ้าในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ชุดควบคุม	3	980.92								
BC1%	3		1194.33							
MIX1%	3			1260.00						
MIX3%	3				1409.50					
BC3%	3					1473.33				
CM1%	3					1498.67	1498.67			
MIX5%	3						1541.01			
CM3%	3							1646.00		
BC5%	3								1715.63	
CM5%	3									1981.67

ตารางที่ ข11 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
ชุดควบคุม	3	271.00					
MIC1	3	276.60	276.60				
BC1	3		278.97	278.97			
MIX3	3		283.40	283.40			
CM1	3			286.27	286.27		
BC3	3				290.83		
CM3	3				292.03	292.03	
MIX5	3				292.80	292.80	
CM5	3					299.27	
BC5	3						309.20

ตารางที่ ข12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่าน
ชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
BC1%	3	250.37						
ชุดควบคุม	3		263.63					
MIX1%	3		264.63	264.63				
MIX3%	3			272.00	272.00			
CM1%	3				277.17	277.17		
CM3%	3					280.27		
BC3%	3					281.33	281.33	
MIX5%	3					282.90	282.90	
CM5%	3						289.23	
BC5%	3							299.23

ตารางที่ ข13 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่าน
ชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC1%	3	248.50					
ชุดควบคุม	3	250.90					
MIX1%	3		256.23				
CM1%	3			262.13			
MIX3%	3			265.13			
CM3%	3				269.67		
MIX5%	3				271.20		
BC3%	3				271.33		
CM5%	3					275.90	
BC5%	3						287.00

ตารางที่ ข14 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่าน
ชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
CM5%	3	241.00							
MIX1%	3		244.33						
BC1%	3			247.50					
CM3%	3			248.00					
ชุดควบคุม	3				250.03				
CM1%	3				252.40	252.40			
MIX1%	3					254.50	254.50		
MIX5%	3						256.67		
BC3%	3							262.00	
BC5%	3								268.00

ตารางที่ ข15 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่าน
ชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
CM1%	3	234.03					
CM3%	3	235.43					
CM5%	3	236.00					
BC3%	3		242.13				
ชุดควบคุม	3		243.33	243.33			
MIX3%	3			244.77			
BC1%	3			246.60	246.60		
MIX1%	3				247.33	247.33	
BC5%	3					248.47	
MIX5%	3						254.30

ตารางที่ ข16 มวลชีวภาพในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
BC5%	3	2.10
ชุดควบคุม	3	2.23
CM1%	3	2.31
CM3%	3	2.31
BC1%	3	2.53
MIX1%	3	2.70
CM5%	3	2.77
BC3%	3	2.77
MIX3%	3	2.96
MIX5%	3	3.19

ตารางที่ ข17 มวลชีวภาพในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	5.64				
BC3%	3	5.72				
BC1%	3	5.80				
ชุดควบคุม	3	5.89				
CM1%	3	7.51	7.51			
CM3%	3	8.53	8.53	8.53		
MIX1%	3			9.90	9.90	
MIX3%	3			10.80	10.80	
CM5%	3				12.85	12.85
MIX5%	3					14.01

ตารางที่ ข20 มวลชีวภาพในส่วนใต้กากลโหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากลโหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดควบคุม	3	1.42		
BC5%	3	1.47		
BC1%	3	1.56	1.56	
BC3%	3	1.62	1.62	
CM1%	3	1.70	1.70	
MIX1%	3	1.87	1.87	
CM3%	3	2.15	2.15	2.15
MIX3%	3		2.26	2.26
CM5%	3			2.61
MIX5%	3			2.76

ตารางที่ ข21 มวลชีวภาพในส่วนใต้กากลโหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากลโหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	3.69				
ชุดควบคุม	3	3.74				
BC1%	3		4.37			
MIX1%5	3		4.38			
BC3%	3		4.42			
CM1%	3			5.06		
CM3%	3				5.61	
MIX3%	3				5.87	
CM5%	3					6.70
MIX5%	3					6.75

ตารางที่ ข26 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	0.72				
CM5%	3	0.87	0.87			
MX5%	3		0.96			
BC3%	3		1.00			
MIX3%	3			1.22		
CM3%	3				1.41	
BC1%	3				1.43	
MIX1%	3				1.44	
CM1%	3				1.57	
ชุดควบคุม	3					2.34

ตารางที่ ข27 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC5%	3	0.52					
CM5%	3		0.74				
BC3%	3		0.81	0.81			
MIX5%	3		0.83	0.83			
MIX3%	3			0.95	0.95		
CM3%	3			0.97	0.97		
MIX1%	3				1.01		
BC1%	3				1.08		
CM1%	3					1.27	
ชุดควบคุม	3						2.43

ตารางที่ ข28 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูก
ในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	2.23				
MIX5%	3	2.47	2.47			
BC3%	3	2.65	2.65			
CM5%	3		2.75			
MIX3%	3			3.22		
CM3%	3			3.24		
BC1%	3			3.63	3.63	
MIX1%	3				3.71	
CM1%	3				3.83	
ชุดควบคุม	3					4.24

ตารางที่ ข29 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูก
ในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC5%	3	2.00					
MIX5%	3	2.30	2.30				
BC3%	3		2.50	2.50			
CM5%	3			2.67			
MIX3%	3				3.06		
CM3%	3				3.12		
MIX1%	3				3.17	3.17	
CM1%	3				3.38	3.38	
BC1%	3					3.49	
ชุดควบคุม	3						4.59

ตารางที่ ข30 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูก
ในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
BC5%	3	1.77						
MIX5%	3		2.12					
BC3%	3		2.25					
CM5%	3		2.44	2.44				
MIX3%	3			2.61	2.61			
MIX1%	3				2.83	2.83		
CM3%	3				2.83	2.83		
CM1%	3					3.13	3.13	
BC1%	3						3.23	
ชุดควบคุม	3							4.89

ตารางที่ ข31 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูก
ในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC5%	3	1.57					
BC3%	3		1.84				
MIX5%	3		2.02	2.02			
CM5%	3		2.11	2.11			
BC1%	3			2.31	2.31		
MIX3%	3			2.31	2.31		
CM1%	3				2.43		
MIX1%	3					2.74	
CM1%	3					2.85	
ชุดควบคุม	3						5.10

ตารางที่ ข32 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
BC5%	3	45.53						
MIX5%	3		51.28					
CM5%	3			60.05				
BC3%	3			60.63				
MIX3%	3			62.35	62.35			
BC1%	3				66.28	66.28		
CM3%	3					70.33		
MIX1%	3					70.85		
CM1%	3						76.48	
ชุดควบคุม	3							86.00

ตารางที่ ข33 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC5%	3	41.35					
MIX5%	3	45.59					
CM5%	3		53.42				
MIX3%	3		56.73	56.73			
BC3%	3			58.64			
MIX1%	3				65.25		
CM3%	3				67.57		
BC1%	3				67.58		
CM1%	3					73.20	
ชุดควบคุม	3						92.91

ตารางที่ ข40 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
BC5%	3	0.0019	
CM5%	3	0.0034	0.0034
CM3%	3		0.0043
BC3%	3		0.0047
CM1%	3		0.0049
ชุดควบคุม	3		0.0049
BC1%	3		0.0052
MIX5%	3		0.0052
MIX1%	3		0.0053
MIX3%	3		0.0054

ตารางที่ ข41 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
BC5%	3	0.0046			
BC3%	3	0.0079	0.0079		
BC1%	3		0.0114	0.0114	
CM3%	3			0.0135	0.0135
ชุดควบคุม	3			0.0136	0.0136
CM1%	3			0.0137	0.0137
CM5%	3			0.0151	0.0151
MIX5%	3			0.0169	0.0169
MIX1%	3				0.0172
MIX3%	3				0.0172

ตารางที่ ข42 การดูตติงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	0.0066				
BC3%	3	0.0107	0.0107			
BC1%	3		0.0144	0.0144		
MIX1%	3			0.0201	0.0201	
CM1%	3			0.0203	0.0203	
CM5%	3			0.0203	0.0203	
ชุดควบคุม	3			0.0104	0.0104	
CM3%	3				0.0250	0.0250
MIX3%	3				0.0263	0.0263
MIX5%	3					0.0207

ตารางที่ ข43 การดูตติงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือกากโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
BC5%	3	0.0065			
BC3%	3		0.0121		
BC1%	3		0.0146		
CM5%	3			0.0214	
CM3%	3			0.0216	
MIX1%	3			0.0228	
CM1%	3			0.0231	
MIX3%	3			0.0247	
ชุดควบคุม	3			0.0249	
MIX5%	3				0.0328

ตารางที่ ข44 การดูติดตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะระ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
BC5%	3	0.0033		
BC3%	3	0.0043	0.0043	
BC1%	3	0.0056	0.0056	0.0056
ชุดควบคุม	3		0.0060	0.0060
CM1%	3		0.0065	0.0065
MIX5%	3			0.0068
MIX1%	3			0.0070
CM3%	3			0.0070
CM5%	3			0.0072
MIX3%	3			0.0074

ตารางที่ ข45 การดูติดตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะระ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	0.0074				
BC3%	3		0.0111			
MIX1%	3			0.0139		
BC1%	3			0.0153	0.0153	
MIX5%	3			0.0155	0.0155	0.0155
ชุดควบคุม	3				0.0167	0.0167
CM1%	3				0.0171	0.0171
CM3%	3				0.0175	0.0175
CM5%	3					0.0179
MIX3%	3					0.0179

ตารางที่ ข46 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคระ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
BC5%	3	0.0110			
BC3%	3		0.0168		
MIX1%	3		0.0196	0.0196	
BC1%	3		0.0207	0.0207	
MIX5%	3		0.0209	0.0209	
CM1%	3			0.0222	0.0222
CM5%	3			0.0226	0.0226
CM3%	3			0.0228	0.0228
MIX3%	3			0.0229	0.0229
ชุดควบคุม	3				0.0264

ตารางที่ ข47 การดูที่ตั้งและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อต้นหญ้าเนเปียร์แคระ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	0.0118				
BC3%	3		0.0167			
BC1%	3		0.0194	0.0194		
MIX1%	3			0.0225	0.0225	
CM5%	3			0.0234	0.0234	
CM3%	3			0.0235	0.0235	
MIX3%	3			0.0239	0.0239	
CM1%	3			0.0243	0.0243	
MIX5%	3				0.0273	
ชุดควบคุม	3					0.0356

ตารางที่ ข48 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในอากาศโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
BC5%	3	0.0971	
CM3%	3	0.1627	0.1627
MIX5%	3	0.1640	0.1640
CM5%	3	0.1675	0.1675
BC3%	3	0.1680	0.1680
BC1%	3	0.1681	0.1681
CM1%	3		0.1778
MIX3%	3		0.1846
MIX1%	3		0.1916
ชุดควบคุม	3		0.1920

ตารางที่ ข49 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนืออากาศโลหกรรม (ลำต้นและใบ) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกในอากาศโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
BC5%	3	0.2333		
BC3%	3	0.3347		
BC1%	3	0.3916	0.3916	
ชุดควบคุม	3		0.5471	0.5471
CM1%	3		0.5494	0.5494
CM3%	3			0.5761
MIX3%	3			0.6108
MIX5%	3			0.6374
MIX1%	3			0.6384
CM5%	3			0.6886

ตารางที่ ข52 การดูตติงและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้านเปียร์แคะ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
BC5%	3	0.1456		
BC3%	3	0.1861	0.1861	
BC1%	3	0.1920	0.1920	
ชุดควบคุม	3		0.2493	0.2493
MIX1%	3		0.2726	0.2726
CM1%	3		0.2778	0.2778
MIX3%	3			0.2964
MIX5%	3			0.2994
CM5%	3			0.3117
CM3%	3			0.3162

ตารางที่ ข53 การดูตติงและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้านเปียร์แคะ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
BC5%	3	0.3370			
BC3%	3		0.4640		
BC1%	3		0.5027		
MIX1%	3			0.5905	
MIX3%	3				0.6750
MIX5%	3				0.6760
ชุดควบคุม	3				0.6795
CM1%	3				0.6970
CM3%	3				0.7052
CM5%	3				0.7205

ตารางที่ ข54 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
BC5%	3	0.5006				
BC1%	3		0.6966			
BC3%	3		0.72247	0.7224		
MIX1%	3			0.8204	0.8204	
CM5%	3				0.8679	
MIX5%	3				0.8771	
CM3%	3				0.8864	
MIX3%	3				0.8965	
ชุดควบคุม	3					1.0077
CM1%	3					1.0120

ตารางที่ ข55 การดูที่ตั้งและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ต่อดันหญ้าเนเปียร์แคะ
ที่ปลูกในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
BC5%	3	0.5509					
BC3%	3		0.8268				
BC1%	3		0.8553				
MIX1%	3			1.08323			
MIX5%	3				1.1494		
MIX3%	3				1.1518		
CM5%	3					1.2275	
CM3%	3						1.3305
CM1%	3						1.3307
ชุดควบคุม	3						1.3860

ตารางที่ ข56 การสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
MIX1%	3	60.23					
ชุดควบคุม	3		61.60				
CM1%	3		61.68				
CM3%	3		62.92	62.92			
MIX3%	3			63.23	63.23		
BC5%	3			64.10	64.10	64.10	
CM5%	3			64.16	64.16	64.16	
MIX5%	3				64.32	64.32	
BC1%	3					64.72	64.72
BC3%	3						65.73

ตารางที่ ข57 การสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดควบคุม	3	59.74		
MIX1%	3	59.96	59.96	
CM1%	3	60.05	60.05	
CM3%	3	61.80	61.80	61.80
BC1%	3	62.22	62.22	62.22
MIX3%	3		62.47	62.47
CM5%	3			63.31
BC5%	3			63.61
MIX5%	3			64.19
BC3%	3			64.20

ตารางที่ ข58 การสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
ชุดควบคุม	3	59.00				
MIX1%	3	59.14				
CM1%	3	59.86	59.86			
CM3%	3		61.01	61.01		
BC1%	3		61.30	61.30		
MIX3%	3			62.00	62.00	
CM5%	3			62.61	62.61	62.61
BC3%	3					63.30
MIX5%	3					63.71
BC5%	3					64.03

ตารางที่ ข59 การสะสมสารหนูในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 120

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
ชุดควบคุม	3	58.02				
MIX1%	3	58.79	58.79			
CM1%	3	59.00	59.00			
BC1%	3		60.51	60.51		
CM3%	3		60.77	60.77	60.77	
MIX3%	3			61.85	61.85	61.85
BC3%	3			62.09	62.09	62.09
CM5%	3			62.50	62.50	62.50
MIX5%	3				63.00	63.00
BC5%	3					63.71

ตารางที่ ข60 การสะสมแมงกานีสในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
MIX5%	3	871.00		
BC5%	3	877.33	877.33	
CM1%	3	890.33	890.33	890.33
ชุดควบคุม	3	891.00	891.00	891.00
MIX3%	3	891.33	891.33	891.33
CM5%	3	896.67	896.67	896.67
BC3%	3	907.67	907.67	907.67
CM1%	3		922.00	922.00
CM3%	3			926.67
MIX1%	3			926.67

ตารางที่ ข61 การสะสมแมงกานีสในกากโลหะกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
MIX3%	3	850.00		
ชุดควบคุม	3	859.33	859.33	
MX1%	3	864.33	864.33	864.33
MIX5%	3	867.00	867.00	867.00
BC5%	3	874.33	874.33	874.33
BC1%	3		882.33	882.33
CM5%	3		885.33	885.33
CM3%	3			892.00
BC3%	3			894.67
CM1%	3			895.33

ตารางที่ ข62 การสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 90

Duncan^a





ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
ชุดควบคุม	3	832.67		
MIX3%	3	839.00	839.00	
MIX5%	3	851.00	851.00	851.00
MIX1%	3	853.00	853.00	853.00
CM5%	3	855.00	855.00	855.00
BC3%	3		860.00	860.00
CM3%	3		862.00	862.00
BC1%	3		865.33	865.33
BC5%	3			870.67
CM1%	3			876.33

ตารางที่ ข63 การสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพที่อัตราต่าง ๆ
วันที่ 120













Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
ชุดควบคุม	3	815.67				
CM3%	3	821.33				
CM1%	3	827.33	827.33			
CM5%	3		836.67	836.67		
MIX1%	3		838.33	838.33		
MIX3%	3		840.33	840.33		
MIX5%	3			844.00	844.00	
BC1%	3			847.00	847.00	
BC3%	3				857.00	857.00
BC5%	3					861.67













ภาคผนวก ค
การแสดงความเสียหายของหญ้าเนเปียร์แคระ

			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม			



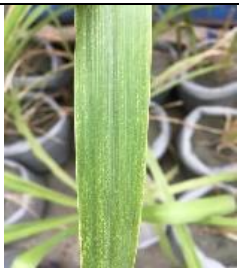









รูปที่ ค1 การแสดงความเสียหายของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในกากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู
และแมงกานีส ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง

			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกในอัตรา 1%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกในอัตรา 3%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกในอัตรา 5%			

รูปที่ ค2 ผลของการเติมปุ๋ยคอกต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะที่ปลูกใน
 กากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู และแมงกานีส ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง

			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 1%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 3%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5%			

รูปที่ ค3 ผลของการเติมถ่านชีวภาพต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกใน
 กากโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู และแมงกานีส ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง

			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 3%			
			
30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดการทดลองเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 5%			

รูปที่ ค4 ผลของการเติมปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ
ที่ปลูกในภาคโลหกรรมที่ปนเปื้อนสารหนู และแมงกานีส ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง

ภาคผนวก ง
ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ง1 ค่าความเป็นกรด-ด่างในกากโภชนาการที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

ชุดการทดลอง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH)				
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	7.68±0.01 ^e	7.70±0.02 ^f	7.72±0.01 ^d	7.73±0.03 ^{bc}	7.74±0.01 ^b
ชุดการทดลอง ที่เติมปุ๋ยคอก					
1%	7.82±0.02 ^{cd}	7.77±0.03 ^{de}	7.65±0.01 ^f	7.59±0.02 ^e	7.24±0.01 ^f
3%	7.81±0.05 ^{cd}	7.78±0.03 ^{de}	7.68±0.02 ^e	7.52±0.02 ^f	7.17±0.04 ^g
5%	7.78±0.03 ^d	7.67±0.02 ^f	7.50±0.03 ^f	7.33±0.01 ^g	7.10±0.01 ^h
ชุดการทดลอง ที่เติมถ่านชีวภาพ					
1%	7.85±0.01 ^{cd}	7.79±0.02 ^d	7.74±0.02 ^d	7.71±0.01 ^c	7.68±0.01 ^c
3%	7.87±0.02 ^c	7.86±0.01 ^c	7.79±0.01 ^c	7.73±0.05 ^{bc}	7.70±0.04 ^c
5%	8.11±0.02 ^a	8.05±0.01 ^a	7.98±0.01 ^a	7.89±0.01 ^a	7.84±0.01 ^a
ชุดการทดลองที่เติม ปุ๋ยคอกร่วมกับ ถ่านชีวภาพ					
1%	7.80±0.04 ^{cd}	7.75±0.01 ^e	7.66±0.02 ^{ef}	7.57±0.01 ^e	7.45±0.03 ^e
3%	7.84±0.06 ^{cd}	7.80±0.01 ^d	7.74±0.02 ^d	7.65±0.02 ^d	7.52±0.02 ^d
5%	7.98±0.06 ^b	7.93±0.03 ^b	7.88±0.02 ^b	7.76±0.02 ^b	7.71±0.02 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ๓2 ค่าการนำไฟฟ้าในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

ชุดการทดลอง	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร				
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
	ชุดควบคุม	1651.16±34.93 ^h	1261.33±28.12 ^g	1108.82±25.15 ^g	1048.82±12.91 ^h
ชุดการทดลองที่ เติมปุ๋ยคอก					
1%	2117.21±15.42 ^d	1976.00±18.73 ^b	1896.56±20.97 ^c	1551.38±22.72 ^d	1498.67±11.93 ^{de}
3%	2292.20±36.67 ^b	2000.00±20.09 ^b	1957.30±38.15 ^b	1714.97±21.70 ^c	1646.00±36.50 ^c
5%	2422.45±11.53 ^a	2265.33±15.50 ^a	2106.77±18.73 ^a	1918.44±19.36 ^a	1891.67±31.34 ^a
ชุดการทดลองที่ เติมถ่านชีวภาพ					
1%	1873.03±13.71 ^g	1575.67±14.50 ^f	1500.22±32.72 ^f	1450.58±33.18 ^f	1194.33±23.50 ^h
3%	1984.48±13.40 ^f	1742.67±24.42 ^d	1643.85±34.65 ^e	1612.55±14.51 ^d	1473.33±29.26 ^e
5%	2025.19±11.86 ^e	1915.33±20.55 ^c	1805.41±24.79 ^d	1804.71±25.56 ^b	1715.67±35.34 ^b
ชุดการทดลองที่ เติมปุ๋ยคอก ร่วมกับถ่าน ชีวภาพ					
1%	1965.73±11.60 ^f	1661.74±34.81 ^e	1451.00±28.85 ^f	1321.62±28.37 ^g	1260.00±15.00 ^g
3%	2102.79±17.78 ^d	1875.67±24.58 ^c	1794.59±38.28 ^d	1488.47±29.87 ^f	1409.50±24.50 ^f
5%	2233.29±16.13 ^c	1987.33±28.92 ^b	1875.15±24.21 ^c	1680.34±42.21 ^c	1541.01±24.51 ^d

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 3 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในกากโลหกรรมที่มีการเติมปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

ชุดการทดลอง	ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) (มิลลิโวลต์; mV)				
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
	ชุดควบคุม	271.00±5.57 ^f	263.63±4.05 ^f	250.90±3.44 ^f	250.83±1.15 ^e
ชุดการทดลองที่เติม					
ปุ๋ยคอก					
1%	286.27±2.90 ^{cd}	277.17±3.36 ^{cd}	262.13±2.20 ^d	252.40±1.40 ^{de}	234.03±1.00 ^f
3%	292.03±1.86 ^{bc}	280.37±1.96 ^c	269.67±2.48 ^c	248.00±1.00 ^f	235.43±0.60 ^f
5%	299.27±6.93 ^b	289.23±6.68 ^b	275.90±0.10 ^b	241.00±2.00 ^h	236.00±1.00 ^f
ชุดการทดลองที่เติม					
ถ่านชีวภาพ					
1%	278.97±2.35 ^{de}	250.37±6.12 ^g	248.50±0.56 ^f	247.50±1.00 ^f	245.50±2.50 ^{cd}
3%	290.83±5.66 ^c	281.33±5.81 ^{bc}	271.33±1.53 ^c	262.00±1.00 ^b	242.13±0.85 ^e
5%	309.20±2.21 ^a	299.23±2.27 ^a	287.00±1.00 ^a	268.00±2.00 ^a	248.47±1.50 ^b
ชุดการทดลองที่เติม					
ปุ๋ยคอกร่วมกับ					
ถ่านชีวภาพ					
1%	276.60±4.35 ^{ef}	264.63±5.83 ^{ef}	256.23±0.02 ^e	7.57±1.36 ^g	273.23±1.08 ^{bc}
3%	283.40±3.29 ^{de}	282.90±3.22 ^{de}	265.13±0.02 ^d	7.65±1.82 ^{cd}	244.77±0.68 ^d
5%	292.80±2.20 ^{bc}	263.63±2.05 ^{bc}	271.20±0.02 ^c	7.76±0.92 ^c	254.30±0.89 ^a

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตาราง ง4 มวลชีวภาพ (น้ำหนักแห้ง) ในส่วนรากของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	มวลชีวภาพ (กรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	1.42±0.28 ^c	3.74±0.48 ^e	5.37±0.58 ^g	6.84±0.21 ^h
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	1.70±0.57 ^{bc}	5.06±0.71 ^c	7.10±3.36 ^{def}	8.53±3.21 ^f
3%	2.15±0.04 ^{abc}	5.61±0.36 ^b	8.07±1.36 ^{cd}	9.69±1.60 ^d
5%	2.61±0.82 ^a	6.70±1.54 ^a	9.21±1.12 ^{ab}	11.06±2.08 ^b
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	1.56±0.54 ^{bc}	4.37±0.32 ^d	6.44±1.10 ^{ef}	8.42±0.12 ^f
3%	1.62±0.31 ^{bc}	4.42±1.29 ^d	7.48±1.24 ^{de}	9.15±0.29 ^e
5%	1.47±0.76 ^c	3.69±0.39 ^e	6.23±0.32 ^{fg}	7.55±0.47 ^g
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	1.87±0.35 ^{bc}	4.38±0.08 ^d	6.93±0.06 ^{ef}	8.23±0.22 ^f
3%	2.26±0.47 ^{ab}	5.87±0.04 ^b	8.74±1.06 ^{bc}	10.35±0.07 ^c
5%	2.76±0.11 ^a	6.75±0.24 ^a	9.85±0.62 ^a	13.53±0.45 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 5 มวลชีวภาพ (น้ำหนักแห้ง) ในส่วนลำต้นและใบของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	มวลชีวภาพ (กรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	2.23±4.12 ^a	5.89±4.44 ^e	8.75±2.95 ^f	10.27±1.63 ^g
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	2.31±3.29 ^a	7.51±2.03 ^{de}	13.05±1.66 ^{de}	18.24±3.39 ^e
3%	2.31±1.53 ^a	8.53±2.23 ^{cde}	17.77±2.20 ^c	22.28±4.41 ^d
5%	2.77±2.70 ^a	12.85±2.77 ^{ab}	23.37±0.97 ^b	29.33±3.94 ^b
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	2.53±1.59 ^a	5.80±1.94 ^e	10.08±1.33 ^{ef}	13.53±1.28 ^f
3%	2.77±1.33 ^a	5.72±1.19 ^e	10.66±2.72 ^{def}	14.91±0.97 ^f
5%	2.10±5.13 ^a	5.64±0.93 ^e	9.21±1.90 ^f	12.57±1.80 ^{fg}
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	2.70±1.49 ^a	9.91±2.94 ^{abc}	13.79±1.80 ^d	19.79±1.09 ^e
3%	2.96±1.89 ^a	10.80±1.32 ^{bc}	21.33±2.10 ^b	26.04±1.42 ^c
5%	3.19±0.91 ^a	14.01±4.30 ^a	29.18±2.65 ^a	39.33±1.92 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 6 การดูดซับและสะสมสารหนูในส่วนเนื้ออกาโลทกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดซับและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	2.21±0.02 ^a	2.29±0.09 ^a	2.34±0.10 ^a	2.43±0.19 ^a
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	2.13±0.10 ^{ab}	1.81±0.07 ^c	1.57±0.09 ^b	1.27±0.05 ^b
3%	1.87±0.01 ^{cde}	1.58±0.08 ^e	1.41±0.18 ^b	0.97±0.13 ^{cd}
5%	1.22±0.03 ^s	1.17±0.02 ^s	0.87±0.13 ^{de}	0.74±0.07 ^e
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	2.06±0.06 ^{abc}	1.97±0.09 ^b	1.43±0.10 ^b	1.08±0.19 ^c
3%	1.67±0.19 ^{ef}	1.38±0.14 ^f	1.00±0.06 ^d	0.81±0.09 ^{de}
5%	0.94±0.12 ^h	0.81±0.04 ^h	0.72±0.04 ^e	0.52±0.05 ^f
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	1.95±0.05 ^{bcd}	1.73±0.04 ^{cd}	1.44±0.07 ^b	1.15±0.03 ^c
3%	1.83±0.13 ^{de}	1.60±0.07 ^{de}	1.22±0.10 ^c	0.95±0.02 ^{cd}
5%	1.60±0.22 ^f	1.21±0.07 ^s	0.96±0.06 ^e	0.83±0.06 ^{de}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 7 การดูดซับและสะสมสารหนูในส่วนใต้กากโลหกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดซับและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	4.24±0.03 ^a	4.59±0.13 ^a	4.89±0.14 ^a	5.10±0.08 ^a
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	3.83±0.06 ^b	3.38±0.32 ^{bc}	3.13±0.20 ^{bc}	2.85±0.16 ^b
3%	3.24±0.30 ^c	3.12±0.10 ^c	2.83±0.13 ^{cd}	2.43±0.08 ^c
5%	2.75±0.02 ^d	2.67±0.15 ^d	2.44±0.43 ^{ef}	2.11±0.15 ^{de}
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	3.63±0.33 ^{bc}	3.49±0.42 ^b	3.23±0.08 ^b	2.31±0.10 ^{cd}
3%	2.65±0.34 ^{de}	2.50±0.10 ^{de}	2.25±0.26 ^f	1.84±0.22 ^e
5%	2.23±0.23 ^f	2.00±0.06 ^f	1.77±0.16 ^g	1.57±0.13 ^f
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	3.71±0.11 ^b	3.17±0.04 ^{bc}	2.83±0.13 ^{cd}	2.74±0.30 ^b
3%	3.22±0.26 ^c	3.06±0.09 ^c	2.61±0.02 ^{de}	2.31±0.16 ^{cd}
5%	2.47±0.31 ^{de}	2.30±0.18 ^{ef}	2.12±0.09 ^f	2.02±0.02 ^{de}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 8 การดูดซับและสะสมแมงกานีสส่วนเนื้อจากโกลทกรรม (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดซับและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	86.00±4.12 ^a	92.91±4.44 ^a	103.83±2.95 ^a	112.86±1.63 ^a
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	76.48±3.29 ^b	73.20±2.03 ^b	70.15±1.66 ^b	91.76±3.39 ^b
3%	70.33±1.53 ^c	67.57±2.23 ^c	53.10±2.20 ^e	80.89±4.41 ^c
5%	60.05±2.70 ^e	53.42±2.77 ^e	58.32±0.97 ^d	65.50±3.94 ^e
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	66.28±1.59 ^{cd}	67.58±1.94 ^c	63.79±1.33 ^c	58.67±1.28 ^f
3%	60.63±1.33 ^e	58.64±1.19 ^d	50.58±2.72 ^e	47.83±0.97 ^h
5%	45.54±5.13 ^g	41.35±0.93 ^f	36.37±1.90 ^g	31.00±1.80 ⁱ
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	70.85±1.49 ^c	65.25±2.94 ^c	60.72±1.80 ^{cd}	72.54±1.09 ^d
3%	62.35±1.89 ^{de}	56.73±1.32 ^{de}	52.30±2.10 ^e	60.97±1.42 ^f
5%	51.28±0.91 ^f	45.59±4.30 ^f	41.42±2.65 ^f	52.85±1.92 ^g

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 9 การดูตึงและสะสมแมงกานีสส่วนใต้กาลโลกกรรม (ราก) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูตึงและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	172.87±2.39 ^a	181.62±1.11 ^a	187.83±3.53 ^a	202.53±1.60 ^a
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	162.59±2.87 ^b	137.86±1.86 ^b	142.48±1.61 ^b	156.00±2.12 ^b
3%	147.00±2.00 ^c	125.57±4.12 ^c	109.82±2.84 ^d	137.38±0.13 ^c
5%	119.38±1.50 ^f	107.50±2.03 ^e	94.28±1.48 ^f	110.99±1.43 ^e
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	125.80±3.22 ^e	114.9±1.66 ^d	108.13±1.30 ^d	101.67±2.92 ^f
3%	114.78±2.55 ^g	104.90±3.07 ^e	96.25±3.66 ^f	90.33±1.04 ^g
5%	99.54±2.73 ^h	91.35±1.80 ^g	80.37±0.85 ^h	73.05±2.60 ⁱ
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่าน				
ชีวภาพ				
1%	145.52±2.74 ^c	134.91±2.87 ^b	118.39±2.43 ^c	131.61±1.21 ^d
3%	131.01±3.86 ^d	115.07±2.49 ^d	102.64±1.34 ^e	111.30±3.77 ^e
5%	110.87±2.32 ^g	100.26±1.22 ^f	89.08±1.61 ^g	85.00±2.41 ^h

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 10 ปริมาณการสะสมสารหนูเฉลี่ยต่อต้น (ราก) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดซับและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	0.0060±0.0012 ^{ab}	0.0167±0.0022 ^{ab}	0.0264±0.0003 ^a	0.0356±0.0010 ^a
ชุดการทดลองที่ เติมปุ๋ยคอก				
1%	0.0065±0.0012 ^{ab}	0.0171±0.0019 ^{ab}	0.0223±0.0013 ^{ab}	0.0243±0.0011 ^{bc}
3%	0.0070±0.0004 ^{ab}	0.0175±0.0010 ^{ab}	0.0228±0.0013 ^{ab}	0.0235±0.0076 ^{bc}
5%	0.0072±0.0019 ^a	0.0179±0.0014 ^a	0.0226±0.0053 ^{ab}	0.0234±0.0014 ^{bc}
ชุดการทดลองที่ เติมถ่านชีวภาพ				
1%	0.0056±0.0012 ^{abc}	0.0153±0.0018 ^{bc}	0.0207±0.0025 ^{bc}	0.0194±0.0006 ^{cd}
3%	0.0043±0.0022 ^{bc}	0.0111±0.0006 ^d	0.0168±0.0026 ^c	0.0168±0.0009 ^d
5%	0.0033±0.0009 ^c	0.0074±0.0008 ^e	0.0110±0.0013 ^d	0.0118±0.0032 ^e
ชุดการทดลองที่ เติมปุ๋ยคอกร่วมกับ ถ่านชีวภาพ				
1%	0.0070±0.0015 ^{ab}	0.0139±0.0004 ^c	0.0196±0.0008 ^{bc}	0.0225±0.0019 ^{bc}
3%	0.0068±0.0022 ^a	0.0179±0.0004 ^a	0.0229±0.0028 ^{ab}	0.0239±0.0019 ^{bc}
5%	0.0060±0.0009 ^{ab}	0.0155±0.0016 ^{abc}	0.0209±0.0021 ^{bc}	0.0273±0.0011 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 11 ปริมาณการสะสมสารหนูเฉลี่ยต่อต้น (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	0.0049±0.0007 ^b	0.0135±0.0017 ^{ab}	0.0204±0.0012 ^{bc}	0.0250±0.0003 ^b
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	0.0049±0.0010 ^a	0.0137±0.0018 ^{ab}	0.0204±0.0046 ^{bc}	0.0230±0.0031 ^b
3%	0.0043±0.0001 ^a	0.0135±0.0008 ^{ab}	0.0250±0.0027 ^{ab}	0.0216±0.0027 ^b
5%	0.0034±0.0011 ^{ab}	0.0151±0.0018 ^{ab}	0.0203±0.0035 ^{bc}	0.0214±0.0063 ^b
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.0052±0.0021 ^a	0.0114±0.0032 ^{bc}	0.0144±0.0007 ^{cd}	0.0146±0.0024 ^c
3%	0.0047±0.0011 ^a	0.0079±0.0020 ^{cd}	0.0107±0.0019 ^{de}	0.0121±0.0038 ^c
5%	0.0019±0.0006 ^a	0.0046±0.0005 ^d	0.0066±0.0003 ^e	0.0065±0.0005 ^d
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับ				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.0053±0.0015 ^a	0.0171±0.0004 ^a	0.0200±0.0008 ^{bc}	0.0227±0.0019 ^b
3%	0.0054±0.0022 ^a	0.0172±0.0004 ^a	0.0262±0.0028 ^{ab}	0.0247±0.0019 ^b
5%	0.0052±0.0009 ^a	0.0169±0.0016 ^{ab}	0.0281±0.0021 ^a	0.0328±0.0011 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 12 ปริมาณการสะสมแมงกานีสเฉลี่ยต่อต้น (ราก) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	0.2492±0.0041 ^{ab}	0.6795±0.1176 ^a	1.0078±0.0192 ^a	1.3860±0.0402 ^a
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	0.2778±0.0588 ^{ab}	0.6970±0.0470 ^a	1.0121±0.0093 ^a	1.3307±0.0329 ^a
3%	0.3162±0.0232 ^a	0.7052±0.0454 ^a	0.8864±0.0138 ^a	1.3305±0.0200 ^a
5%	0.3117±0.0819 ^a	0.7205±0.0155 ^a	0.8679±0.0375 ^b	1.2275±0.0157 ^b
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.1920±0.0402 ^{bc}	0.5027±0.0204 ^c	0.6967±0.0998 ^d	0.8553±0.0191 ^e
3%	0.1861±0.0560 ^{bc}	0.4640±0.0141 ^c	0.7224±0.1127 ^{cd}	0.8267±0.0588 ^e
5%	0.1456±0.0437 ^c	0.3370±0.0350 ^d	0.5006±0.0311 ^e	0.5509±0.0060 ^f
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับ				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.0053±0.0530 ^{ab}	0.0171±0.0080 ^b	0.0200±0.0112 ^{bc}	0.0227±0.0373 ^d
3%	0.0054±0.0652 ^a	0.0172±0.0123 ^a	0.0262±0.0961 ^b	0.0247±0.0317 ^c
5%	0.0052±0.0123 ^a	0.0169±0.0161 ^a	0.0281±0.0554 ^b	0.0328±0.0410 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 13 ปริมาณการสะสมแมงกานีสเฉลี่ยต่อต้น (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์

ชุดการทดลอง	การดูดตั้งและสะสมสารหนูในพืช (มิลลิกรัม)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	0.1920±0.0297 ^a	0.5472±0.0441 ^{ab}	0.9078±0.0589 ^{cd}	1.1591±0.0402 ^e
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	0.1681±0.0516 ^a	0.3916±0.0453 ^{ab}	0.6441±0.2336 ^{dd}	0.7936±0.2532 ^{cd}
3%	0.1680±0.0062 ^{ab}	0.3348±0.0129 ^a	0.5375±0.0585 ^{cd}	0.7133±0.2231 ^{bd}
5%	0.0971±0.0552 ^{ab}	0.2333±0.1153 ^a	0.3352±0.0874 ^a	0.3898±0.2020 ^{ab}
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.1920±0.0378 ^{ab}	0.5027±0.0134 ^{bc}	0.6967±0.0830 ^e	0.8553±0.0130 ^f
3%	0.1861±0.0157 ^{ab}	0.4640±0.0713 ^c	0.7224±0.0480 ^e	0.8267±0.0183 ^f
5%	0.1456±0.0439 ^b	0.3370±0.0187 ^c	0.5006±0.0296 ^f	0.5509±0.0226 ^g
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับ				
ถ่านชีวภาพ				
1%	0.1916±0.0435 ^a	0.6384±0.2424 ^a	0.8375±0.0411 ^d	1.4356±0.0261 ^d
3%	0.1846±0.0054 ^a	0.6108±0.1116 ^a	1.1121±0.1293 ^{bc}	1.5865±0.0248 ^{cd}
5%	0.1640±0.0563 ^{ab}	0.6374±0.0400 ^a	1.2107±0.1748 ^{ab}	2.0803±0.1515 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ง14 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ชุดการทดลอง	การเจริญเติบโตสัมพัทธ์			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	0.051±0.003	0.042±0.001	0.032±0.000	0.026±0.000
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	0.057±0.001	0.046±0.001	0.036±0.002	0.029±0.000
3%	0.058±0.000	0.048±0.001	0.039±0.001	0.031±0.000
5%	0.064±0.001	0.053±0.001	0.041±0.001	0.033±0.000
ชุดการทดลองที่เติมถ่าน				
ชีวภาพ				
1%	0.056±0.002	0.042±0.000	0.034±0.001	0.028±0.000
3%	0.058±0.0002	0.042±0.002	0.035±0.000	0.028±0.000
5%	0.056±0.0009	0.041±0.001	0.033±0.000	0.027±0.000
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	0.060±0.007	0.048±0.005	0.041±0.000	0.030±0.000
3%	0.064±0.003	0.051±0.002	0.036±0.002	0.032±0.000
5%	0.068±0.004	0.054±0.000	0.040±0.001	0.035±0.000

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ง15 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย และอัตราการย่อยสลายของปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพ

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120วัน
เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (%)				
ปุ๋ยคอก	18.06±2.22	44.20±2.15	68.26±1.97	78.83±1.46
ถ่านชีวภาพ	2.60±1.44	6.47±3.39	9.60±2.46	10.43±3.51
อัตราการย่อยสลาย				
ปุ๋ยคอก	0.0067±0.007	0.0097±0.009	0.0128±0.008	0.0130±0.013
ถ่านชีวภาพ	0.0009±0.005	0.0011±0.011	0.0011±0.002	0.0009±0.009

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน



ตารางที่ 16 ปริมาณคลอโรฟิลล์

ชุดการทดลอง	ปริมาณคลอโรฟิลล์ (mg g^{-1} FW)			
	30 วัน	60 วัน	90 วัน	120 วัน
ชุดควบคุม	1.43±0.08	1.24±0.06	0.79±0.04	0.58±0.05
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอก				
1%	2.29±0.05	2.22±0.09	2.29±0.08	2.75±0.09
3%	2.43±0.06	2.52±0.02	2.82±0.03	3.12±0.03
5%	2.69±0.04	2.92±0.06	3.15±0.09	3.34±0.08
ชุดการทดลองที่เติม				
ถ่านชีวภาพ				
1%	1.48±0.07	1.44±0.03	1.26±0.05	1.05±0.05
3%	1.46±0.08	1.40±0.06	1.32±0.07	1.15±0.02
5%	1.53±0.06	1.42±0.03	1.11±0.06	0.97±0.06
ชุดการทดลองที่เติม				
ปุ๋ยคอกร่วมกับถ่านชีวภาพ				
1%	2.18±0.09	2.00±0.10	1.90±0.08	1.75±0.04
3%	2.71±0.08	2.85±0.05	3.12±0.03	3.67±0.07
5%	2.95±0.04	3.22±0.07	3.89±0.11	4.32±0.09

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ 17 สมดุลมวลของสารหนู (Mass balance) ในการทดลอง

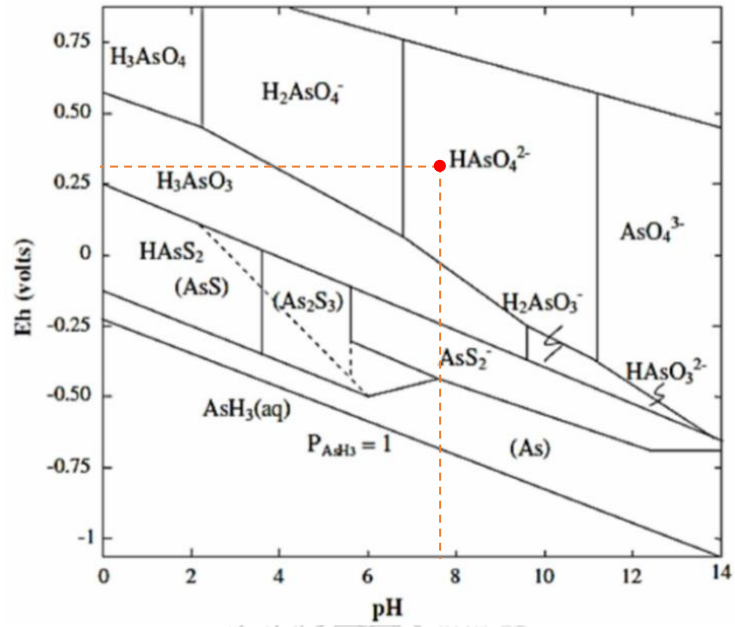
ชุด การทดลอง	ปริมาณ สารหนูเริ่มต้น (mg)	ปริมาณสารหนูในหย้าเนเปียร์แคระ (mg)			ปริมาณ สารหนู คองเกลือ ในกาก โลหะกรรม (mg)	ปริมาณสารหนูในหย้าเนเปียร์แคระ (%)			ปริมาณ สารหนู คองเกลือ ในกาก โลหะกรรม (%)	รวมปริมาณ สารหนู ทั้งหมด ในระบบ (%)
		ส่วน เหนือกาก โลหะกรรม (ลำต้นและใบ)	ส่วน ใต้กาก โลหะกรรม (ราก)	รวม ทั้งต้น		ส่วน เหนือกาก โลหะกรรม (ลำต้นและใบ)	ส่วน ใต้กาก โลหะกรรม (ราก)	รวม ทั้งต้น		
ชุดควบคุม	337.59	0.0250	0.0356	0.0606	288.06	0.0083	0.0117	0.02	85.33	85.35
CM1%	337.59	0.0230	0.0243	0.0473	292.93	0.0049	0.0051	0.01	86.77	86.78
CM3%	337.59	0.0216	0.0235	0.0451	301.68	0.0096	0.0104	0.02	89.36	89.38
CM5%	337.59	0.0214	0.0234	0.0448	310.30	0.0048	0.0052	0.01	91.92	91.93
BC1%	337.59	0.0146	0.0194	0.0340	300.41	0.0043	0.0057	0.01	88.99	89.00
BC3%	337.59	0.0121	0.0168	0.0288	308.25	0.0042	0.0058	0.01	91.31	91.32
BC5%	337.59	0.0065	0.0119	0.0184	316.29	0.0035	0.0065	0.01	93.69	93.70
MIX1%	337.59	0.0227	0.0225	0.0453	291.85	0.0050	0.0050	0.01	86.45	86.46
MIX3%	337.59	0.0247	0.0239	0.0486	307.08	0.0102	0.0098	0.02	90.96	90.98
MIX5%	337.59	0.0328	0.0273	0.0601	312.79	0.0109	0.0091	0.02	92.65	92.67

ตารางที่ 18 สมดุลมวลของแอมกานีส (Mass balance) ในการทดลอง

ชุด การทดลอง	ปริมาณ แอมกานีส เริ่มต้น (mg)	ปริมาณแอมกานีสในหย้าเนเปียร์แคระ (mg)			ปริมาณ แอมกานีส รวม ทั้งต้น โททกรรม (ราก) (ราก)	ปริมาณแอมกานีสในหย้าเนเปียร์แคระ (%)	ปริมาณ แอมกานีส คงเหลือ ในกาก โททกรรม (%)	รวมปริมาณ แอมกานีส ทั้งหมด ในระบบ (%)		
		ส่วน เหนือกาก โททกรรม (ลำต้นและใบ)	ส่วน ใต้กาก โททกรรม (ราก)	ส่วน เห็นอก โททกรรม (ลำต้นและใบ)						
ชุดควบคุม	4,757.72	1.1591	1.3860	2.5451	4049.46	0.0244	0.0291	0.05	85.11	85.17
CM1%	4,757.74	1.6686	1.3307	2.9994	4148.75	0.0351	0.0280	0.06	87.20	87.26
CM3%	4,757.77	1.8064	1.3305	3.1369	4200.79	0.0380	0.0280	0.07	88.29	88.36
CM5%	4,757.80	1.9227	1.2275	3.1502	4362.88	0.0404	0.0258	0.07	91.70	91.77
BC1%	4,757.72	0.7936	0.8553	1.6489	4247.37	0.0167	0.0180	0.03	89.27	89.31
BC3%	4,757.72	0.7133	0.8267	1.5401	4383.21	0.0150	0.0174	0.03	92.13	92.16
BC5%	4,757.72	0.3898	0.5509	0.9408	4493.25	0.0082	0.0116	0.02	94.44	94.46
MIX1%	4,757.73	1.4356	1.0833	2.5188	4203.91	0.0302	0.0228	0.05	88.36	88.41
MIX3%	4,757.75	1.5865	1.1518	2.7383	4297.97	0.0333	0.0242	0.06	90.34	90.39
MIX5%	4,757.76	2.0803	1.1495	3.2297	4401.12	0.0437	0.0242	0.07	92.50	92.57

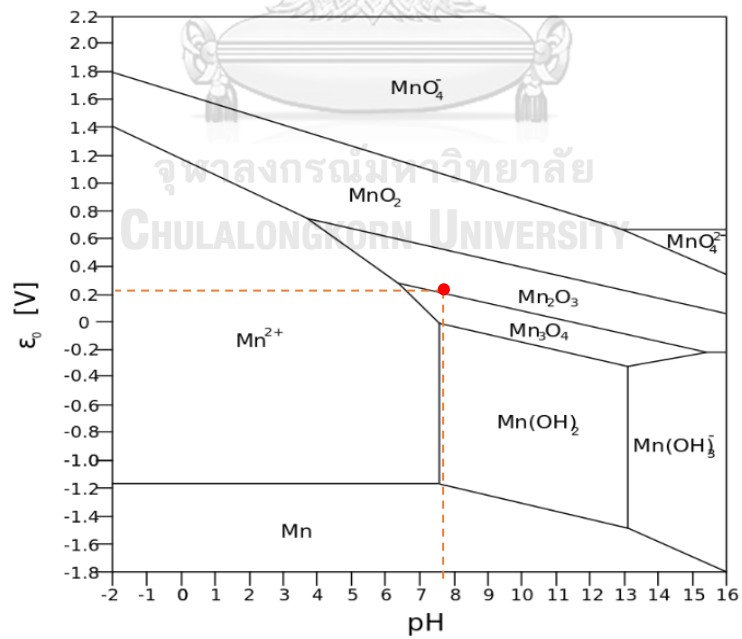
ภาคผนวก จ

ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนู และแมงกานีส



รูปที่ จ1 ก) ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนู

ที่มา: Ferguson et al. (1972)



รูปที่ จ1 ข) ไดอะแกรม Eh-pH ของแมงกานีส

ที่มา: Freitas et al. (2013)

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2553). การดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีการทางชีวภาพ (*Biosorption of heavy metals*). กรุงเทพมหานคร: สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2561). เหมืองแร่ทองคำ. Retrieved from <http://www.dpim.go.th>
- กระทรวงสาธารณสุข. (2558). แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงกรณีเหมืองแร่ทองคำ. Retrieved from http://enhealthplan.anamai.moph.go.th/ewt_news.php?nid=28&filename=index
- กัลย์สุตา ปิ่นพา. (2557). ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไกรลาศ เขียวทอง. (2560). คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1. Retrieved from http://extension.dld.go.th/th1/images/stories/cattle_buff_bord/napiagrass.pdf
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2544). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คำหล้า นันทวงศ์. (2555). ผลของกรดไนตริกไลอะซีติก (เอ็นทีเอ) และกรดเอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติก (เอ็นทีเอ) ต่อการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในดินด้วยไมยราบ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จำลอง ปินดาวงค์ อานนท์ นนทโส และสถาพร กาวินทร. (2554). แนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรแร่แมงกานีส. กรุงเทพมหานคร: สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี.
- จุฬาลักษณ์ ชาญกุล. (2551). โลหะหนักและศักยภาพในการทำให้เกิดน้ำทิ้งสภาวะกรดจากของทิ้งจากเหมืองแร่บริเวณพื้นที่เหมืองแร่ทองคำอัครา จังหวัดพิจิตร. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจษฎา เหลืองแจ่ม. (2527). กระถินยักษ์. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการป่าไม้ กองบำรุง กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.
- ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2540). สารานุกรมธาตุ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

- ชีโนรส ศรีศิริ และนักรบ กลัดกลีบ. (2556). การประเมินศักยภาพพืชพลังงาน 7 สายพันธุ์ เพื่อการผลิต ก๊าซชีวภาพ. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้,
- ณัชชา บุรณสงฆ์. (2558). ญัฎาพลังงาน: ญัฎาเนเปียร้. Retrieved from [http://www.parliament/ goth](http://www.parliament.go.th)
- ดำรง ลีนาบุรีกษ์. (2522). การผลิตญัฎาแห้งเพื่อเลี้ยงโค กระบือจากญัฎาเนเปียร้. งานวิจัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ธงชัย มาลา. (2546). ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ัญญาภรณ์ สุรภักดี. (2553). ผลกระทบกรณีเหมืองแร่กับมาตรา 67: โอกาสทองของการเรียนรู้. Retrieved from <http://www.publicconsultation.opm.go.th/rubfung67/doc37.pdf>
- นวรรตน์ อุดมประเสริฐ. (2558). สรีรวิทยาของพืชภายใต้สภาวะเครียด. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นัยนันท์ อริยกานนท์. (2558). การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประณต มณีอินทร์ และปติพงษ์ โตบันลือภาพ. (2558). ผลของระยะเวลาตัดญัฎาเนเปียร้ ต่อผลผลิต องค์ประกอบทางเคมีและผลิตภาพก๊าซชีวภาพ. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53: สาขาพืช, สาขาสัตว, สาขาสัตวพืชศาสตร์, สาขาส่งเสริม การเกษตร และคหกรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 703-710.
- พนัส พงศ์ผลาดิสัย. (2553). ผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของข้าวที่ปลูก ในดินปนเปื้อน จากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สห สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- พรพิมล สุริยภัทร. (2552). โรคพืชที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต. Retrieved from [http://cyberlab.lh1. ku.ac.th/elearn/faculty/forest/fo27/web/lec5.htm](http://cyberlab.lh1.ku.ac.th/elearn/faculty/forest/fo27/web/lec5.htm)
- พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2558). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานครสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์. (2560). การพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายในเขตเงาฝนด้วยถ่าน ชีวภาพ. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, 12(3), 27-38.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. (2547). ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ. กรุงเทพมหานคร: โอ เอส พรินติง เฮ้าส์.

- วิโรจน์ ขยันหา. (2555). การวิเคราะห์ปริมาณสารหนู ตะกั่วและแมงกานีส ในตัวอย่างตะกอนธารน้ำ และตัวอย่างน้ำ พื้นที่จังหวัดลำพูน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
- วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์. (2560). สารหนูและแมงกานีส. Retrieved from http://www.summa-cheeva.org/index_thaitox_manganese.htm
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2540). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ. (2558). ภัยร้ายจากสารหนู. Retrieved from <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/99>
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา. (2557). ภูฏานเนเปียร์. Retrieved from <http://nutrition.dld.go.th/nutrition/index.php/write-nakornrachasrima>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. (2561). แสงซินโครตรอน. Retrieved from <https://www.slri.or.th/th/what-is-synchrotron-light.html>
- สาตี ชินสสิต และหฤทัย แก่นลา. (2548). คู่มือปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับเกษตรกร). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขาธิการกรม กรมวิชาการเกษตร.
- สิตาวีร์ ชีร์วิรุฬห์. (2560). เหมืองแร่ทองคำ: รายได้รัฐและผลกระทบต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. Retrieved from <http://library2.parliament.go.th/ebook/content-ebbas/2560-sitawee.pdf>
- สุริยะ สมศิริ และสุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ. (2558). ศักยภาพการแปรรูปภูฏานเนเปียร์ไปเป็นพลังงาน. วารสารวิจัยพลังงาน, 12(2), 47-58.
- อโณทัย โกวิทวิวัฒน์ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และพินิจภณ ปิตุยะ. (2562). ไม้กระถินเหลือใช้.....มวลชีวภาพสำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อน. วารสารสิ่งแวดล้อม, 23(4).
- อรสา สุกสว่าง. (2548). แบบจำลองการประเมินศักยภาพของชุมชนด้านความเข้มแข็งและความยากจน. วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์, 31(1), 75-95.

ภาษาอังกฤษ

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., et al. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

- Ali, H., Khan, E., and Ilahi, I. (2019). Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305. doi:10.1155/2019/6730305
- Ana, K. F. V., Tatiane, d. C. B., Rogerio, F. D., Janeo, E. A. F., Roberta, S. N. d. L., Rafael, S. F., et al. (2017). Production potential and chemical composition of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) at different ages for energy purposes. *African Journal of Biotechnology*, 16(25), 1428-1433. doi:10.5897/ajb2017.16014
- Beesley, L., Inneh, O., Norton, G., Moreno-Jiménez, E., Pardo, T., Clemente, R., et al. (2014). Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environmental Pollution*, 186, 195–202. doi:10.1016/j.envpol.2013.11.026
- Biederman, L., and Harpole, W. (2012). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5. doi:10.1111/gcbb.12037
- Bissen, M., and Frimmel, F. (2003). Arsenic-a Review. Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation, Mobility. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 31, 9-18. doi:10.1002/aheh.200390025
- Bolan, N. S., Park, J. H., Robinson, B., Naidu, R., and Huh, K. Y. (2011). Chapter four - Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, 112, 145-204. doi:10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4
- Bonanomi, G., Ippolito, F., Cesarano, G., Nanni, B., Lombardi, N., Rita, A., et al. (2017). Biochar As Plant Growth Promoter: Better Off Alone or Mixed with Organic Amendments? *Frontiers in Plant Science*, 8. doi:10.3389/fpls.2017.01570
- Boonsrang, A., Chotpantarat, S., and Sutthirat, C. (2017). Factors controlling the release of metals and a metalloid from the tailings of a gold mine in Thailand. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 18, geochem2017-2034. doi:10.1144/geochem2017-034
- Borchard, N., Spokas, K., Prost, K., and Siemens, J. (2014). Greenhouse Gas Production in Mixtures of Soil with Composted and Noncomposted Biochars Is Governed by Char-Associated Organic Compounds. *Journal of Environmental Quality*, 43, 971-979. doi:10.2134/jeq2013.07.0290

- Brady, N. C., and Weil, R. R. (2002). *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, New Jersey.
- Brendová, K., Tlustoš, P., and Száková, J. (2016). Biochar immobilizes cadmium and zinc and improves phytoextraction potential of willow plants on extremely contaminated soil. *Plant, Soil and Environment*, 61(No. 7), 303-308. doi:10.17221/1/181/2015-pse
- Cao, X., and Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, 101(14), 5222-5228. doi:10.1016/j.biortech.2010.02.052
- Danald, L. S. (1995). *Environmental soil chemistry*. Academic Press, USA.
- Deshmukh, A., Nagarnaik, P., and Daryapurkar, R. (2015a). Assessment of Biogas Generation Potential of Napier Grass.
- Deshmukh, A., Nagarnaik, P. B., and Daryapurkar, R. A. (2015b). *Assessment of Biogas Generation Potential of Napier Grass*. Paper presented at the 2015 7th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (ICETET). doi:10.1109/ICETET.2015.35
- Dias, B. O., Silva, C. A., Higashikawa, F. S., Roig, A., and Sánchez-Monedero, M. A. (2010). Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*, 101(4), 1239-1246. doi:10.1016/j.biortech.2009.09.024
- Edenborn, S. L., Edenborn, H. M., Krynock, R. M., and Haug, K. L. Z. (2015). Influence of biochar application methods on the phytostabilization of a hydrophobic soil contaminated with lead and acid tar. *Journal of Environmental Management*, 150, 226-234. doi:10.1016/j.jenvman.2014.11.023
- Elevitch, C. R., Wilkinson, K.M, and Friday, J.B. (2006). *Acacia Koa* Retrieved from <https://agroforestry.org/free-publications/traditional-tree-profiles>
- Elouear, Z., Bouhamed, F., Boujelben, N., and Bouzid, J. (2016). Application of sheep manure and potassium fertilizer to contaminated soil and its effect on zinc, cadmium and lead accumulation by alfalfa plants. *Sustainable Environment Research*, 26(3), 131-135. doi:10.1016/j.serj.2016.04.004

- Fellet, G., Marmiroli, M., and Marchiol, L. (2014). Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of The Total Environment*, 468-469, 598-608. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.08.072
- Ferguson, J. F., and Gavis, J. (1972). A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research*, 6(11), 1259-1274. doi:10.1016/0043-1354(72)90052-8
- Fernando, D., Mizuno, T., Woodrow, I., Baker, A., and Collins, R. (2010). Characterization of foliar manganese (Mn) in Mn (hyper) accumulators using X-ray absorption spectroscopy. *The New phytologist*, 188, 1014-1027. doi:10.1111/j.14698137.2010.03431.x
- Freitas, R., Godoy Perilli, T. A., and Ladeira, A. (2013). Oxidative Precipitation of Manganese from Acid Mine Drainage by Potassium Permanganate. *Journal of Chemistry*, 2013, 1-8. doi:10.1155/2013/287257
- Galende, M. A., Becerril, J. M., Barrutia, O., Artetxe, U., Garbisu, C., and Hernández, A. (2014). Field assessment of the effectiveness of organic amendments for aided phytostabilization of a Pb-Zn contaminated mine soil. *Journal of Geochemical Exploration*, 145, 181-189. doi:10.1016/j.gexplo.2014.06.006
- Grüter, R., Costerousse, B., Bertoni, A., Mayer, J., Thonar, C., Frossard, E., et al. (2017). Green manure and long-term fertilization effects on soil zinc and cadmium availability and uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages. *Science of The Total Environment*, 599-600, 1330-1343. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.070
- Hamid, Y., Tang, L., Hussain, B., Usman, M., Lin, Q., Rashid, M. S., et al. (2020). Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: A review. *Science of The Total Environment*, 707, 121-136. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136121
- Han, T., Zhao, Z., Bartlam, M., and Wang, Y. (2016). Combination of biochar amendment and phytoremediation for hydrocarbon removal in petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), 219-228. doi:10.1007/s11356-016-7236-6
- He, H., Pan, J., Yu, P., Chen, G., and Li, H. (2017). Effects of Hybrid Giant Napier Biochar on Cadmium Migration in a Cabbage-Soil System Contaminated with Cadmium

- and Butachlor. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(2), 619-625. doi:10.15244/pjoes/65362
- Hodgson, J. D. (1963). Automation-A study in promise, problem, and polemics. *Human Resource Management* 2(3), 1-9. doi: 10.1002/hrm.3930020302
- Hossain, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Vigneswaran, S., et al. (2014). Competitive adsorption of metals on cabbage waste from multi-metal solutions. *Bioresource Technology*, 160, 79-88. doi:10.1016/j.biortech.2013.12.107
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., and Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Ann Bot*, 90(4), 485-488. doi:10.1093/aob/mcf214
- Ibrahim, M., Khan, S., Hao, X., and Li, G. (2016). Biochar effects on metal bioaccumulation and arsenic speciation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) grown in contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(10), 2467-2474. doi:10.1007/s13762-016-1081-5
- Igalavithana, A. D., Park, J., Ryu, C., Lee, Y. H., Hashimoto, Y., Huang, L., et al. (2017). Slow pyrolyzed biochars from crop residues for soil metal(loid) immobilization and microbial community abundance in contaminated agricultural soils. *Chemosphere*, 177, 157-166. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.02.112
- Isaure, M. P., Fraysse, A., Devès, G., Le Lay, P., Fayard, B., Susini, J., et al. (2006). Microchemical imaging of cesium distribution in *Arabidopsis thaliana* plant and its interaction with potassium and essential trace elements. *Biochimie*, 88(11), 1583-1590. doi:10.1016/j.biochi.2006.08.006
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., and Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*, 7(2), 60-72. doi:10.2478/intox-2014-0009
- Jang, Y. C., Townsend, T. G., Ward, M., and Bitton, G. (2002). Leaching of Arsenic, Chromium, and Copper in a Contaminated Soil at a Wood Preserving Site. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(6). doi:10.1007/s00128-002-0132-4
- Juel, M. A., Dey, T. K., Akash, I., and Das, K. (2018). Heavy Metals Phytoremediation Potential of Napier Grass (*Pennisetum Purpureum*) Cultivated in Tannery Sludge.

- Proceedings of the 4th International conference on civil engineering for sustainable development (ICCESD), KUET, Khulna, Bangladesh
- Kamau, J., Biber-Freudenberger, L., Lamers, J., Stellmacher, T., and Borgemeister, C. (2018). Soil fertility and biodiversity on organic and conventional smallholder farms in Kenya. *Applied Soil Ecology*, 134. doi:10.1016/j.apsoil.2018.10.020
- Khaled, H., and Fawy, H. (2011). Effect of Different Levels of Humic Acids on the Nutrient Content, Plant Growth, and Soil Properties under Conditions of Salinity. *Soil and Water Research*, 6, 21-29. doi:10.17221/4/2010-SWR
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., and Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268. doi:10.1016/j.gexplo.2016.11.021
- Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., and Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1591-1605. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.030
- Kim, S. U., Owens, V. N., Kim, S. Y., and Hong, C. O. (2017). Effect of different way of bottom ash and compost application on phytoextractability of cadmium in contaminated arable soil. *Applied Biological Chemistry*, 60(4), 353-362. doi:10.1007/s13765-017-0287-7
- Kiran, Y. K., Barkat, A., Cui, X.-q., Feng, Y., Pan, F.-s., Tang, L., et al. (2017). Cow manure and cow manure-derived biochar application as a soil amendment for reducing cadmium availability and accumulation by *Brassica chinensis* L. in acidic red soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(3), 725-734. doi:10.1016/S20953119(16)61488-0
- Kiventerä, J., Sreenivasan, H., Cheeseman, C., Kinnunen, P., and Illikainen, M. (2018). Immobilization of sulfates and heavy metals in gold mine tailings by sodium silicate and hydrated lime. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6530-6536. doi:10.1016/j.jece.2018.10.012
- Koren, Š., Arcon, I., Kump, P., Necemer, M., and Vogel-Mikus, K. (2013). Influence of CdCl₂ and CdSO₄ supplementation on Cd distribution and ligand environment in leaves of the Cd hyperaccumulator *Noccaea (Thlaspi) praecox*. *Plant and Soil*, 370. doi:10.1007/s11104-013-1617-0

- Lebrun, M., Miard, F., Nandillon, R., Hattab-Hambli, N., Scippa, G. S., Bourgerie, S., et al. (2018a). Eco-restoration of a mine technosol according to biochar particle size and dose application: study of soil physico-chemical properties and phytostabilization capacities of *Salix viminalis*. *Journal of Soils and Sediments*, 18(6), 2188-2202. doi:10.1007/s11368-017-1763-8
- Lebrun, M., Miard, F., Nandillon, R., Léger, J.-C., Hattab-Hambli, N., Scippa, G. S., et al. (2018b). Assisted phytostabilization of a multicontaminated mine technosol using biochar amendment: Early stage evaluation of biochar feedstock and particle size effects on As and Pb accumulation of two Salicaceae species (*Salix viminalis* and *Populus euramericana*). *Chemosphere*, 194, 316-326. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.111.113
- Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M. (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems-A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403-427. doi:10.1007/s11027-005-9006-5
- Li, Z., Unzué-Belmonte, D., Cornelis, J.-T., Linden, C. V., Struyf, E., Ronsse, F., et al. (2019). Effects of phytolithic rice-straw biochar, soil buffering capacity and pH on silicon bioavailability. *Plant and Soil*, 438(1), 187-203. doi:10.1007/s11104-019-04013-0
- Lima, I. M., Boykin, D. L., Thomas Klasson, K., and Uchimiya, M. (2014). Influence of post-treatment strategies on the properties of activated chars from broiler manure. *Chemosphere*, 95, 96-104. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.08.027
- Liu, X., Liu, M., Wang, C., and Xia, X. (2015). A hyperspectral index sensitive to subtle changes in the canopy chlorophyll content under arsenic stress. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36. doi:10.1016/j.jag.2014.10.017
- Liu, Z., Demisie, W., and Zhang, M. (2013). Simulated degradation of biochar and its potential environmental implications. *Environ Pollut*, 179, 146-152. doi:10.1016/j.envpol.2013.04.030
- Lombi, E., de Jonge, M. D., Donner, E., Kopittke, P. M., Howard, D. L., Kirkham, R., et al. (2011). Fast x-ray fluorescence microtomography of hydrated biological samples. *PLoS One*, 6(6), e20626. doi:10.1371/journal.pone.0020626

- Lombi, E., Scheckel, K. G., Pallon, J., Carey, A. M., Zhu, Y. G., and Meharg, A. A. (2009). Speciation and distribution of arsenic and localization of nutrients in rice grains. *New Phytol*, 184(1), 193-201. doi:10.1111/j.1469-8137.2009.02912.x
- Mohamed, B., Ellis, N., Kim, C., and Bi, X. (2017). The role of tailored biochar in increasing plant growth, and reducing bioavailability, phytotoxicity, and uptake of heavy metals in contaminated soil. *Environmental Pollution*, 230, 329-338. doi:10.1016/j.envpol.2017.06.075
- Muhammad, D., Chen, F., Zhao, J., Zhang, G., and Wu, F. (2009). Comparison of EDTA- and Citric Acid-Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals in Artificially Metal Contaminated Soil by *Typha Angustifolia*. *International Journal of Phytoremediation*, 11(6), 558-574. doi:10.1080/15226510902717580
- Naeem, M. A., Khalid, M., Aon, M., Abbas, G., Amjad, M., Murtaza, B., et al. (2018). Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize. *Journal of Plant Nutrition*, 41(1), 112-122. doi:10.1080/01904167.2017.1381734
- Nak-ai, W., Jiawiwatkul, U., Temsirikulchia, L., and Nontapattamadul, K. (2018). Community public policy process for solving cadmium contamination problems in the environment: A case study of Mae Sod district, Tak province. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 39(1), 59-66. doi:10.1016/j.kjss.2017.11.006
- Negawo, A. T., Teshome, A., Kumar, A., Hanson, J., and Jones, C. (2017). Opportunities for Napier Grass (*Pennisetum purpureum*) Improvement Using Molecular Genetics. *Agronomy*, 7. doi:10.3390/agronomy7020028
- Niazi, N. K., Bashir, S., Bibi, I., Murtaza, B., Shahid, M., Javed, M. T., et al. (2016). Phytoremediation of arsenic-contaminated soils using arsenic hyperaccumulating ferns. *Phytoremediation*, 521-545. doi:10.1007/978-3-31940148-5_19
- Noroozisharaf, A., and Kaviani, M. (2018). Effect of soil application of humic acid on nutrients uptake, essential oil and chemical compositions of garden thyme (*Thymus vulgaris* L.) under greenhouse conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24(3), 423-431. doi:10.1007/s12298-018-0510-y

- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44(2), 322–331. doi:10.2307/1932179
- Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., and Chuasavathi, T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348(1), 439. doi:10.1007/s11104-011-0948-y
- Pavlovic, D., Nikolic, B., Djurovic, S., Waisi, H., Andjelkovic, A., and Marisavljevic, D. (2014). Chlorophyll as a measure of plant health: Agroecological aspects. *Pesticidi i fitomedicina*, 29(1), 21-34. doi:10.2298/pif1401021p
- Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A., and Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5(1), 65-75. doi:10.5194/se-5-65-2014
- Pigna, M., Caporale, A., Cavalca, L., Sommella, A., and Violante, A. (2015). Arsenic in the Soil Environment: Mobility and Phytoavailability. *Environmental Engineering Science*, 32, 150505074828006. doi:10.1089/ees.2015.0018
- Pituya, P., Sriburi, T., and Wijitkosum, S. (2017). Optimization of Biochar Preparation from Acacia Wood for Soil Amendment. *Engineering Journal*, 21, 99-105. doi:10.4186/ej.2017.21.3.63
- Prapagdee, S., Piyatiratitivorakul, S., Petsom, A., and Tawinteung, N. (2014). Application of Biochar for Enhancing Cadmium and Zinc Phytostabilization in *Vigna radiata* L. Cultivation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(12). doi:10.1007/s11270-0142233-1
- Rodríguez-Vila, A., Asensio, V., Forján, R., and Covelo, E. F. (2016). Assessing the influence of technosol and biochar amendments combined with *Brassica juncea* L. on the fractionation of Cu, Ni, Pb and Zn in a polluted mine soil. *Journal of Soils and Sediments*, 16(2), 339-348. doi:10.1007/s11368-015-1222-3
- Safaei khorram, M., Zhang, G., Fatemi, A., Kiefer, R., Maddah, K., Baqar, M., et al. (2018). Impact of biochar and compost amendment on soil quality, growth and yield of a replanted apple orchard in a four-year field study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. doi:10.1002/jsfa.9380
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., and Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1), 1-13. doi:10.1016/j.desal.2011.07.019

- Sato, A., Takeda, H., Oyanagi, W., Nishihara, E., and Murakami, M. (2010). Reduction of cadmium uptake in spinach (*Spinacia oleracea* L.) by soil amendment with animal waste compost. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1), 298-304. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.05.011
- Sawasdee, V., and Pisutpaisal, N. (2014). Feasibility of Biogas Production from Napier Grass. *Energy Procedia*, 61, 1229-1233. doi:10.1016/j.egypro.2014.11.1064
- Schulz, H., Dunst, G., and Glaser, B. (2013). Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 33. doi:10.1007/s13593-013-0150-0
- Sevilla-Perea, A., Romero-Puertas, M. C., and Mingorance, M. D. (2016). Optimizing the combined application of amendments to allow plant growth in a multielement-contaminated soil. *Chemosphere*, 148, 220-226. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.01.029
- Shan, H., Su, S., Liu, R., and Li, S. (2016). Cadmium availability and uptake by radish (*Raphanus sativus*) grown in soils applied with wheat straw or composted pig manure. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(15), 15208-15217. doi:10.1007/s11356-016-6464-0
- Sharma, V. K., and Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment International*, 35(4), 743-759. doi:10.1016/j.envint.2009.01.005
- Souza, E. S., Dias, Y. N., da Costa, H. S. C., Pinto, D. A., de Oliveira, D. M., de Souza Falção, N. P., et al. (2019). Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 425-434. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.11.032
- Stieger, P. A., and Feller, U. (1994). Nutrient accumulation and translocation in maturing wheat plants grown on waterlogged soil. *Plant and Soil*, 160(1), 87-95. doi:10.1007/BF00150349
- Sun, L., Wu, Q., Liao, K., Yu, P., Cui, Q., Rui, Q., et al. (2016). Contribution of heavy metals to toxicity of coal combustion related fine particulate matter (PM_{2.5}) in *Caenorhabditis elegans* with wild-type or susceptible genetic background. *Chemosphere*, 144, 2392-2400. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.11.028

- Tananonchai, A., and Sampanpanish, P. (2014). Effect of EDTA and DTPA on Cadmium Removal from Contaminated Soil with Water Hyacinth. doi:10.14456/aer.2014.25
- Tananonchai, A., Sampanpanish, P., Chanpiwat, P., Tancharakorn, S., and Sukkha, U. (2019). Effect of EDTA and NTA on cadmium distribution and translocation in *Pennisetum purpureum* Schum cv. Mott. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 9851-9860. doi:10.1007/s11356-018-04103-z
- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., and Mukhlisin, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 939161. doi:10.1155/2011/939161
- Thangavel, P., and Subbhuraam, C. V. (2004). Phytoextraction: Role of Hyperaccumulators in Metal Contaminated Soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B*, 70, 109-130. doi:10.1007/s11270-007-9401-5
- Theisen, R. (1965). *General features of electron microprobe analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- tien, C. (2018). Introduction to adsorption: Basis, analysis and applications (1 ed.). Elsevier.
- USEPA. (1990). Synthetic precipitation leaching procedure, Test Method for Evaluation Solid Waste: Physical/Chemical Method (Method 1312). Washington D.C., United States of America.
- USEPA. (1996). Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (method 3052). Washington D.C., United States of America.
- USEPA. (2000). Introduction to Phytoremediation. EPA 600/R-99/107. Cincinnati, OH: U.S. Environment Protection Agency, Office of Research and Development, USA.
- USEPA. (2007). Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and oils (Method 3051A). Washington D.C., United States of America.
- Van der Sloot, H. A., and van Zomeren, A. (2012). Characterisation Leaching Tests and Associated Geochemical Speciation Modelling to Assess Long Term Release Behaviour from Extractive Wastes. *Mine Water and the Environment*, 31(2), 92-103. doi:10.1007/s10230-012-0182-8

- Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of difference resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144, 307-313. doi:10.1016/S01761617(11)81192-2
- Xu, G., Zhang, Y., Sun, J., and Shao, H. (2016). Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. *Science of The Total Environment*, 568, 910-915. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.079
- Xu, X., Shi, J., Chen, X., Chen, Y., and Hu, T. (2008). Chemical forms of manganese in the leaves of manganese hyperaccumulator *Phytolacca acinosa* Roxb. (*Phytolaccaceae*). *Plant and Soil*, 318(1), 197. doi:10.1007/s11104-008-9829-4
- Yilmaz, C., and Gökmen, V. (2016). Chlorophyll. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health*, 37-41. Oxford: Academic Press.
- Zhang, Z., Solaiman, Z. M., Meney, K., Murphy, D. V., and Rengel, Z. (2013). Biochars immobilize soil cadmium, but do not improve growth of emergent wetland species *Juncus subsecundus* in cadmium-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 13(1), 140-151. doi:10.1007/s11368-012-0571-4
- Zhao, B., Xu, R., Ma, F., Li, Y., and Wang, L. (2016). Effects of biochars derived from chicken manure and rape straw on speciation and phytoavailability of Cd to maize in artificially contaminated loess soil. *Journal of Environmental Management*, 184, 569-574. doi:10.1016/j.jenvman.2016.10.020
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., and Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*, 227, 98-115. doi:10.1016/j.envpol.2017.04.032

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์
วัน เดือน ปี เกิด	5 มีนาคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (เกียรตินิยมอันดับ 2)
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 18/3 หมู่ 6 ตำบลบางคูวัด อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
ผลงานตีพิมพ์	<p>1) ผลงานตีพิมพ์ในวารสารสิ่งแวดล้อม</p> <p>1.1) อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์, พันธวิศ สัมพันธ์พานิช และพินิจภณ ปิตุยะ. 2562. ไม่กระถินเหลือใช้.....มวลชีวภาพสำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อน. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 23 (ฉบับที่ 4).</p> <p>1) การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ</p> <p>2.1) อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์ และพันธวิศ สัมพันธ์พานิช. 2562. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของถ่านชีวภาพจากขานอ้อย หญ้าเนเปียร์ และไม้กระถินต่อการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 18 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย วันที่ 23-24 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์, กรุงเทพมหานคร.</p> <p>3) การฝึกอบรม</p> <p>3.1) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม The ASEAN Workshop on X-ray Fluorescence (AWXRF2018): Application on plants and Agriculture ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์การมหาชน จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2561</p> <p>3.2) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม The 7th ASEAN Synchrotron Science Camp ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่ 27-30 พฤศจิกายน 2561</p> <p>3.3) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรมการใช้งานโปรแกรม ChemTract & WasteTract ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 15 พฤษภาคม 2561</p>
รางวัลที่ได้รับ	1) ได้รับทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช